



**T.C.  
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TISbSe<sub>2</sub> BİLEŞİĞİNİN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**Hanife BAŞ**

**Fizik Anabilim Dalı**

**Genel Fizik Programı**

**Danışman**

**Doç. Dr. Nevin KALKAN**

**Aralık, 2014**

**İSTANBUL**

Bu çalışma 12/12/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı Genel Fizik programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

**Tez Jürisi:**



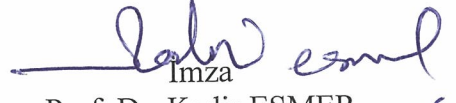
İmza

Doç. Dr. Nevin KALKAN  
(Danışman)  
İstanbul Üniversitesi  
Fen Fakültesi



İmza

Prof. Dr. Kubilay KUTLU  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Fen-Edebiyat Fakültesi



İmza

Prof. Dr. Kadir ESMER  
Marmara Üniversitesi  
Fen-Edebiyat Fakültesi



İmza

Yrd. Doç. Dr. H. Kemal ULUTAŞ  
İstanbul Üniversitesi  
Fen Fakültesi



İmza

Yrd. Doç. Dr. Saffettin YILDIRIM  
İstanbul Üniversitesi  
Fen Fakültesi

## ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim boyunca tüm bilgi ve deneyimlerimden tereddütsüz faydalanabildiğim, tez çalışmam sırasında her türlü destek ve yardımıyla yanımda olan, karşılaştığım tüm zorlukları aşarken her zaman varlığını hissettiğim çok kıymetli hocam Doç. Dr. Nevin KALKAN'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Belirli aşamalardan geçerek bu duruma gelmemde büyük katkısı ve özverisi olan çok değerli hocalarım Prof. Dr. Deniz DEĞER ULUTAŞ ve Yard. Doç. Dr. H. Kemal ULUTAŞ'a çok teşekkür ederim.

Bilgi ve tecrübelerinden her zaman faydalanabildiğim hocalarım Yard.Doç.Dr. Saffettin YILDIRIM ve Araş. Gör. Şahin YAKUT'a yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

TlSbSe<sub>2</sub> malzemesini hazırlayan Prof. Dr. Mehmet ÖZER'e teşekkür ederim. Ayrıca desteklerinden dolayı hocam Yard. Doç. Dr. Namık AKÇAY'a da teşekkür ederim.

Aralık 2014

Hanife BAŞ

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
TABLO LİSTESİ .....	vi
SİMGE VE KISALTIMA LİSTESİ .....	vii
ÖZET.....	viii
SUMMARY .....	ix
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. GENEL KISIMLAR .....</b>	<b>6</b>
2.1. DC İLETKENLİK .....	6
2.1.1. Omik Kontak.....	9
2.2. METAL/YARIİLETKEN/METAL YAPILARDA İLETKENLİK MEKANİZMALARI .....	10
2.2.1. Termiyonik Emisyon .....	10
2.2.2 Schottky Emisyonu .....	12
2.2.3. Poole-Frenkel Emisyonu.....	14
2.2.4. Uzay Yüğü Sınırlayan Akımlar (SCLC).....	15
2.3. ELEKTRİKSEL ANAHTARLAMA .....	19
2.4. AKIMIN SICAKLIKLA DEĞİŞİMİ VE AKTİVASYON ENERJİSİ .....	21
<b>3. MALZEME VE YÖNTEM .....</b>	<b>24</b>
3.1. ÖRNEKLERİN ÖLÇÜME UYGUN HALE GETİRİLMESİ.....	24
3.1.1. Malzemenin Hazırlanması .....	24
3.1.2. Kontakların Hazırlanması .....	24
3.2. ÖLÇÜM AŞAMASI.....	25
<b>4. BULGULAR .....</b>	<b>27</b>
4.1. İLETKENLİK VE ELEKTRİKSEL ANİZOTROPİ.....	27
4.2. ANAHTARLAMA ÖNCESİ İLETKENLİK MEKANİZMA TAYİNİ .....	34
4.3. ELEKTRİKSEL ANAHTARLAMA .....	40
<b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....</b>	<b>47</b>

5.1. İLETKENLİK VE ELEKTRİKSEL ANİZOTROPİ.....	47
5.2. ANAHTARLAMA ÖNCESİ İLETKENLİK MEKANİZMA TAYİNİ .....	49
5.3. ELEKTRİKSEL ANAHTARLAMA .....	50
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>52</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>59</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa No

Şekil 2.1: Bir yarıiletkenin (a) $T=0$ K' de (b) $T>0$ K' de enerji bant diyagramı. ....	6
Şekil 2.2: (a) n-tipi (b) p-tipi. ....	7
Şekil 2.3: Enerji -bant diyagramları (a) n-tipi yarıiletken-metal (b) n-tipi yarıiletken- metal omik kontak (c) ileri bias (d) geri bias (e) p-tipi yarıiletken-metal (f) p-tipi yarıiletken-metal omik kontak (g) ileri bias (h) geri bias. ....	9
Şekil 2.4: Termiyonik emisyon. ....	10
Şekil 2.5: Schottky emisyonunda bariyer durumu. ....	13
Şekil 2.6: L uzunluğundaki bir yarı iletkene tabakalar boyunca alan uygulanması. ....	15
Şekil 2.7: (a) S-tipi (b) N-tipi (c) Z-tipi. ....	19
Şekil 2.8: (a) Memory anahtarlama, (b) Threshold Anahtarlama. ....	21
Şekil 2.9: $(1/T)^{-1}$ ye karşı $\log R$ 'nin değişimi. ....	22
Şekil 2.10: İletkenliğin sıcaklıkla değişimi. ....	23
Şekil 3.1: Vakum Sistemi. ....	24
Şekil 3.2: Tabakalara paralel ve dik hazırlanan kontaklar. ....	25
Şekil 3.3: Deney seti. ....	26
Şekil 4.1: TlSbSe <sub>2</sub> kristallerinin SEM görüntüleri. ....	27
Şekil 4.2: 293 K' de tabakalara dik ve paralel kontakla yapılan I-V ölçümleri. ....	28
Şekil 4.3: (a) Tabakalara dik kontaklı ölçüm için 233 - 293 K sıcaklık aralığında omik bölge (b) Tabakalara dik kontaklı ölçüm için 298 - 353 K sıcaklık aralığında omik bölge. ....	29
Şekil 4.4: (a) Tabakalara paralel kontaklı ölçüm için 233-293 K sıcaklık aralığında omik bölge (b) Tabakalara paralel kontaklı ölçüm için 298-353 K sıcaklık aralığında omik bölge. ....	30
Şekil 4.5: Öz direncin sıcaklığa bağlı değişimi. ....	31
Şekil 4.6: İletkenliğin sıcaklıkla değişimi. ....	32
Şekil 4.7: Anizotropi faktörünün sıcaklıkla değişimi. ....	33

<b>Şekil 4.8:</b> (a) Tabakalara dik kontak durumu için 233 - 293 K sıcaklık aralığında I-V davranışı (b) Tabakalara dik kontak durumu için 303 - 373 K sıcaklık aralığında I-V davranışı.....	35
<b>Şekil 4.9:</b> (a) Tabakalara paralel kontak durumu için 233 - 293 K sıcaklık aralığında I-V davranışı (b) Tabakalara paralel kontak durumu için 303 - 373 K sıcaklık aralığında I-V davranışı.....	36
<b>Şekil 4.10:</b> (a) Tabakalara paralel kontak durumu için 233 - 293 K sıcaklık aralığında omik bölge (b) Tabakalara paralel kontak durumu için 303 - 373 K sıcaklık aralığında omik bölge. ....	37
<b>Şekil 4.11:</b> (a) Tabakalara paralel kontak durumu için 233 - 293 K sıcaklık aralığında $1 < m < 2$ bölgesi (b) Tabakalara paralel kontak durumu için 303 - 373 K sıcaklık aralığında $1 < m < 2$ bölgesi. ....	38
<b>Şekil 4.12:</b> (a) Tabakalara paralel kontak durumu için 233 - 293 K sıcaklık aralığında $m > 2$ bölgesi (b) Tabakalara paralel kontak durumu için 303 - 373 K sıcaklık aralığında $m > 2$ bölgesi. ....	39
<b>Şekil 4.13:</b> $m > 2$ bölgesi için kuvvet kanunu üstelinin sıcaklıkla değişimi.....	40
<b>Şekil 4.14:</b> 293 K' de seri dirençli ( $R_S \neq 0$ ) ve seri dirençsiz ( $R_S = 0$ ) durumda I-V karakteristiği (a) paralel kontaklı durum, (b) dik kontaklı durum.....	41
<b>Şekil 4.15:</b> Farklı seri dirençler kullanılması durumunda I-V karakteristiği.....	42
<b>Şekil 4.16:</b> $V_{th}$ ve $I_{th}$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi. ....	43
<b>Şekil 4.17:</b> Farklı sıcaklıklarda I-V karakteristikleri, (a) 293K (b) 313K (c) 333 K (d) 353K....	44
<b>Şekil 4.18:</b> 293 K' de düz besleme ve ters besleme etkisindeki I-V karakteristiği. ....	45
<b>Şekil 4.19:</b> Threshold voltajının sıcaklıkla değişimi. ....	45
<b>Şekil 4.20:</b> Tabakalara dik kontaklı örnekte 294 ve 338 K için NDR bölgesinde ölçülen sıcaklık değerleri [33].....	46

## TABLO LİSTESİ

**Sayfa No**

**Tablo 4.1.:** TlSbSe<sub>2</sub> bileşiminin üç bölgeye ait aktivasyon enerjileri.....32



## SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$\vec{J}_e$	: Elektronlardan kaynaklanan akım yoğunluğu
$\vec{J}_h$	: Hollerden kaynaklanan akım yoğunluğu
$e$	: Elektronun yükü
$\vec{E}$	: Elektrik alan
$\mu_h$	: Hol mobilitesi
$\mu_e$	: Elektron mobilitesi
$n$	: Elektronlardan yoğunluğu
$p$	: Hol yoğunluğu
$\sigma_i$	: Asal yarıiletkende elektriksel iletkenlik
$\sigma_k$	: Katkılı yarıiletkenlerde elektriksel iletkenlik
$\phi_S$	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
$\phi_M$	: Metalin iş fonksiyonu
$\phi_B$	: Engel yüksekliği
$\beta_{SC}$	: Schootky mekanizma katsayısı
$\beta_{PF}$	: Poole-Frenkel mekanizma katsayısı
$G$	: Durum yoğunluğu
$\epsilon_0$	: Serbest uzayın permitivitesi
$E_F$	: Fermi enerjisi
$V_{tr}$	: Eşik voltajı - Threshold voltaj
$N_C$	: İletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğu
$N_t$	: Tuzak seviyelerinin toplam yoğunluğu
$T_t$	: Tuzak dağılımını karakterize eden sıcaklık değeri
$\Delta E$	: Aktivasyon enerjisi
$\alpha$	: Anizotropi faktörü
$H$	: Bariyer yüksekliği

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>SCLC</b>	: Uzay yükü sınırlayan akım (Space Charge Limited Current)
<b>DC</b>	: Doğru akım (Direct Current)
<b>NDR</b>	: Negatif diferansiyel direnç (Negative Differential Resistivity)
<b>NDC</b>	: Negatif diferansiyel iletkenlik (Negative Differential Conductivity)

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### TlSbSe<sub>2</sub> BİLEŞİĞİNİN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Hanife BAŞ

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Nevin KALKAN

Bu çalışmada, Bridgman-Stockbarger metoduyla büyütülmüş olan TlSbSe<sub>2</sub> tabaka kristaller kullanıldı ve tabakalara paralel ve dik Au elektrotlar oluşturuldu.  $\sim 10^{-5}$  Torr vakum altında, 233-373 K sıcaklık bölgesinde, 1-1000 Volt aralığında gerilim uygulanarak akım-voltaj değişimlerine bakıldı. Bu değişimlerden mevcut ve baskın olan DC iletkenlik mekanizmaları ve gözlenen elektriksel anahtarlamanın tipi belirlendi. Malzemenin elektriksel anizotropiye sahip olup olmadığının belirlenebilmesi için, aynı örnek üzerinde hem tabakalara dik, hem de paralel olan In elektrotlar hazırlandı ve 233-353 K sıcaklık aralığında 0-60 Volt arası voltaj uygulanarak I-V ölçümleri yapıldı. Malzemenin elektriksel iletkenliği incelendi ve anizotropik olduğu bulundu. Ayrıca threshold voltajının seri direnç ve sıcaklık değişimiyle olan ilişkisi incelendi.

Aralık 2014 , 68.

**Anahtar kelimeler:** TlSbSe<sub>2</sub>, DC iletkenlik, SCLC, Elektriksel Anahtarlama, Elektriksel Anizotropi

## **SUMMARY**

**M.Sc. THESIS**

**INVESTIGATION of ELECTRICAL PROPERTIES of TlSbSe<sub>2</sub> COMPOUND**

**Hanife BAŞ**

**İstanbul University**

**Institute of Graduate Studies in Science and Engineering**

**Department of Physics**

**Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Nevin KALKAN**

In this work, TlSbSe<sub>2</sub> layer crystals which were grown by the using Bridgman-Stockbarger technique were used and Au electrodes were formed parallel and perpendicular to the layers. The current and voltage characteristics for these samples were analyzed in  $\sim 10^{-5}$  Torr vacuum with a voltage range of 1-1000 Volts and a temperature range between 233 K and 373 K. From our analysis, we determined the existing and dominant DC conductivity mechanisms as well as the types of observed electrical switching. To define whether it shows electrical anisotropy, Indium electrodes, both parallel and perpendicular to the layers, were prepared and the current-voltage ( I-V) characteristics of TlSbSe<sub>2</sub> between 0-60 volts and between 233- 353 K were carried out. The electrical conductivity of the material was investigated and found to be anisotropic. The relationship between the threshold voltage and series resistance and temperature were also analyzed.

December 2014, 68.

**Keywords:** TlSbSe<sub>2</sub>, DC Conductivity, SCLC, Electrical Switching, Electrical Anisotropy

## 1. GİRİŞ

Yeni buluşlar sayesinde bilimler, canlı hücreler gibi gelişip çoğalmaktadır. Yani yapılan araştırmalar her geçen gün bilimsel ve teknolojik gelişmeleri, yenilikleri beraberinde getirmektedir. Bu gelişme ve yenilikler insanlığın teknolojiye merakını hızla büyüyen bir sosyolojik olguya dönüştürmüştür. Teknoloji artık günlük tüm olayların ve bilimsel çalışmaların vazgeçilmez bir parçası olmuştur. Bu amaçla insanlığın yararına yapılan çalışmaların sayısı da hızla artmıştır.

Daha küçük, daha hafif, daha kolay kullanılabilen ve daha işlevli aygıt, alet, cihaz ...vb. yapımı için yürütülen çok sayıda çalışma sonucunda malzeme bilimi kavramı ortaya çıkmıştır. Malzeme bilimi çalışmalarında malzemenin performansına bakılır ve bir çok özelliği belirlenir.

Malzeme ile ilgili çalışmalardan birinde Karabulut ve diğ. [1] Kobalt ile katkılanmış Talyum Galyum Disülfür ( $TlGaS_2$ ) bileşiğinin yapısal, elektriksel ve foto-elektriksel davranışını incelemiştir. Başka bir çalışmada Salam ve Shams [2] a-Si/c-Si hetero-yapısındaki amorf silikon için yaptığı DC iletkenlik ölçümleri yardımıyla bu malzemenin baskın iletkenlik mekanizmasının uzay yükü sınırlayan akım (SCLC) iletkenlik mekanizması olduğunu tesbit etmiştir. Benzer ölçümlerin yapıldığı çalışmalardan birinde [3]  $InGaSe_2$  malzemesinin S-tipi I-V karakteristik özelliğine sahip olduğu ve oda sıcaklığında  $10^3$  V/cm mertebesindeki elektrik alan altında anahtarlama özelliği gösterdiği belirtilmiştir.

Elektriksel anahtarlama mekanizmaları uygulamada elektronik devrenin güvenliği açısından çok önemlidir. Böyle bir mekanizmanın varlığı söz konusu ise devrede akım veya gerilim kontrol altında tutulabilir. Bu amaçla yapılan ilk çalışmalardan birinde kalkojenit cam ince filmler için threshold tipi anahtarlama mekanizmasının bir matematiksel modeli oluşturulmaya çalışılmıştır [4]. Başka bir çalışmada  $SrTiO_3$  malzemesinin anahtarlama özelliğini inceleyip bu malzemenin sanayide terabit belleğe

sahip aygıtlar için kullanılabilir olduğunu öne sürmüşlerdir [5]. Yine sanayi ve mühendislik açısından önemli bir çalışmada SrTiO ve SrZnO<sub>3</sub> gibi malzemelerdeki anahtarlama mekanizmasının türünü tespit edip ait olduğu türe uygun olarak Flash ve dinamik rastgele erişimli bellek (DRAM) gibi elektronik birimlerin yapımında kullanılabilirliği araştırılmıştır [6]. Başka bir çalışmada NiO heteroyapılı nanotellerin I-V karakteristiklerini C-AFM metoduyla belirleyerek görülen anahtarlama mekanizmasının bipolar-memory tipi anahtarlama olduğunu söylemişlerdir [7]. Yine anahtarlama tipine yönelik çalışmalardan birinde S tipi I-V karakteristik özelliğine sahip vanadyumoksit (VO<sub>2</sub>) bileşiğinin 15-340 K sıcaklık aralığında ölçümleri yapılmıştır [8] ve mevcut anahtarlama mekanizmasının elektronik temelli olduğu ileri sürülmüştür.

Malzeme karakterini belirleyen önemli parametrelerden biri de anizotropidir. Araştırmalar açısından önemli bir yere sahip olan bu özellik çok çeşitli uygulama alanlarında kullanılabilmektedir. Örneğin bir çalışmada [9] petrol alanı tesbitinde anizotropi ölçümünün çok önemli olduğu vurgulanmıştır ve bu ölçümlerin nasıl yapılacağı ayrıntılı bir biçimde anlatılmıştır. Başka bir çalışmada Dünya' nın katmanlarından biri olan astenosferin elektriksel anizotropik özellik gösterdiği tespit edilmiştir [10]. Bir doktora çalışmasında Kuzey Pasifik' te litosfer tabakasında elektriksel anizotropinin varlığı, sıcaklık ve basınç ile ilişkisi incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda anizotropinin madde konsantrasyonu farklılığından kaynaklandığı ileri sürülmüştür [11].

Farklı alanda yapılan bir çalışmada elektrotlar insan kas dokusuna paralel ve dik olarak ayrı ayrı yerleştirilip ölçüm yapılmıştır. Elektrot yüzey alanı ve frekans değerleri değiştirilerek farklı ölçümler alınmıştır. Bu çalışmada klinik uygulamalarda kullanılan bir teknik olan, kas dokunun elektriksel anizotropi değerinin ölçümünün kolaylaştırılması amaçlanmıştır [12].

Malzemenin anizotropisini belirlemek için yapılan çalışmalardan birinde Rabinal ve diğerleri [13] TlInX<sub>2</sub> (X=Se, Te) tabaka yapılı yarıiletkenleri için tabakalara dik ve paralel iletkenliğe basıncın etkisini incelemişlerdir.

Başka bir çalışmada Bakhyshev ve grubu [14], Ebnalwaled ve grubu [15] TlInSe<sub>2</sub> kristallerinde elektriksel anizotropiyi incelemişlerdir.

Werheit ve grubu [16] B<sub>4</sub>C kristallerinde, Anagnostopoulos ve grubu [17] Ga<sub>2/3</sub>PS<sub>3</sub> kristallerinde, Haniyas ve grubu [18] TlInS<sub>2</sub>, TlGaX<sub>2</sub> (X=Se, S) tabaka yapılı kristallerinde elektriksel anizotropinin sıcaklıkla değişimini araştırmışlardır.

Anagnostopoulos ve diğerleri [19] yüksek anizotropiye sahip ZnIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub> kristallerinde iletkenlik ölçümleri yaparak elektron tuzak dağılımı tayini yapmışlardır.

Bir diğer çalışmada Gallos ve grubu [20] tabaka yapılı yarıiletkenlerde basit bir teorik modelle anizotropik iletkenliğin sıcaklık ve uygulanan alana bağlılığını açıklamışlardır.

Başka bir çalışmada 4-prob ve 6-prob metoduyla Carbon-Fiber-Reinforced-Polymer (CFRP) malzemelerin elektriksel anizotropi ölçümleri yapılmıştır ve anizotropi oranı ~1000 olarak hesaplanmıştır [21]. Benzer araştırmaların amaçlandığı bir çalışmada In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> nanotellerinin n-tipi yarıiletken davranışı gösterdiği ve elektriksel anizotropi değerinin 103-106 değerleri arasında olduğu tespit edilmiştir [22].

Bu çalışmaların dışında TlInSe<sub>2</sub>, TlGaTe<sub>2</sub>, TlSe, TlInTe<sub>2</sub> ve TlSbS<sub>2</sub> gibi bir çok Tl<sub>x</sub>A<sub>y</sub> veya Tl<sub>x</sub>A<sub>y</sub>B<sub>z</sub> yapısındaki malzeme, termoelektrik özellikleri sayesinde uygulamada kullanımı yaygın olduğu için yoğun ilgi görmektedir.

TlSbSe<sub>2</sub> de ilginç termoelektrik özellikleriyle bilinen A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>C<sub>2</sub><sup>VI</sup> tipi bir yarıiletkendir. Bu malzemeyle ilgili ilk çalışmalardan birinde Gitsu ve diğ. [23] elektrik ve fotoiletkenlik özelliklerini inceleyerek iletkenliğin kristalin büyütülmesinin ardından uygulanan soğutmanın hızıyla ilişkili olduğunu göstermişlerdir. Aynı ekip başka bir çalışmada Hall mobilitesi ve taşıyıcı yoğunluğunun sıcaklıkla olan değişimini inceleyerek, lokalize seviyelere ait aktivasyon enerjileri hesaplamışlardır [24]. Bundan bir yıl sonra Grincheshen ve diğ. [25] TlSbSe<sub>2</sub> malzemeleri için fotoiletkenlik ölçümleri yaparak, tuzak seviyesi, taşıyıcı yoğunluğu ve tuzak seviyelerinin yakalama tesir kesitlerini belirlemişlerdir.

90'lı yıllardan itibaren malzeme bilimindeki teknolojik gelişmelerin ve bu alandaki çalışmaların da artmasıyla üçlü bileşiklerle ilgili çalışmalara duyulan ilgi giderek artmaya başlamıştır. Banys ve diğ. [26] malzemenin 4,2-700 K geniş sıcaklık aralığında dielektrik özelliklerini incelenmişlerdir. Sonuç olarak malzemenin ferromanyetik özellik gösterdiğini ve yüksek sıcaklıklarda faz geçişi sergilediğini belirlemişlerdir. Başka bir çalışmada yapılan optik ölçümler sonucu ölçülen yansımanın dispersiyon bağıntısı analizleriyle dielektrik sabitinin gerçek ve sanal kısmı belirlenmiştir [27].

Ren ve diğ. [28] Scanning Tunelling Microscopy (STM) ve Atomic Force Microscopy (AFM) görüntülerinden faydalanarak TlSbSe<sub>2</sub> malzemesi için elektron yoğunluğu hesaplamalarını yapmışlardır. Bu hesaplama ve analizler sonucunda yapının üç tip atom barındıran iki tabakadan oluştuğunu, ayrıca görüntülerdeki en parlak atomların Talyum atomları olduğunu tesbit etmişlerdir. Başka bir çalışmada Chrissafis ve diğ. [29] Transmission Electron Microscopy (TEM) ve X-Ray Diffraction (XRD) kullanarak Bridgman-Stockbarger büyütme metoduyla büyütülerek hazırlanmış örneklerin karakterizasyonunu yapmışlardır.

Hoang ve Mahanti [30] III-V-VI<sub>2</sub> üçlü kalkojenitlerde atomik ve elektronik yapı incelemeleri yaparak monoklinik TlSbSe<sub>2</sub>' in (001) düzlemine paralel iki tabakadan oluştuğunu ayrıca Sb ve Tl atomlarının Se atomlarıyla beşer bağ yaptığını saptamışlardır.

Değer ve diğ. [31] termal buharlaştırma yöntemiyle hazırlanmış TlSbSe<sub>2</sub> ince film örnekleri için 293-353 K sıcaklık ve 0,2-100 kHz frekans aralığında kapasite ve dielektrik kayıp değerlerini ölçmüşlerdir. Bu ölçümlerden faydalanarak dielektrik sabitini ve aktivasyon enerjisini hesaplamışlardır.

Kalkan ve diğ. [32] hazırlamış oldukları Au/TlSbSe<sub>2</sub>/Au kapasitörlerin I-V ölçümlerini yaparak incelenen sıcaklık aralığında, non-lineer bölgede baskın DC iletkenlik mekanizmasını belirlemişlerdir. Aynı grup daha sonraki bir çalışmasında [33] Au/TlSbSe<sub>2</sub>/Au kapasitörlerinde yüksek alana doğru gidildikçe negatif diferansiyel direnç (NDR) bölgesinin gözlemlendiğini belirtmiştir.

Son yıllarda yapılan çalışmalarda daha çok malzemenin kristal ve elektronik yapısı araştırılmıştır [34,35].

Literatürde hem tabaka yapılı bileşikler hem de bu malzemelerin elektriksel özellikleri ile ilgili sayısız araştırma bulunmaktadır. Bu tür malzemelerin foto-alıcılar, optik cihazlar, foto-voltaik cihazlar, akusto-elektrik, termo-elektrik aygıtlar [36] ve bunların yanısıra her geçen gün işlevleri artırılarak günlük hayata kazandırılan jeneratör, hoparlör, mikrosensör, bilgisayarlar için DRAM, akım kontrollü indüktans gibi cihazlar da kullanılması [37] araştırmaların sanayi ve teknolojiye sağladığı katkıların küçük bir göstergesidir.

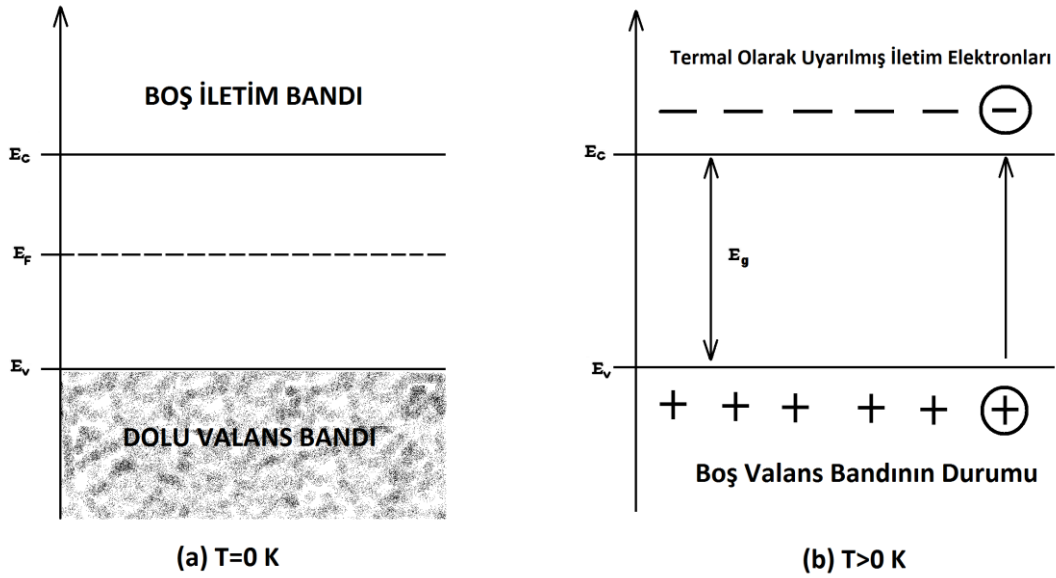
Bu tür gelişmelere yol açması amacıyla başlanılan bu çalışmada, yüksek alana doğru gidildikçe NDR özelliği göstermesiyle ilgi çeken  $TlSbSe_2$  üçlü bileşiğinin, Bridgman-Stockbarger metoduyla hazırlanmış örneklerine uygun maskeler kullanılarak termal buharlaştırma yöntemiyle Au kontaklar yapıldı. Hazırlanan paralel ve dik kontaklı örneklerin 233-373 K sıcaklık bölgesindeki akım-voltaj değişimlerine bakıldı. Elde edilen değerler ile mevcut ve baskın olan DC iletkenlik mekanizmaları, gerçekleşen elektriksel anahtarlanmanın tipi ve malzemenin elektriksel anizotropiye sahip olduğu belirlendi. Ayrıca threshold voltajının seri direnç ve sıcaklık değişimiyle ilişkisi incelendi.



## 2. GENEL KISIMLAR

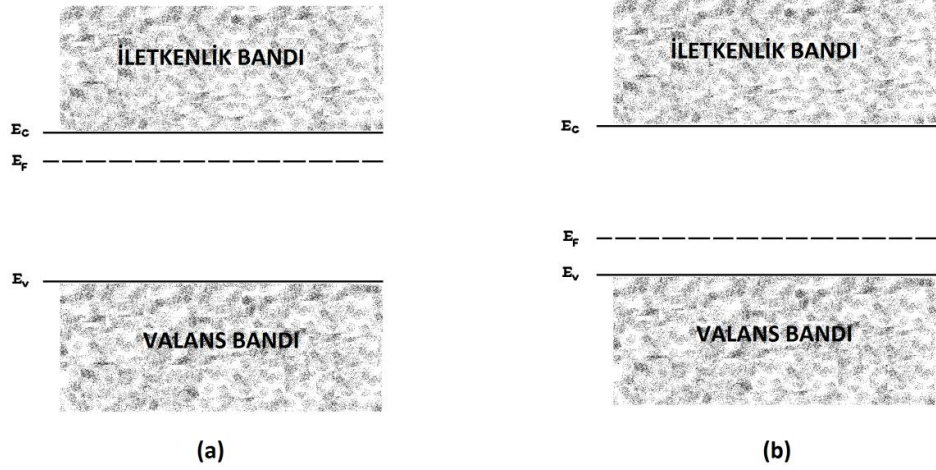
### 2.1. DC İLETKENLİK

Yarıiletkenler elektriksel iletkenlikleri bakımından metal ve yalıtkanlar arasında yer almaktadır. Asal yarıiletkenlerde 0 K' de, iletkenlik bandı tamamen boş valans bandı ise tamamen doludur. Termal uyarma yolu ile valans bandındaki elektronlar iletkenlik bandına geçerler. Asal bir yarıiletkende Fermi enerjisi bant aralığının ortasında bulunur.



Şekil 2.1: Bir yarıiletkenin (a)  $T=0$  K' de (b)  $T>0$  K' de enerji bant diyagramı.

Yarıiletkene katkılanan atomlar ya donör ya da akseptör olarak davranarak n-tip ve p-tip olmak üzere iki tip yarıiletken oluşur. Katkı atomunun tipine ve katkı konsantrasyonuna bağlı olarak Fermi enerji seviyesinin konumu değişir. n-tipi yarıiletkenlerde Fermi enerjisi iletkenlik bandına yaklaşırken, p-tipi yarıiletkenlerde valans bandına yaklaşır.



Şekil 2.2: (a) n-tipi (b) p-tipi.

Bir yarıiletkene alan uygulandığında, toplam akım yoğunluğu  $\vec{J}$

$$\vec{J} = \vec{J}_e + \vec{J}_h = e(n\mu_e + p\mu_h)\vec{E} \quad (2.1)$$

ile verilir. Burada n, p sırasıyla elektron ve hol yoğunlukları,  $\mu_e$  ve  $\mu_p$  elektron ve hol mobiliteleridir.

Elektriksel iletkenlik ise birim elektrik alan başına akım yoğunluğu olarak tanımlandığından;

$$\sigma = \frac{J}{E}$$

ile verilir. Bu eşitlikten (2.1) ifadesi

$$\sigma = e(n\mu_e + p\mu_h) \quad (2.2)$$

şeklinde tekrar yazılır [38]. Asal yarıiletkenlerde elektron ve hol yoğunluğu eşit olduğundan elektriksel iletkenlik yeniden yazıldığında

$$\sigma_i = en_i(\mu_e + \mu_h) \quad (2.3)$$

olur. Asal yarıiletkenler için taşıyıcı yoğunluğu  $n_i$  denklemde yerine yazılırsa;

$$\sigma_i = e(\mu_e + \mu_h) 2 \left( \frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} (m_e m_h)^{3/4} e^{-E_g/2k_B T} \quad (2.4)$$

ifadesi elde edilir.  $\sigma_{oi}$  yarı iletkenin yapısına bağlı bir sabit olmak üzere ifade

$$\sigma_i = \sigma_{oi} e^{-E_g/2k_B T}$$

şeklinde tekrar yazılır [39]. Katkılı yarıiletkenlerde ise elektriksel iletkenlik;

$$\sigma_k = \sigma_{ok} e^{-E_k/k_B T}$$

ifadesi ile verilir. Burada  $E_k$  katkı atomlarının enerji seviyesi,  $\sigma_{ok}$  katkı yarıiletkene ait sabittir. Herhangi bir yarıiletkene ait toplam elektriksel iletkenlik

$$\sigma_t = \sigma_{oi} e^{-E_g/2k_B T} + \sigma_{ok} e^{-E_k/k_B T} \quad (2.5)$$

bağıntısı ile verilir. Denklemdaki birinci terim yüksek sıcaklıklarda ikinci terim ise düşük sıcaklıklarda etkin olmaktadır.

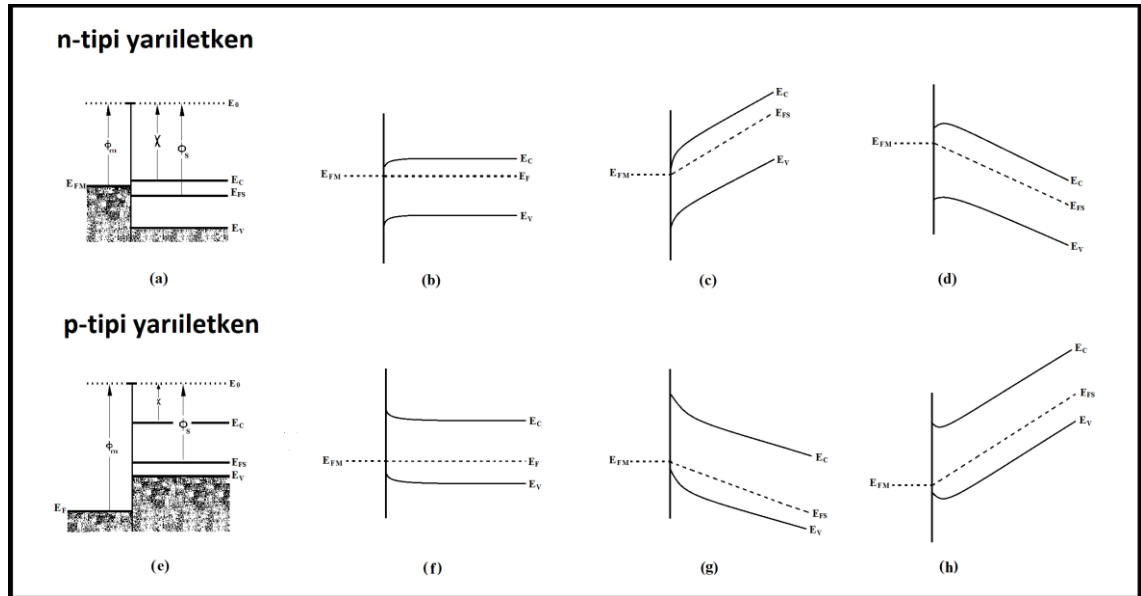
Bir yarıiletkenin elektriksel özellikleri incelenirken o yarıiletken üzerine metal elektrotlar hazırlanarak metal/yarıiletken/metal yapılar oluşturulur. Metal kontak olarak farklı iş fonksiyonuna sahip Au, Ag, In, Cu gibi metaller kullanılır. İş fonksiyonu, materyalden bir elektron koparabilmek için gerekli olan minimum enerji miktarıdır [40,41]. Başlangıçta metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonları eşit değildir. Kontak yapıldığında, serbest taşıyıcılar bir denge koşulu kuruluncaya kadar bir materyalden diğerine geçerler. Bu elektrot ve yarıiletken arasındaki yük geçişi Fermi seviyeleri eşit oluncaya kadar devam eder. Böyle bir yük akışı ara yüzeyin bir kısmı üzerinde pozitif uzay yükleri ve diğer kısmı üzerinde ise negatif uzay yüklerinin birikmesine neden olur.

Metal/yarıiletken/metal yapılar da materyalin akım-voltaj karakteristikleri incelenerek elektriksel iletim mekanizmaları belirlenebilmektedir. Belirlenen iletkenlik mekanizmasına bağılı olarak yarıiletkenin iletkenliğı, taşıyıcı yoğunluğu, mobilitesi, tuzak enerji seviyesi, tuzak yoğunluğu bulunabilmektedir.

Metal/yarıiletken/metal yapılarında gerilim altında, kontak ara yüzeyinde, metalden yarıiletkene veya yarıiletkenden metale taşıyıcı geçişi sağlanabiliyorsa bu tip kontak omik kontak olarak adlandırılır.

### 2.1.1. Omik Kontak

Bir metal-yarıiletken kantağın omik olabilmesi için kontak direncinin ihmal edilebilecek kadar küçük olması gerekmektedir. Böylece omik kontak serbest taşıyıcı geçişine engel olmayacaktır. Bu tip kontaklar yarıiletkenin tipine göre oluşturulmaktadır. Metal- (n-tipi) yarıiletken omik kontak için  $\phi_S > \phi_M$ ; Metal- (p-tipi) yarıiletken omik kontak için  $\phi_S < \phi_M$  dir.



**Şekil 2.3:** Enerji -bant diyagramları (a) n-tipi yarıiletken-metal (b) n-tipi yarıiletken- metal omik kontak (c) ileri bias (d) geri bias (e) p-tipi yarıiletken-metal (f) p-tipi yarıiletken- metal omik kontak (g) ileri bias (h) geri bias.

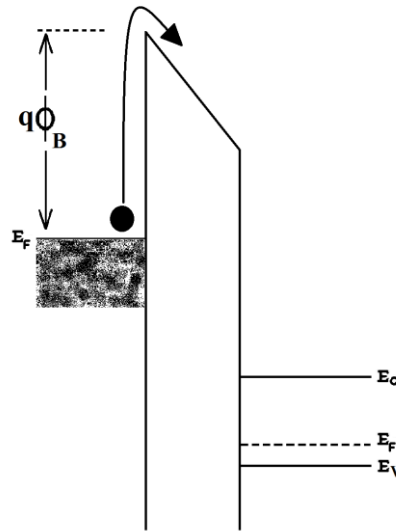
İki materyal arasındaki mesafe elektronların metalden yarıiletkene ya da yarıiletkenden metale geçmesine izin verecek kadar azaltılırsa metalden yarıiletkene (yarıiletkenden metale) elektron akışı meydana gelir. Metalden yarıiletkene geçişte yarıiletken tarafında elektron yoğunluğunun büyük olduğu bir yığılma bölgesi oluşur. Metal tarafında ise elektronların bıraktığı boşluklardan dolayı pozitif yük bölgesi oluşur. Böylece yarıiletkenin ihtiyacı olan yük kolayca sağlanmış olacaktır. Omik kontak serbest taşıyıcılar için bir engel oluşturmaz ve taşıyıcılar uygulanan voltajın belli bir değerine kadar Ohm Yasasına uyarlar.

## 2.2. METAL/YARIİLETKEN/METAL YAPILARDA İLETKENLİK MEKANİZMALARI

Bu yapılarda iletim çoğunluk taşıyıcılarına bağlı olup gözlenen iletim mekanizmaları; 1) Termiyonik emisyon, 2) Schottky emisyonu, 3) Poole-Frenkel emisyonu, 4) Uzay yükü sınırlayan akımlar (SCLC) dır.

### 2.2.1. Termiyonik Emisyon

Termiyonik Emisyon modeli H. Bethe tarafından ileri sürülmüştür. Bu modele göre akım akışı yalnızca engel yüksekliğine bağlıdır. Yeterince yüksek sıcaklıklarda, metalde, Fermi enerjisine yakın enerjiye sahip elektronların bazılarının potansiyel engelini aşmaları mümkün olur. Bunun için elektron hızının yüzeye dik olması lazımdır.



Şekil 2.4: Termiyonik emisyon.

T sıcaklığında, metalin birim hacminde, enerjileri E ile E+dE arasında olan elektronların sayısı;

$$dn = n(E)dE = f_e G(E)dE \quad (2.6)$$

ile verilir. Buradaki G(E) durum yoğunluğu ifadesi;

$$G(E) = \frac{dN}{dE} = \frac{v}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2}\right)^{3/2} E^{1/2} \quad (2.7)$$

şeklindedir. O halde  $E - E_F \gg k_B T$  durumu için Maxwell-Boltzman istatistiğine göre elektron sayısı;

$$n(E)dE = \frac{1}{e^{E-E_F/k_B T}} \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2}\right)^{3/2} E^{1/2} dE \quad (2.8)$$

olarak ifade edilir.

Ayrıca;  $E = \frac{1}{2}mv^2$  bağıntısından elde edilen  $dE = mv dv$  ifadesi (2.8) eşitliğinde yerine yazılırsa;

$$n(v)dv = \frac{8\pi}{e^{(\frac{1}{2}mv^2 - E_F)/k_B T}} \frac{1}{2\pi^2} \frac{m^3}{\hbar^3} v^2 dv \quad (2.9)$$

halini alır. Bu ifade hızları v ile v + dv arasında bulunan elektronların sayısının hız cinsinden gösterimidir. Hız bileşenlerini dikkate alarak;

$$n(v_x + v_y + v_z)dv_x dv_y dv_z = \frac{dv_x dv_y dv_z}{4\pi v^2 dv} \quad (2.10)$$

dönüşümü ile ifade bileşenlerine ayrılır. x eksenine dik olan birim yüzeyden birim zamanda geçen elektron sayısını göz önüne alalım. Burada  $v_x$  ve  $v_y$  hızları  $-\infty$  ile  $+\infty$  arasında her değeri alabilir ve x-doğrultusunda yüzeyden çıkan elektronların sayısını etkilemezler. O halde x-doğrultusundaki akım yoğunluğu;

$$J_x = e \iiint n v_x dv_x dv_y dv_z \quad (2.11)$$

şeklindedir.  $V_0$  , başlangıç anındaki besleme olmadığı durum için potansiyel değeri olmak üzere, o andaki kinetik enerjinin değeri;

$$\frac{1}{2} m v_{0x}^2 = e V_0$$

ile verilir. Bu ifade eşitlik (2.11) da yerine yazılırsa akım yoğunluğu;

$$J_x = \frac{2m^3}{\hbar^3} e^{E_F/k_B T} \int_{v_x}^{+\infty} v_x e^{-\frac{m v_x^2}{2k_B T}} dv_x \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{m v_y^2}{2k_B T}} dv_y \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{m v_z^2}{2k_B T}} dv_z \quad (2.12)$$

olur. Denklem (2.12) için integraller uygun dönüşümle çözülür ve düzenlemeler yapılırsa;

$$J_x = \frac{4\pi e m k_B^2}{h^3} T^2 e^{(E_F - eV_0)/k_B T} = A^* T^2 e^{-\phi_B/k_B T}$$

bağıntısı elde edilir [40]. Bu ifade Termoyonik Emisyon için Richardson-Dushman denklemi olarak bilinmektedir. Bu bağıntıdaki  $\phi_B$  engel yüksekliği ve

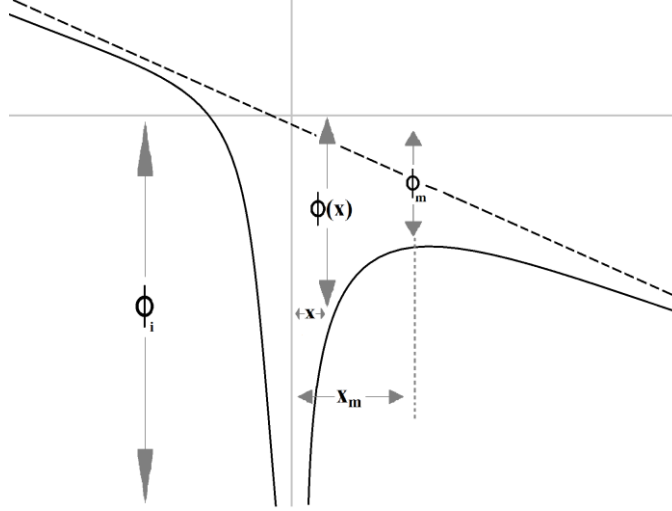
$$A^* = \frac{4\pi e m k_B^2}{h^3} \quad (2.13)$$

Richardson sabiti olarak adlandırılır ve değeri  $120 \frac{\text{Amper}}{\text{cm}^2 \text{C}^2}$  dir.

### 2.2.2 Schottky Emisyonu

Schootky emisyonu ilk olarak 1874'te F. Braun tarafından metal-yarıiletken bileşimlerinde gözlenmiştir. Sıcaklık ve elektrik alan şiddeti elektron salınımını meydana getiren parametrelerdir. Metal/yarıiletken/metal yapıya bir dış elektrik alan uygulandığında, bu alanın etkisiyle engel yüksekliğinde azalma meydana gelir (Şekil 2.5). Metaldeki elektronlar bu azalmadan yararlanarak, ısı aktivasyonu ile engeli aşır

doğrudan yarıiletkenin iletkenlik bandına geçerler ve akım akışını sağlarlar. Bu olay Schottky emisyonu olarak bilinir [42].



Şekil 2.5: Schottky emisyonunda bariyer durumu.

Bariyer yüksekliğinde azalma olduğu durum için potansiyel;

$$\phi(x) = -\frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{e^2}{x} - eEx \quad (2.14)$$

ifadesiyle verilir. Belirli bir  $x_m$  uzaklığı için potansiyel enerji  $eV_m$  maksimum değerini alır. Dolayısıyla maksimum değeri bulmak için (2.14) numaralı ifadenin türevi alınıp gerekli düzenlemeler yapılırsa;

$$\frac{d\phi}{dx} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{e^2}{x^2} - eE = 0 \quad \Rightarrow \quad x = \left( \frac{e}{4\pi\epsilon\epsilon_0 E} \right)^{1/2} \quad (2.15)$$

olur. Böylece

$$\phi_{\max} = -e\phi_B - e\beta_{SC} E^{1/2}$$

şeklinde yazabiliriz. Buradan akım yoğunluğu;



$$J = AT^2 \exp \left[ \frac{e(\beta_{SC}E^{1/2} - \phi_B)}{k_B T} \right] \quad (2.16)$$

olarak elde edilir. Bu ifadedeki  $\beta_{SC}$ , Schottky mekanizma katsayısı;

$$\beta_{SC} = \left[ \frac{e}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \right]^{1/2} \quad (2.17)$$

şeklindedir. Burada  $\epsilon_0$ , serbest uzayın permitivitesini göstermektedir.

### 2.2.3. Poole-Frenkel Emisyonu

1938'de Y. Frenkel tarafından öne sürülmüştür. Bu olayda metal-yarıiletken-metal yapılara dışarıdan bir gerilim uygulandığında oluşan elektrik alanın etkisiyle elektronlar, Coulomb potansiyel engelindeki azalma ile birlikte tuzak seviyelerinden yarıiletkenin iletim bandına ısıl olarak geçerler.

Poole-Frenkel ve Schottky salınımlarında, iletkenliğin uygulanan alanın kuvvetiyle fonksiyonel bağımlılığı aynıdır [42]. Dolayısıyla;

$$\phi_{\max} = -2e\beta_{SC}E^{1/2} = -e\beta_{PF}E^{1/2}$$

$$\beta_{PF} = 2\beta_{SC} = \left[ \frac{e}{\pi\epsilon\epsilon_0} \right]^{1/2} \quad (2.18)$$

şeklindedir. Pozitif yüklerin hareketsizliğinden dolayı Schottky emisyonuna göre iki kat daha büyüktür.

O halde akım yoğunluğu;

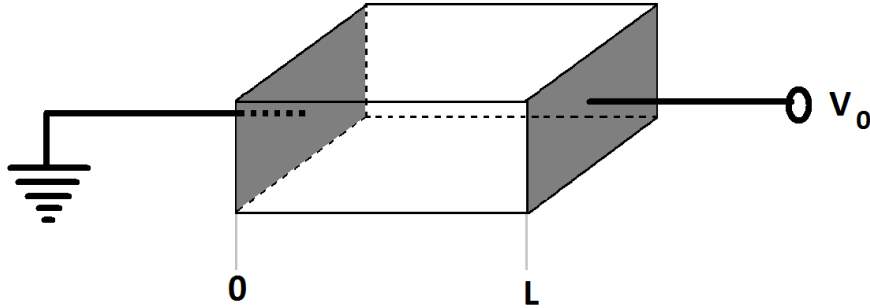
$$J = J_0 \exp \left[ \frac{e(\beta_{PF}E^{1/2} - \phi_B)}{k_B T} \right] \quad (2.19)$$

olur. Poole-Frenkel emisyonundaki tuzak pozitif olarak yüklenmiş olmalıdır. Böylece pozitif yüklü bir tuzak donör veya akseptör merkezleri olabilir.

Poole-Frenkel ve Schottky emisyonunda iletkenliğin uygulanan alanın kuvvetiyle fonksiyonel bağımlılığı lineerdir. Bu yüzden  $\ln J - V^{1/2}$  grafiğinin eğiminden  $\beta$  değeri elde edilebilir ve denklem (2.18)'deki teorik değerle karşılaştırılabilir. Karşılaştırma sonucu teorik olarak hesaplanan  $\beta_{SC}$  veya  $\beta_{PF}$  değerlerinin  $\beta$  değerine olan yakınlığı bize etkili olan iletim mekanizmasını söyler. Bu mekanizmalar yalıtkan oksitler, yarıiletkenler ve organik materyalleri içeren ince filmlerin birçok türünde gözlenmiştir.

#### 2.2.4. Uzak Yükü Sınırlayan Akımlar (SCLC)

SCLC denge yük konsantrasyonunun, sızan yük konsantrasyonu ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilir olduğunda oluşur. Elektronlar eğer yarıiletken içindeki kusurlar tarafından tuzaklanırsa SCLC dominanttır. Termal denge halinde tuzak seviyeleri Fermi ( $E_F$ ) seviyesine kadar doludur. Kontakın tamamlanması ile metalden sızan elektronlar Fermi seviyesini yükseltir. Uygulanan voltajın belirli bir değerine kadar tuzaklar dolar. Tuzaklar dolmaya başlayınca akım uzak yükü sınırlayan akımlar olur ve  $V^2$  kanununa uyar. Voltaj artırılmaya devam ettirilirse akımın ani olarak arttığı görülür. Bu, tuzakların dolduğunu işaret eder ve metal-yarıiletken sınırındaki potansiyel engeli düşük ise sızan elektronların hepsi iletkenlik bandından akar.



Şekil 2.6: L uzunluğundaki bir yarı iletkene tabakalar boyunca alan uygulanması.

İletkenlik bir omik kontakta sızan ve diğerinden çıkan elektronlarla olsun.

$$J = J_d + J_s = eD_n \frac{dn}{dx} + en\mu_n E \quad (2.20)$$

Omik kontakta yapıya giren yüklerle elektrik alan arasındaki bağıntı Poisson Denklemi ile verilir.

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon\epsilon_0} = -\frac{ne}{\epsilon\epsilon_0} \quad (2.21)$$

Kristal boyunca taşıyıcı yoğunluğunun değişmediğini kabul edersek; eşitlik (2.20) deki  $(eD_n \frac{dn}{dx})$  ifadesi ihmal edilebilir. Böylece;

$$J = en\mu_n E \quad \Rightarrow \quad ne = \frac{J}{\mu_n E} \quad \text{olur.}$$

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \frac{J}{\mu_n E}$$

$$\int_0^E E dE = -\int_0^x \frac{J}{\epsilon\epsilon_0 \mu_n} dx$$

$$E = \left( \frac{-2J}{\epsilon\epsilon_0 \mu_n} x \right)^{1/2} \quad (2.22)$$

Ayrıca;

$$V_L = -\int_0^L E(x) dx \quad (2.23)$$

şeklinde olduğundan eşitlik (2.22), eşitlik (2.23) de yerine yazılıp düzenlenirse;

$$V_L = -\int_0^L \left( \frac{-2J}{\epsilon\epsilon_0 \mu_n} \right)^{1/2} x^{1/2} dx$$

$$V_L^2 = -\frac{4}{9} \left( \frac{-2J}{\epsilon\epsilon_0\mu_n} \right) L^3 \quad \Rightarrow \quad J = -\frac{9}{8} \epsilon\epsilon_0\mu_n \frac{V_L^2}{L^3} \quad (2.24)$$

tek taşıyıcı hali için akım yoğunluğu ifadesi elde edilir.

Omik kontakta yapıya giren taşıyıcı yoğunluğu, kristalin taşıyıcı yoğunluğundan küçük ise akım Ohm Kanununa uyar.

Denklem (2.20) ile denklem (2.24)' ün eşitliğinden,

$$J_{SCLC} = en\mu_n \frac{V_{tr}}{d} = -\frac{9}{8} \epsilon\epsilon_0\mu_n \frac{V_{tr}^2}{d^3} \quad (2.25)$$

Eşitlik (2.24) deki  $V_{tr}$  Kare Kanununa geçiş voltajıdır ve;

$$V_{tr} = \frac{8}{9} \frac{en_0 d_0^3}{\epsilon\epsilon_0} \quad (2.26)$$

şeklinde ifade edilir.

Bir kristalde kusurlar sebebiyle boş enerji seviyeleri ortaya çıkar. Bu seviyeler iletkenlik bandının altında olduğundan akım taşıyıcıları için tuzak olarak davranırlar. Bu tuzaklar tarafından taşıyıcıların yakalanması akımı azaltır. Ancak Fermi seviyesinin altında olan tuzaklar dolu olduğundan iletme katkıları olmaz.

Fermi enerji seviyesi üzerinde bulunan tuzaklara sığ tuzaklar denir ve bunlar boş olacağından akımın azalmasına neden olurlar. Sığ tuzaklar varlığında;

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{ne}{\epsilon\epsilon_0} \quad \Rightarrow \quad \frac{dE}{dx} = -\frac{ne}{\epsilon\epsilon_0} \left( 1 + \frac{n_t}{n} \right)$$

$E_t$ ,  $k_B T$  yanında yeteri kadar büyükse tuzaklar etkindir.

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{ne}{\epsilon\epsilon_0\theta}$$

şeklindedir. Buradaki  $\theta$  ifadesi;

$$\theta = \frac{n}{n+n_t}$$

şeklindedir. O halde tuzakların varlığında akım yoğunluğu;

$$J = -\frac{9}{8} \epsilon \epsilon_0 \mu_n \theta \frac{V_L^2}{L^3} \quad (2.27)$$

şeklindedir ve Mott-Gurney Kanunu olarak bilinir.

Tuzak seviyelerinin exponansiyel dağılımına sahip n-tipi bir yarıiletken için SCLC akım-voltaj karakteristiği

$$J = e \mu_n N_c (\epsilon_r \epsilon_0 / e N_{t(e)})^l V^{l+1} / d^{2l+1} \quad (2.28)$$

ile verilir [43-45]. Burada  $N_c$ , iletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğu,  $N_t$ , exponansiyel dağılımda tuzak seviyelerinin toplam yoğunluğudur. Denklemden

$$l = T_t / T \quad \text{ve} \quad m = l + 1 \quad (2.29)$$

olmak üzere  $T_t$ , tuzak dağılımını karakterize eden sıcaklık parametresidir.

Exponansiyel tuzak dağılımı ise

$$N(E) = \frac{N_{t(e)}}{k_B T_t} \exp(-E/k_B T_t)$$

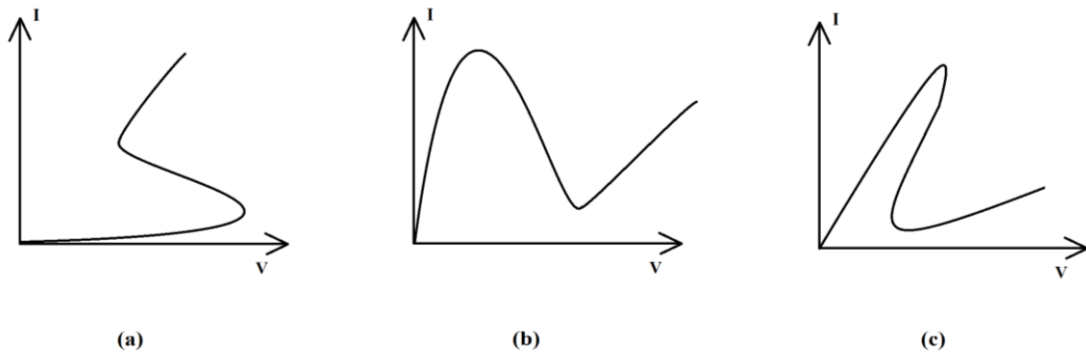
ile verilir. Burada  $N(E)$ , iletkenlik bandı seviyesinin E kadar aşağısındaki birim enerji bölgesi başına düşen tuzak yoğunluğudur.

Eğer tuzak dağılımı exponansiyel ise o zaman omik iletkenlik bölgesini tuzakların dolmaya başladığı bölge olan SCLC iletkenlik bölgesi izler.  $I \propto V^m$  şeklinde olur ve m

değeri  $1 < m \leq 2$  dir. Bu bölgeden sonra da tuzakların tamamen dolmasıyla  $m$ , 2 den daha büyük olacaktır.

### 2.3. ELEKTRİKSEL ANAHTARLAMA

Yarıiletkenler kuvvetli bir dış alanla, akım injeksiyonu ile veya aydınlatma ile termodinamik dengeden yeterince uzaklaştırıldıklarında, iletken olmayan ve iletken durumlar arasında anahtarlama, akım veya voltajın eşzamanlı osilasyonları gibi kararsızlıklar gösterebilirler. Yarıiletken malzemelerde elektriksel kararsızlıkların orjini, genellikle farklı fiziksel mekanizmaların sorumlu olabildiği negatif diferansiyel iletkenliğin (NDC) aslını araştırmaktır. Negatif diferansiyel iletkenlik I-V karakteristiklerinin sırasıyla N ve S harflerine benzemesine ilişkili olarak NNDC ve SNDC olarak sınıflandırılabilir. N tipi anahtarlama voltaj kontrollü negatif direnç (VCNR) ve S tipi anahtarlama da akım kontrollü negatif direnç (CCNR) olarak da adlandırılır. Ayrıca bir de bazı aygıtlarda gözlemlenen Z-tipi I-V karakteristiği de vardır (Şekil 2.7). Ancak bu N-tipi ile aynı fiziksel özellikleri gösterir [37,46-49]. NDR ve elektriksel anahtarlama etkisi, bilgi depolama, güç kontrol cihazları, osilatörler, termistörler gibi teknolojik uygulamalardan dolayı pek çok araştırmacının ilgisini çekmiştir [50,51].



Şekil 2.7: (a) S-tipi (b) N-tipi (c) Z-tipi.

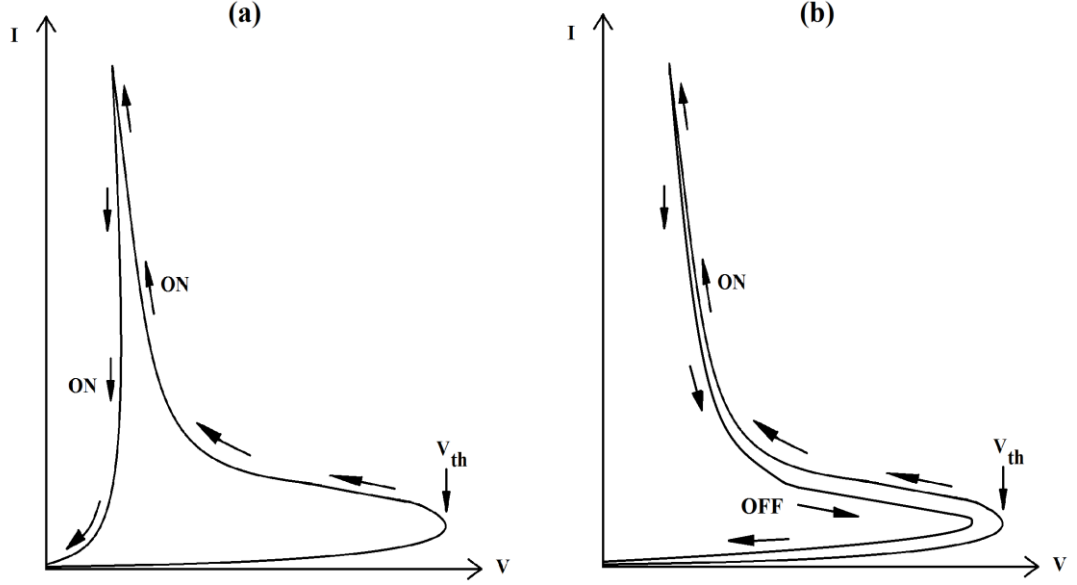
Anahtarlama olayı ilk yıllar Pearson ve Ovshinsky tarafından amorf kalkojenit materyallerde gözlenmiştir [3]. Bu keşif uluslararası bilimsel alanda epey bir harekete neden olmuş ve pek çok araştırmacıyı bu konuda çalışmaya teşvik etmiştir. Son yıllarda,

anahtarlama etkisi sadece amorf materyallerin bir karakteristiği olarak değil InTe, GaSe ve Ga<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> gibi A<sup>III</sup>B<sup>VI</sup> ikili yarıiletken bileşiklerde [52-54] ve TlGaTe<sub>2</sub>, TlInSe<sub>2</sub>, TlInTe<sub>2</sub> ve TlSbSe<sub>2</sub> gibi üçlü kalkojenit yarıiletken bileşiklerde de gözlenmiştir [33, 55-59]. Üçlü yarıiletken kalkojenitler teknoloji için ümit verici materyaller olup anahtarlama cihazları, hafıza bellekleri, fotovoltaiik cihazlar vs. olarak kullanılabilirler. Ayrıca TlGaTe<sub>2</sub>, TlInTe<sub>2</sub> gibi benzer bileşiklerin NDR bölgesinde kaotik osilasyonlar görülerek lineer olmayan dinamik metotlarla onların deterministik kaotik tabiatlı olduğu ispatlanmıştır [60-62].

Elektriksel anahtarlama (switching) dış bir elektrik alan tarafından pozitif eğimli I-V karakteristik bölgesi (yüksek rezistivite-OFF durumu) ile negatif eğimli (NDR) bölge (düşük rezistivite-ON durumu) arasında hızlı ve tersinir bir geçişir ve eşik (threshold) voltajı ile karakterize edilir. Elektriksel iletkenlik durumlar arasındaki tersinir anahtarlama pek çok uygulamanın temelinde önemli bir yere sahiptir. Örneğin amorf-kristal faz geçişinden dolayı kalkojenitlerde Joule ısısının neden olduğu iletkenlik durumuna anahtarlama, faz değişim rastgele erişimli bellek cihazlarının temelini oluşturur. Kompakt ve dijital video disklerin üzerine optiksel data yazma benzer işlemlere dayanır. Tek ve poli-kristal kalkojenitler faz değişimsiz eşik voltajda omik ve NDR durumu arasında başka bir tip anahtarlama gösterirler. Bu tip anahtarlama, yani faz değişimli memory anahtarlama farklı olarak sisteme azalan akımla OFF durumuna geri dönmeye izin veren threshold anahtarlama, ultra hızlı ve düşük-güç uygulamaları için çekici yapmaktadır [60]. Threshold voltajının neden kaynaklandığı önemlidir [63]. Elektriksel anahtarlama olayını açıklamak için elektronik, elektro-termal ve termal mekanizmalar olmak üzere farklı mekanizmalar önerilmiştir. Eğer ON-durumu ısınmadan dolayı meydana geliyorsa anahtarlama termaldir. Eğer taşıyıcı konsantrasyonu veya mobilite veya her ikisinin birden denge durumundan sapması söz konusu ise anahtarlama elektronik temellidir [64,71,72]

Threshold anahtarlama; Elektronik orjinli olup, akım azaldığında OFF durumuna geri döner [73]. Elektronik model elektrotlardaki taşıyıcı injeksiyonuna dayanır. Alanla oluşturulan yük taşıyıcıları yüklü tuzakların dolmasına sebep olur. Tüm tuzaklar dolduğunda yükselen mobilite ile taşıyıcılar örneği geçebilirler [4,65] Elektronik işlemlerde, ON durumu dengede olmayan çoğunluk taşıyıcıların ve/veya onların

mobilitelerinin artmasından dolayı NDR' in gözlenmesiyle ilişkilidir. Gunn efekt, tünelleme, taşıyıcı injeksiyonu gibi mekanizmalar NDR' in gözlenmesine neden olan olaylardır. Elektronik orjin NDR bölgesinde örnek sıcaklığının artması ile doğrudan ilişkili değildir.



Şekil 2.8: (a) Memory anahtarlama, (b) Threshold Anahtarlama.

Memory anahtarlama; Termal orjinli olup, akım sıfıra düşse bile ON durumunda kalır. Düşük ve orta elektrik alanlarda voltaj  $V = V_{th}$  (eşik voltajı-threshold voltaj) kritik değerine ulaştığında sıcaklık Joule Isısının etkisiyle  $T = T_t$  (geçiş sıcaklığı-transition temperature) değerine kadar yükseldiğinde malzeme OFF durumundan ON durumuna geçer. Uygulanan voltaj bir eşik (threshold) değere yaklaştığında örnek sıcaklığı çevre sıcaklığından daha yüksek olduğunda örneğin direnci hızla azalır [37,65]. Memory anahtarlama özelliği gösteren pek çok yapı günümüz teknolojisinde yeri önemli olan NVD ( Nonvolatile memory) ve DRAM ( dynamic-random-access memory) cihazlar için önerilmektedir [66-70].

#### 2.4. AKIMIN SICAKLIKLA DEĞİŞİMİ VE AKTİVASYON ENERJİSİ

1889 yılında S. Arrhenius, kimyasal bir reaksiyonun olabilmesi için çarpışan moleküllerin minimum bir kinetik enerjiye sahip olması gerektiğini ileri sürmüştür. Bu minimum enerji aktivasyon enerjisi olarak bilinmektedir [74].



Arrhenius kimyasal reaksiyonun hız sabitlerinin sıcaklıkla değişimini

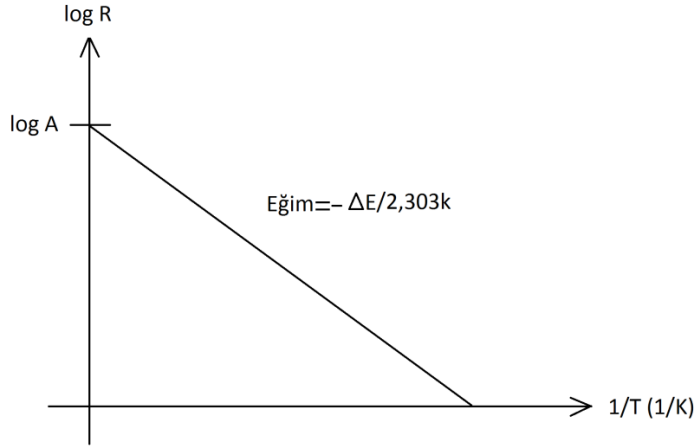
$$R = Ae^{-\Delta E/k_B T} \quad (2.30)$$

şeklinde ifade etmiştir. Burada A; sıcaklıktan bağımsız bir sabit,  $k_B$ ; Boltzmann sabiti ve  $\Delta E$  ise aktivasyon enerjisidir. Bu bağıntının her iki tarafının logaritması alınırsa;

$$\log R = \log A - \frac{\Delta E}{2,303k_B T} \quad (2.31)$$

ifadeleri elde edilir.

Bu denklem  $y = mx+b$  şeklinde bir doğru denklemdir. Buna göre  $\log R-1/T$  grafiği düz bir doğru olacaktır (Şekil 2.9).



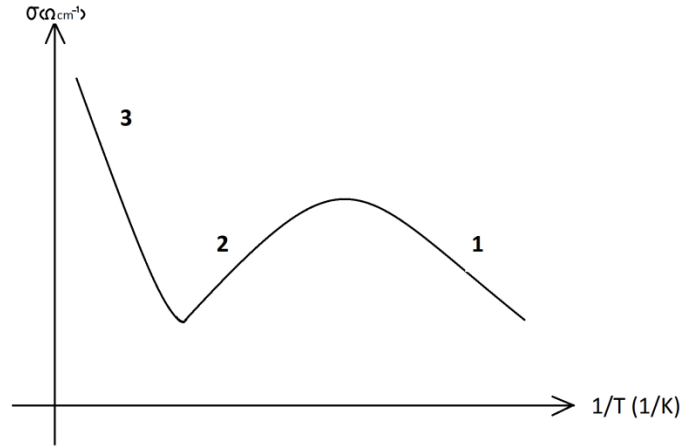
Şekil 2.9:  $(1/T)$ ' ye karşı  $\log R$ 'nin değişimi.

Şekildeki doğrunun eğiminden ve

$$\text{Eğim} = -\frac{\Delta E}{2,303k_B}$$

ifadesi kullanılarak  $\Delta E$  aktivasyon enerjisi bulunabilir.

Genel olarak iletkenliğin sıcaklıkla olan değişimi Şekil 2.10' da verilmiştir.



**Şekil 2.10:** İletkenliğin sıcaklıkla değişimi.

Şekil 2.10'da 1. bölgede sıcaklık düşük olduğundan taşıyıcılar donör enerji seviyelerinden iletkenlik bandına veya valans bandından akseptör enerji seviyelerine geçerler. İletkenlikteki bu artış katkı atomlarından kaynaklandığından katkılı ( extrinsic) bölge olarak adlandırılır. 2. bölgede sıcaklık arttığı için fonon sayısı artacak ve mobilite düşeceğinden iletkenlik bir miktar azalacaktır. 3. bölgede sıcaklığın artmasıyla yeterli ısı enerjisi nedeni ile daha çok sayıda taşıyıcı valans bandından iletkenlik bandına geçecektir. Katkı atomları taşıyıcı yoğunluğunda bir artışa neden olmadığından bu bölge asal ( intrinsic) bölge olarak adlandırılır [39,46].

Elektriksel iletkenlik  $\sigma$ , akım yoğunluğu  $J$ , dolayısıyla akım ile doğru orantılı olduğundan akımın sıcaklıkla olan ilişkisi

$$I = I_0 \exp(-\Delta E/k_B T)$$

ifadesi ile verilir. Bu ifadeye göre  $\log I - 1/T$  grafiğinin eğiminden iletkenlik için aktivasyon enerjisi bulunabilir.

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

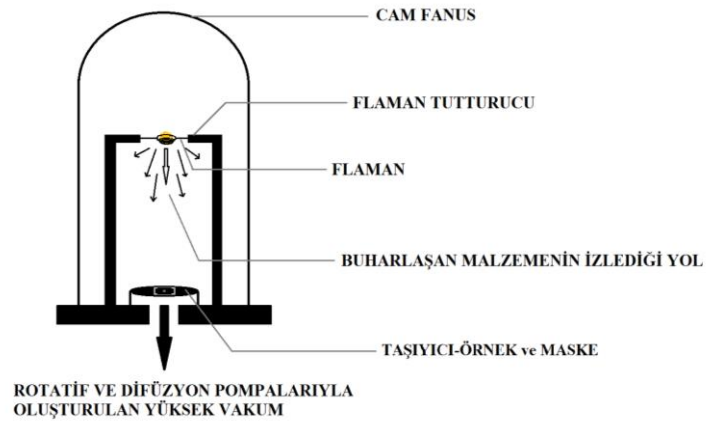
#### 3.1. ÖRNEKLERİN ÖLÇÜME UYGUN HALE GETİRİLMESİ

##### 3.1.1. Malzemenin Hazırlanması

Bu çalışmada M. Özer ve grubu tarafından Bridgman-Stockbarger büyütme yöntemi kullanılarak hazırlanmış olan  $TlSbSe_2$  kristalleri kullanıldı. Kristallerin hazırlanması sırasında % 99,999 saflıkta Tl, Se ve Sb elementleri uygun miktarlarda karıştırılarak  $\sim 10^{-5}$  Torr basınçta kuvars tüp içine kapatılıp fırına dik olarak yerleştirilmiştir. Malzemenin erime sıcaklığına kadar ısıtılan tüp, bu sıcaklıkta 48 saat bekletilmiş, ardından  $1,5 \text{ Ksa}^{-1}$  hızla oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Böylece tabakalı  $TlSbSe_2$  kristalleri elde edilmiştir [29].

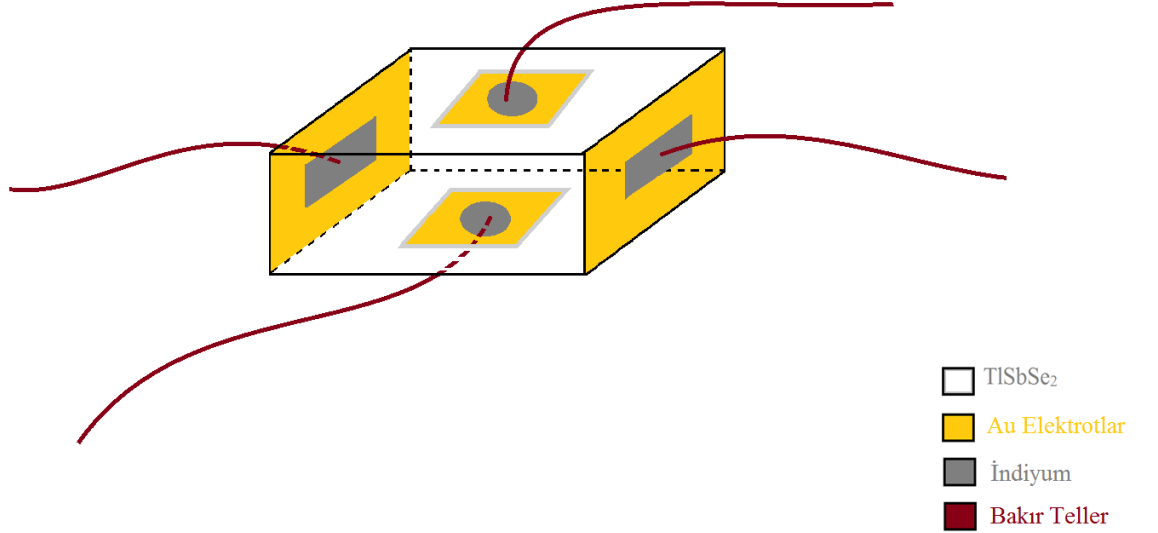
##### 3.1.2. Kontakların Hazırlanması

Elektrotlar, dikdörtgenler prizması şeklinde kesilerek elde edilen kristal örnekleri üzerinde, dik veya paralel kontaklar hazırlanabilmesi için uygun maskeler kullanılarak, termal buharlaştırma yöntemiyle oluşturuldu.



Şekil 3.1: Vakum Sistemi.

Buharlaştırma işlemi rotatif ve difüzyon pompalardan oluşan Edwards Model 6E vakum ünitelerinde  $\sim 10^{-5}$  Torr vakum altında gerçekleştirildi. Buharlaştırma için, % 99,999 saflıkta Au ve Mo sepet flaman kullanıldı. İşlem sonucunda  $\sim 3000$  Å kalınlığında altın elektrotlar elde edildi.

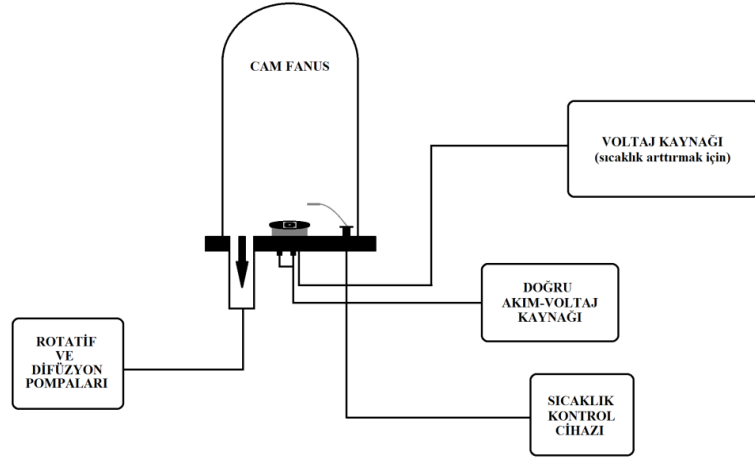


Şekil 3.2: Tabakalara paralel ve dik hazırlanan kontaklar.

Au elektrotlar üzerine indiyum (In) yardımıyla bakır (Cu) teller tutturularak kontaklar ölçüm alma işlemi için hazır hale getirildi (Şekil 3.2).

### 3.2. ÖLÇÜM AŞAMASI

Hazırlanan örneklerin elektriksel ölçümleri  $\sim 10^{-5}$  Torr vakum altında Itron 32 model sıcaklık kontrol cihazıyla 233-373 K sıcaklık aralığında uygun seri direnç seçimi ile gerçekleştirildi. DC voltaj kaynağı ve akımölçer olarak Keithley 2410-C model cihaz kullanıldı ve 1-1000 Volt aralığında gerilim uygulandı.



Şekil 3.3: Deney seti.

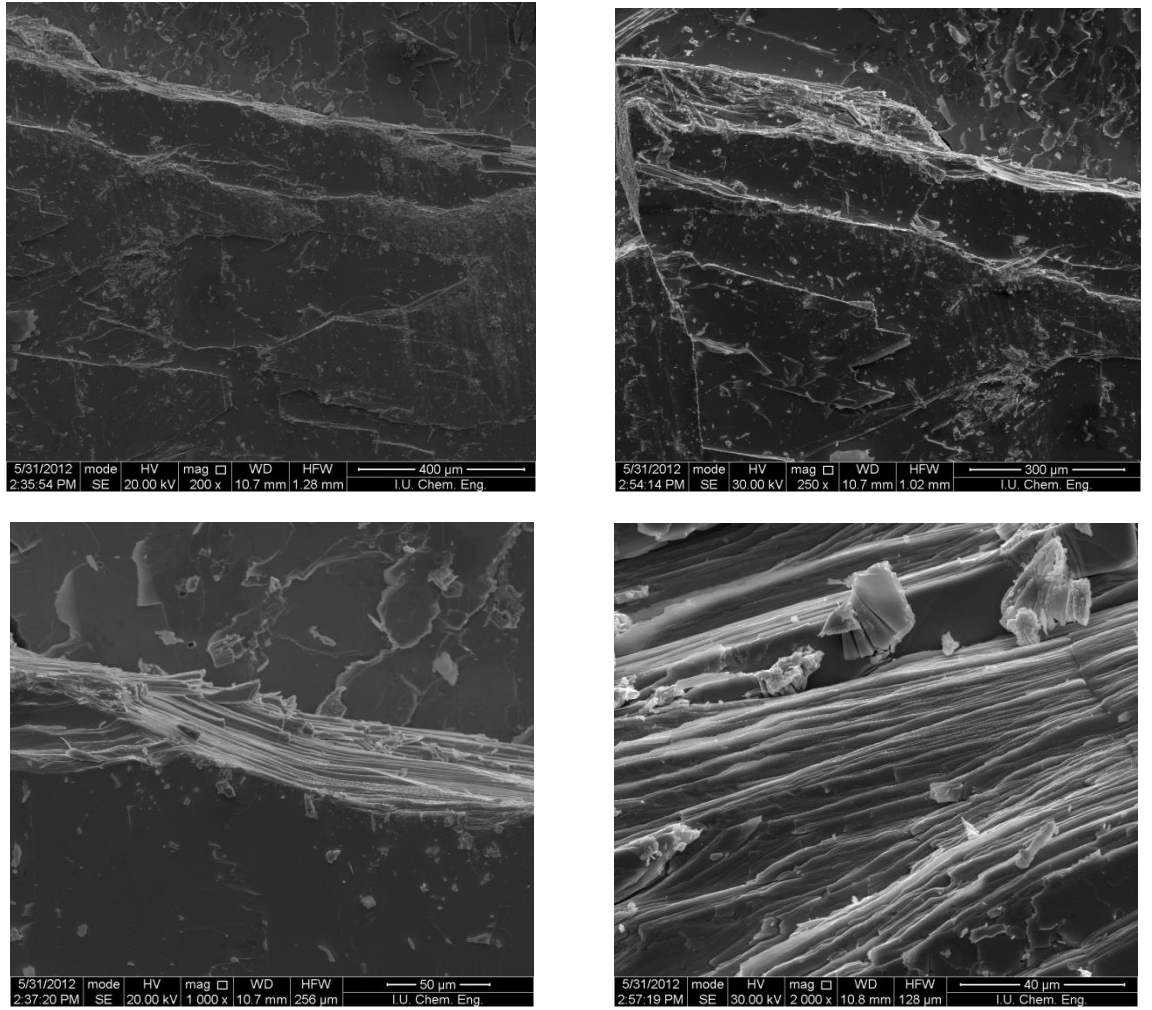
### Ölçüm Aralıkları

- ✓ *Sıcaklık* : 233-373 K
- ✓ *Gerilim* : 1-1000 Volt
- ✓ *Boyut* : **Tabakalara paralel elektrotlu örnek:** 3,3×1,9×0,15 mm  
**Tabakalara dik elektrotlu örnek** : 4,6×3,4×0,3 mm  
**Anizotropi örneği** : 4×2,5×0,25 mm
- ✓ *Elektrot yüzey alanı* : **Tabakalara paralel elektrotlu örnek:**  $1,71 \times 10^{-6} \text{ m}^2$   
**Tabakalara dik elektrotlu örnek** :  $3,06 \times 10^{-6} \text{ m}^2$   
**Anizotropi örneği-paralel** :  $0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$   
**Anizotropi örneği-dik** :  $2,08 \times 10^{-6} \text{ m}^2$

## 4. BULGULAR

### 4.1. İLETKENLİK VE ELEKTRİKSEL ANİZOTROPİ

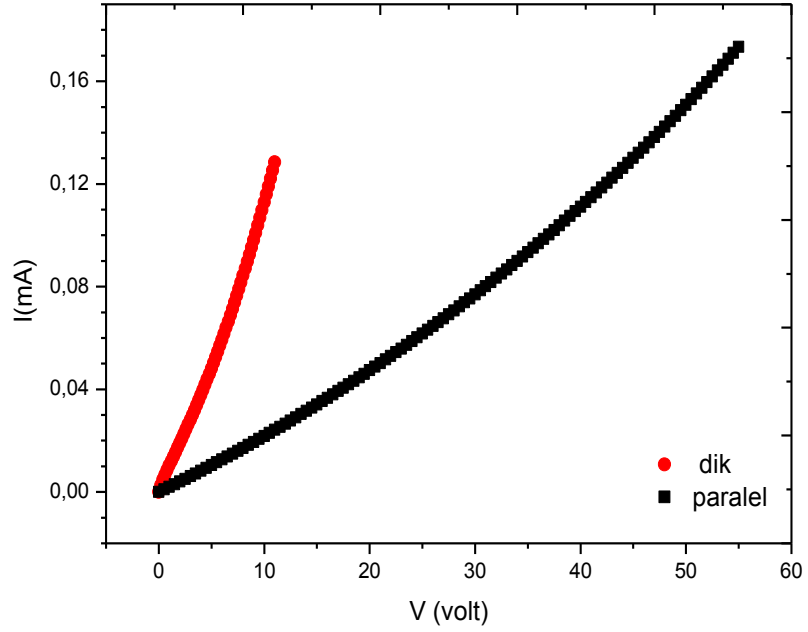
TlSbSe<sub>2</sub> kristallerinin morfolojisi İstanbul Üniversitesi Kimya Mühendisliği bölümünde Araş. Gör. Vedat Sarıboğa tarafından Jeol-6335F model Scanning Electron Microscope (SEM) ile incelenmiştir (Şekil 4.1). Bu incelemeler sonucunda malzemenin tabaka yapılı olduğu görülmüştür.



Şekil 4.1: TlSbSe<sub>2</sub> kristallerinin SEM görüntüleri.

Elektriksel anizotropi faktörünün belirlenebilmesi için, aynı örnek üzerinde hem tabakalara dik, hem de paralel olan In kontaklar hazırlandı. 233-353 K arası 5 K aralıklarla, 0-60 Volt arası voltaj uygulanarak I-V ölçümleri yapıldı.

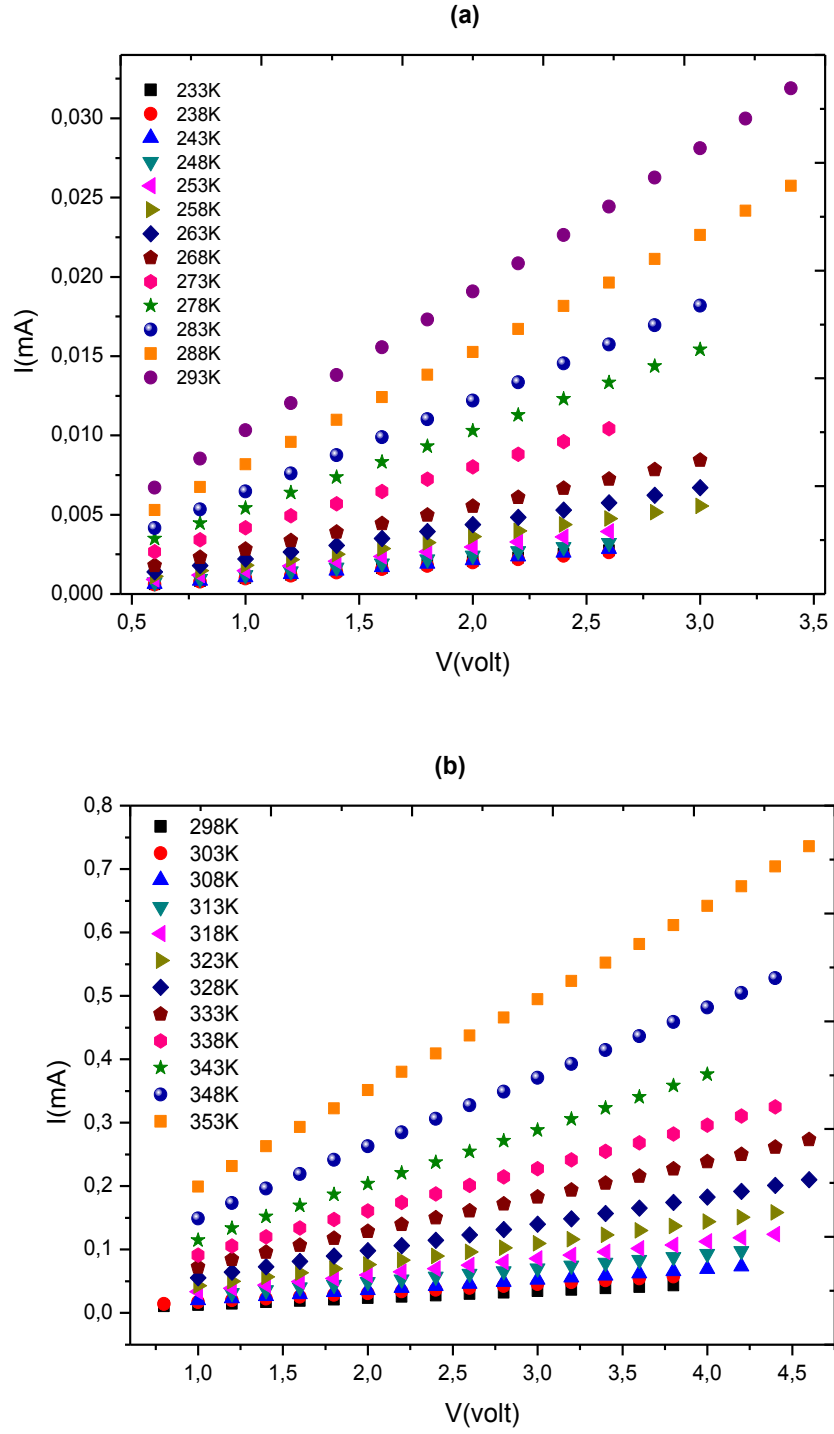
I-V grafiklerine bakıldığında her iki kontak durumu için ölçümlerin aynı davranışı sergilemelerine rağmen değerlerinde farklılık gösterdikleri gözlemlendi (Şekil 4.2).



**Şekil 4.2:** 293 K'de tabakalara dik ve paralel kontakla yapılan I-V ölçümleri.

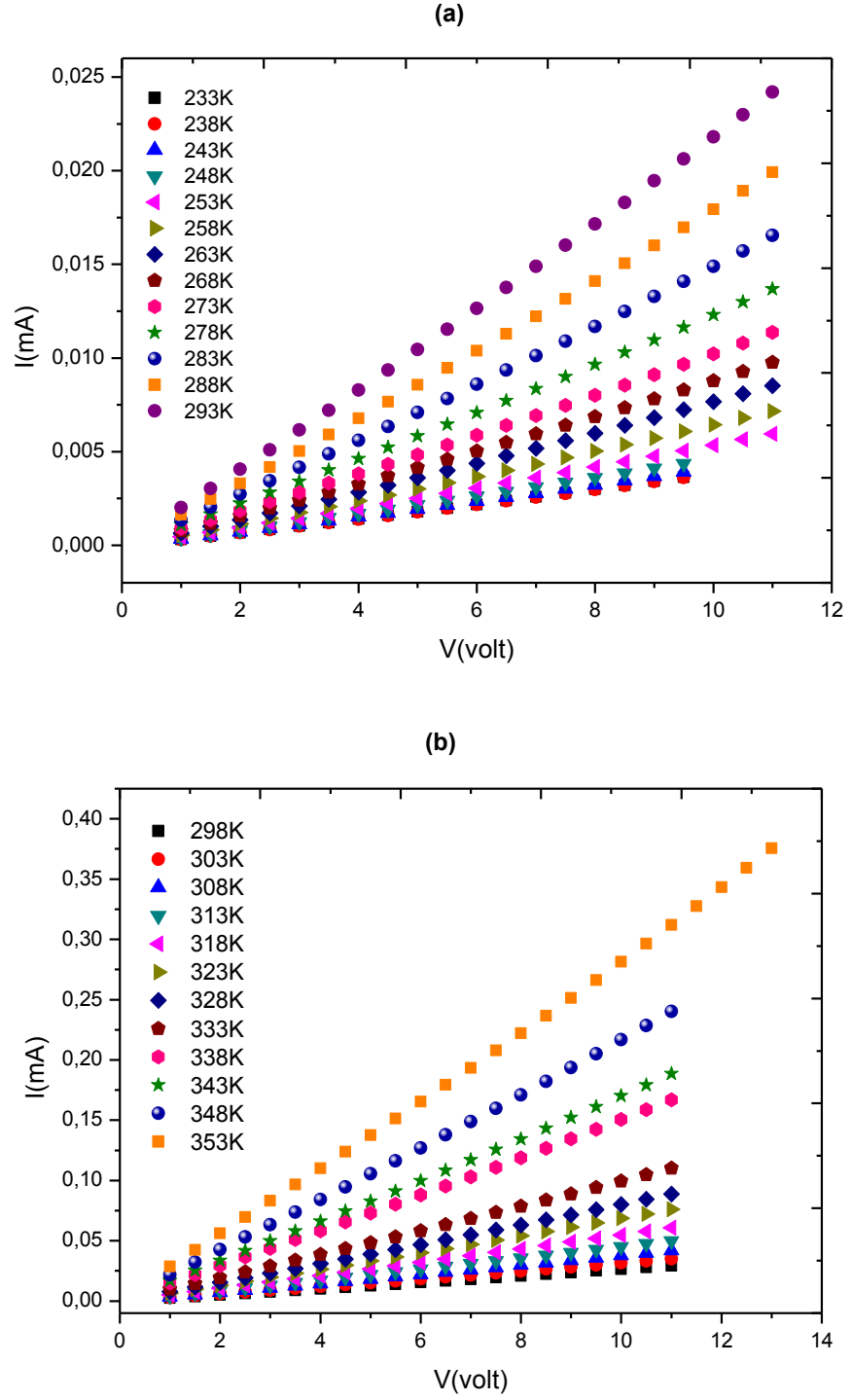
log I-log V grafiklerinin eğimlerinden faydalanarak omik bölgeler belirlendi.

- Tabakalara dik kontakla alınan ölçümlerde ~4,5 Volt ve paralel kontakla alınan ölçümlerde ~11 Volt değerlerine kadar (eğimin 1 olduğu) davranışın omik olduğu gözlemlendi (Şekil 4.3 ve 4.4).



**Şekil 4.3:** (a) Tabakalara dik kontaklı ölçüm için 233 - 293 K sıcaklık aralığında omik bölge (b) Tabakalara dik kontaklı ölçüm için 298 - 353 K sıcaklık aralığında omik bölge.

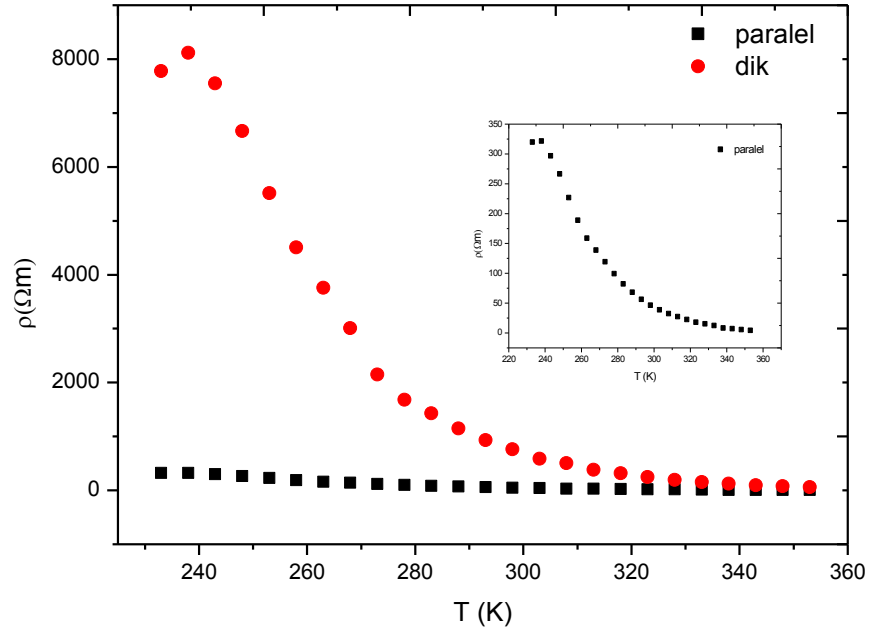




**Şekil 4.4:** (a) Tabakalara paralel kontaklı ölçüm için 233-293 K sıcaklık aralığında omik bölge (b) Tabakalara paralel kontaklı ölçüm için 298-353 K sıcaklık aralığında omik bölge.

I-V grafiklerinin Omik bölge eğimlerinden faydalanarak örneğin direnç ve öz direnç değerleri hesaplandı. Bu hesaplamalardan yola çıkarak oluşturulan öz direnç-sıcaklık grafiği incelendiğinde:

- Tüm sıcaklık değerlerinde tabakalara paralel kontaklarla yapılan ölçümlerden elde edilen öz direnç değerlerinin, tabakalara dik kontak için elde edilen değerlere göre daha düşük olduğu gözlemlendi.
- Öz direnç değerlerinin artan sıcaklıkla eksponansiyel olarak azaldığı görüldü (Şekil 4.5).



Şekil 4.5: Öz direncin sıcaklığa bağlı değişimi.

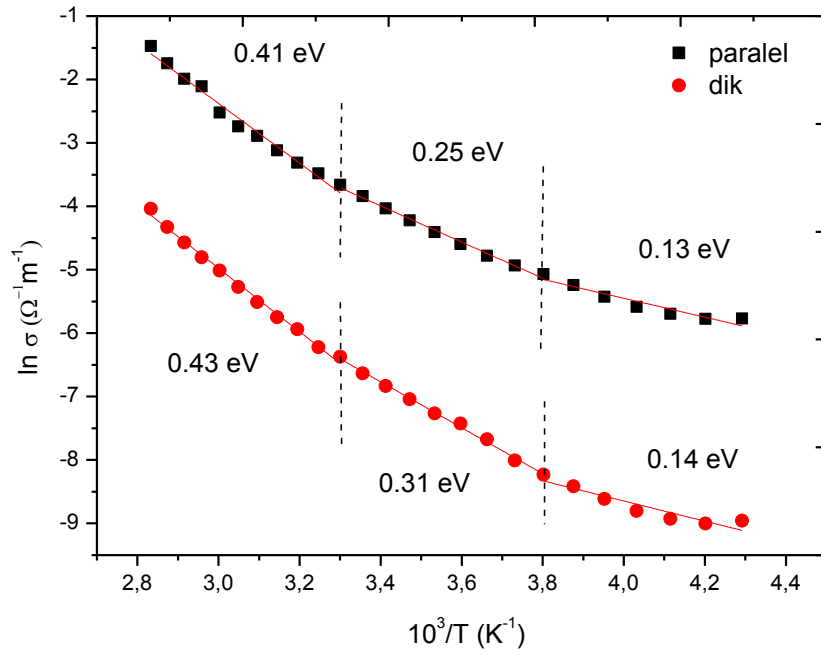
$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (4.1)$$

bağıntısından faydalanarak hesaplanan iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimini incelendi.

- İletkenlik değerinin her iki kontak durumu için artan sıcaklıkla arttığı görüldü.

- Tabakalara paralel kontakla yapılan ölçümlerdeki iletkenlik değerinin, dik kontakla yapılan ölçüm değerlerine göre daha yüksek olduğu gözlemlendi (Şekil 4.6).

Denklem (2.5) den yola çıkarak  $\ln \sigma - 10^3/T$  grafiğinin lineer bölge eğimlerinden elektriksel iletkenlik için aktivasyon enerjileri ( $\Delta E_\sigma$ ) hesaplandı (Şekil 4.6).



Şekil 4.6: İletkenliğin sıcaklıkla değişimi.

- Her iki kontak durumunda da aktivasyon enerjisi artan sıcaklıkla arttığı belirlendi (Tablo 4.1).

Tablo 4.1: TlSbSe<sub>2</sub> bileşiğinin üç bölgeye ait aktivasyon enerjileri.

Aktivasyon enerjisi Sıcaklık aralığı	$E_{\perp}$ (eV)	$E_{\parallel}$ (eV)
303 – 353 K	0,43	0,41
263 – 303 K	0,31	0,25
233 – 263 K	0,14	0,13

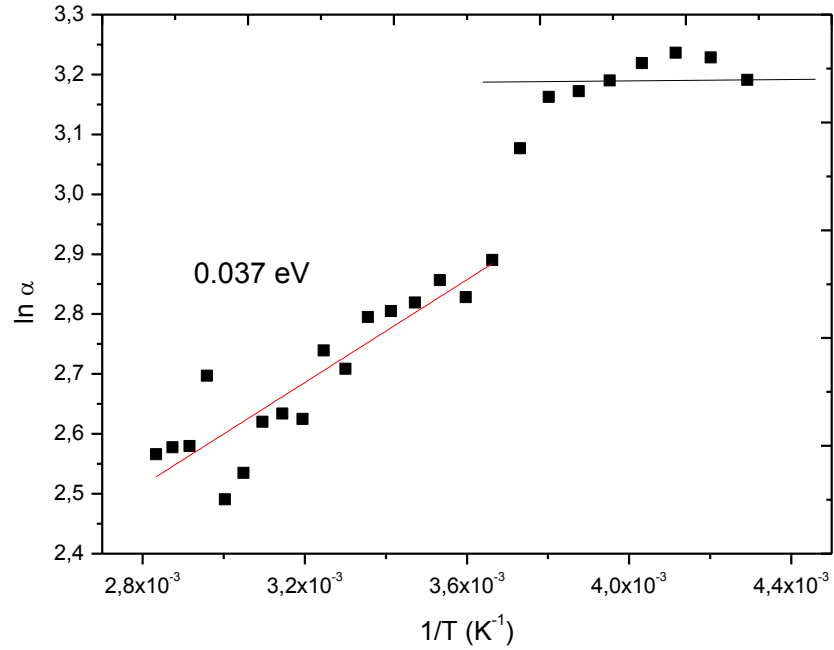
Elektriksel iletkenliğin tabakalar boyunca ve tabakalara karşı ( paralel ve dik ) değerleri arasındaki ilişkiyi belirleyen bir  $\alpha$  anizotropi faktörü bulunur. Bu faktör;

$$\alpha = \frac{\sigma_{\parallel}}{\sigma_{\perp}} \quad (4.2)$$

oranıyla belirlenir.

Bu bağıntıdan hareketle her sıcaklık için anizotropi faktörü değerleri hesaplandı.

- Düşük sıcaklık bölgelerinde anizotropi faktörünün yüksek ve neredeyse sıcaklıktan bağımsız olduğu ve artan sıcaklıkla bu değer lineer olarak azaldığı görüldü (Şekil 4.7).



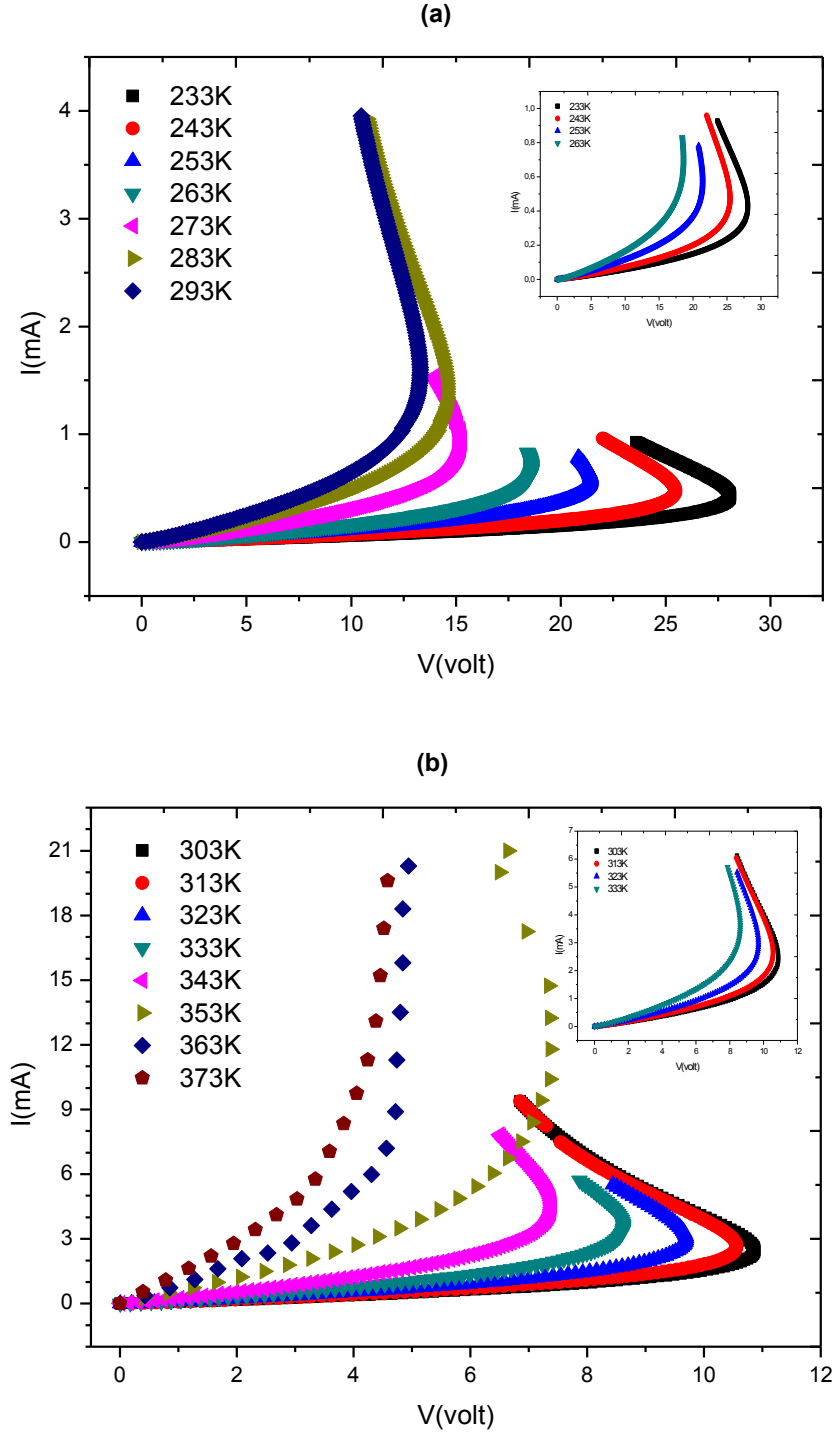
Şekil 4.7: Anizotropi faktörünün sıcaklıkla değişimi.

## 4.2. ANAHTARLAMA ÖNCESİ İLETKENLİK MEKANİZMA TAYİNİ

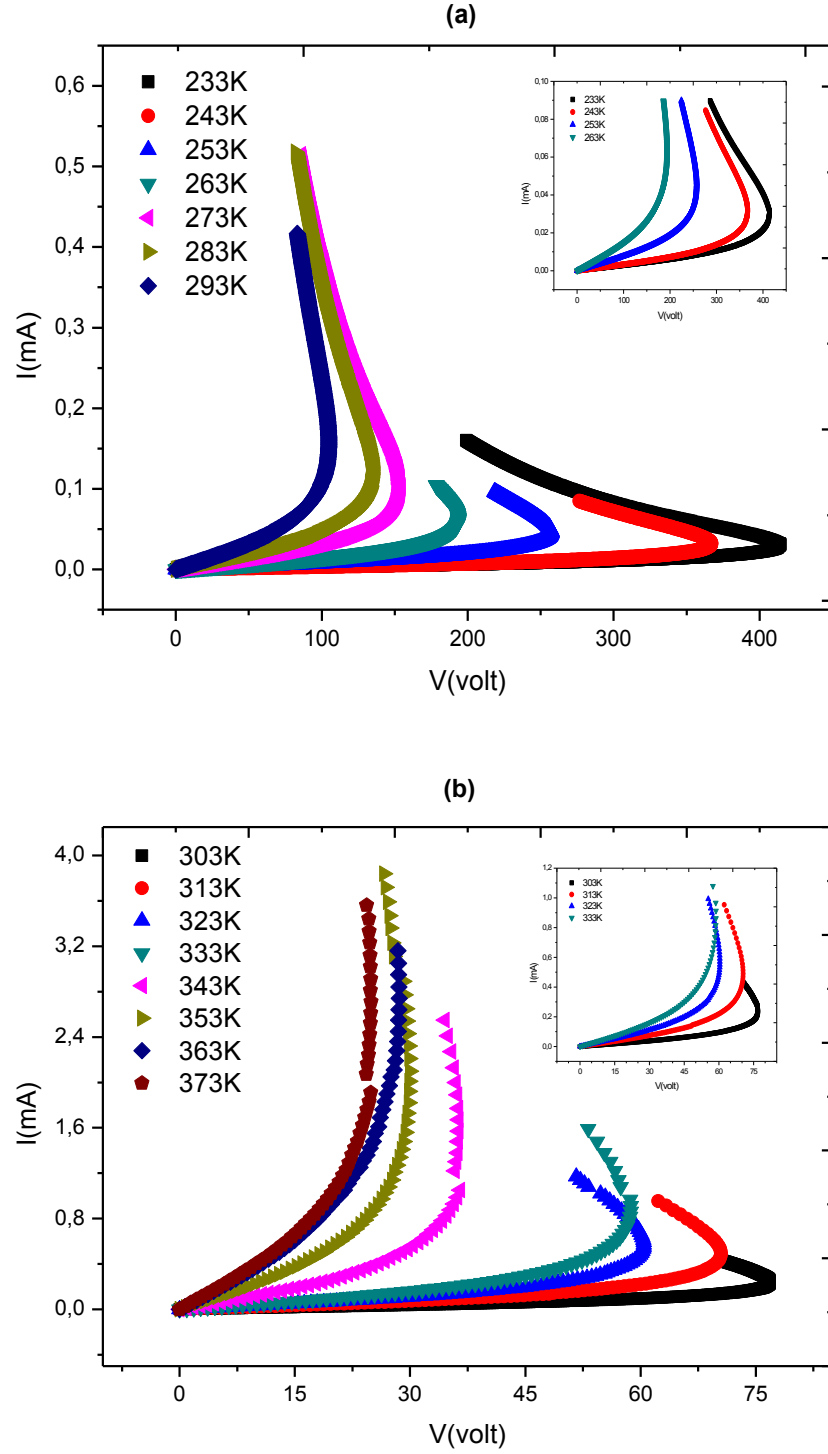
TlSbSe<sub>2</sub> bileşiğinin I-V karakteristikleri 233-373 K sıcaklık aralığında, 0 - 1000 Volt arası voltaj değerleri uygulanarak gözlemlendi. Ölçümler sırasında  $R_{\text{seri}} = 200 \Omega$  ile  $5 M\Omega$  arasında değişen değerlerde seri dirençler kullanıldı.

Bu ölçümler sonucunda her iki kontak durumu için;

- Düşük voltaj bölgesinde akımdaki artışın lineer olduğu, yüksek voltajlarda ise lineer olmadığı gözlemlendi.
- Kritik bir  $V_{\text{th}}$ , threshold voltaj değerinde örnekte yüksek-direnç bölgesinden (OFF-state) düşük-direnç bölgesine (ON-state) anahtarlama meydana geldiği gözlemlendi.
- Tüm sıcaklık değerlerinde bu davranışın değişmediği görüldü (Şekil 4.8 ve 4.9).

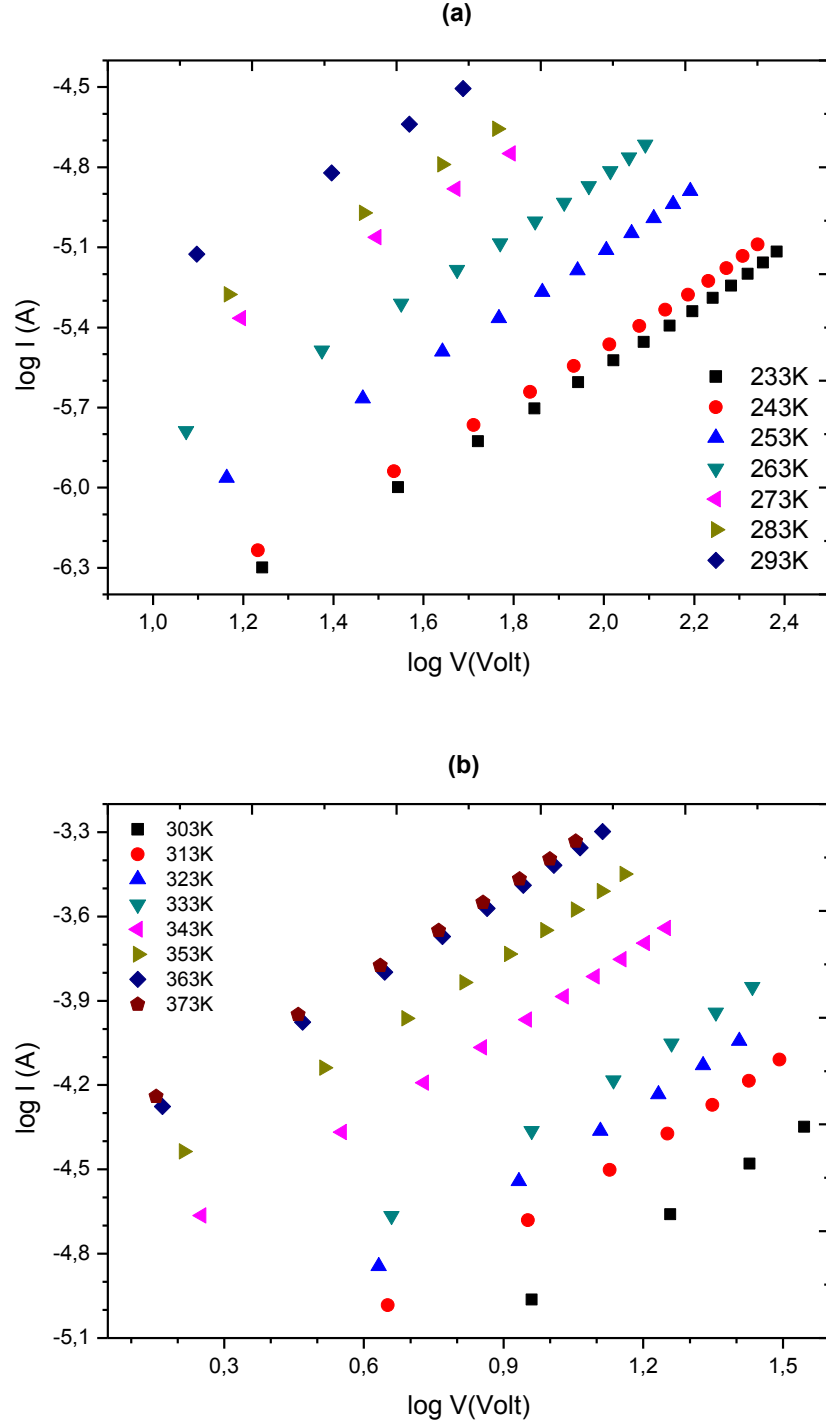


**Şekil 4.8:** (a) Tabakalara dik kontak durumu için 233 - 293 K sıcaklık aralığında I-V davranışı (b) Tabakalara dik kontak durumu için 303 - 373 K sıcaklık aralığında I-V davranışı.



**Şekil 4.9:** (a) Tabakalara paralel kontak durumu için 233 - 293 K sıcaklık aralığında I-V davranışı (b) Tabakalara paralel kontak durumu için 303 - 373 K sıcaklık aralığında I-V davranışı.

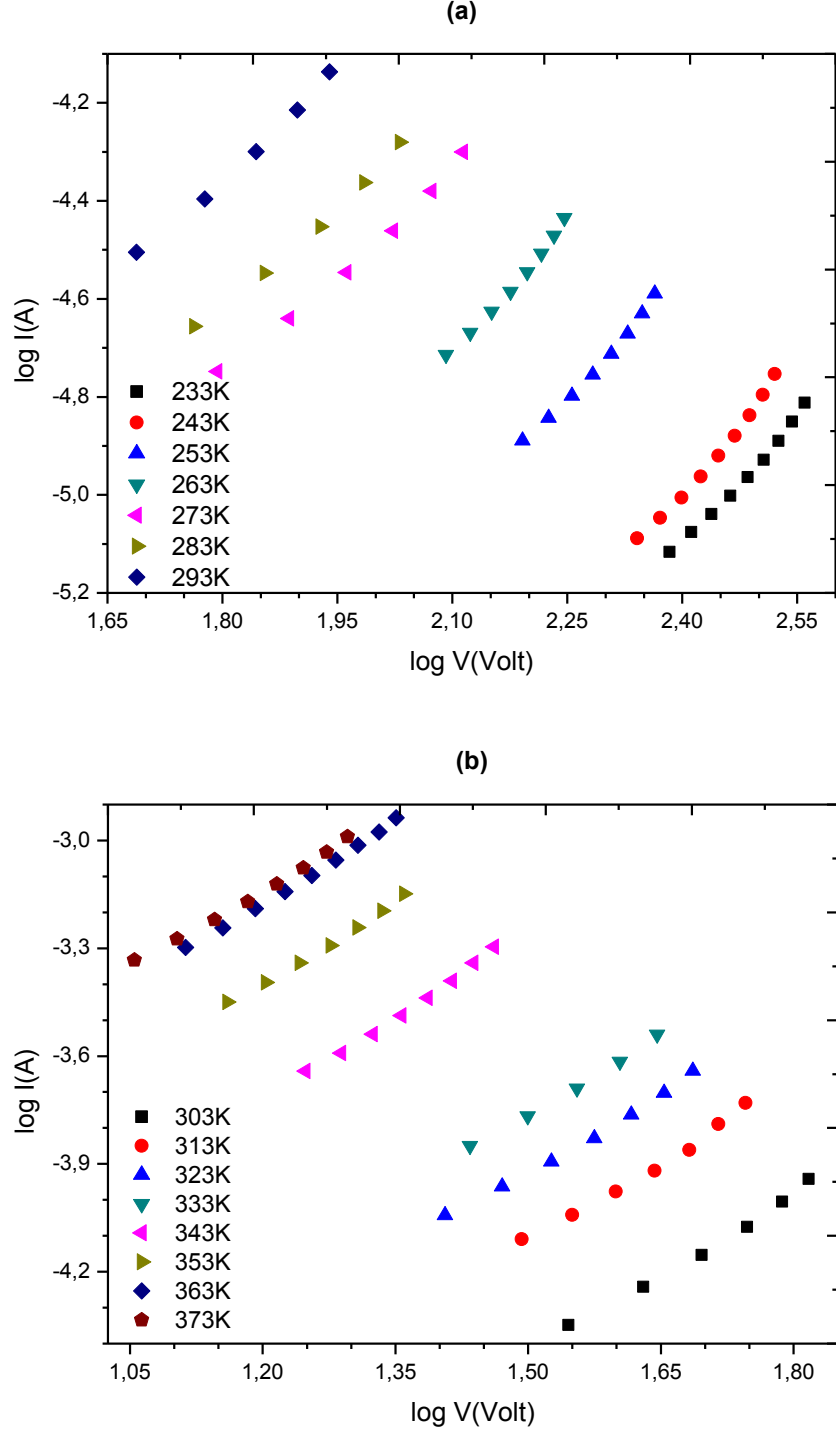
- Yüksek-direnç (OFF-state) bölgesi için,  $\log V$ - $\log I$  değişimlerine bakıldığında düşük alanda tüm sıcaklıklar için (eğimin 1 olduğu) omik davranış gözlemlendi (Şekil 4.10).



**Şekil 4.10:** (a) Tabakalara paralel kontak durumu için 233 - 293 K sıcaklık aralığında omik bölge (b) Tabakalara paralel kontak durumu için 303 - 373 K sıcaklık aralığında omik bölge.

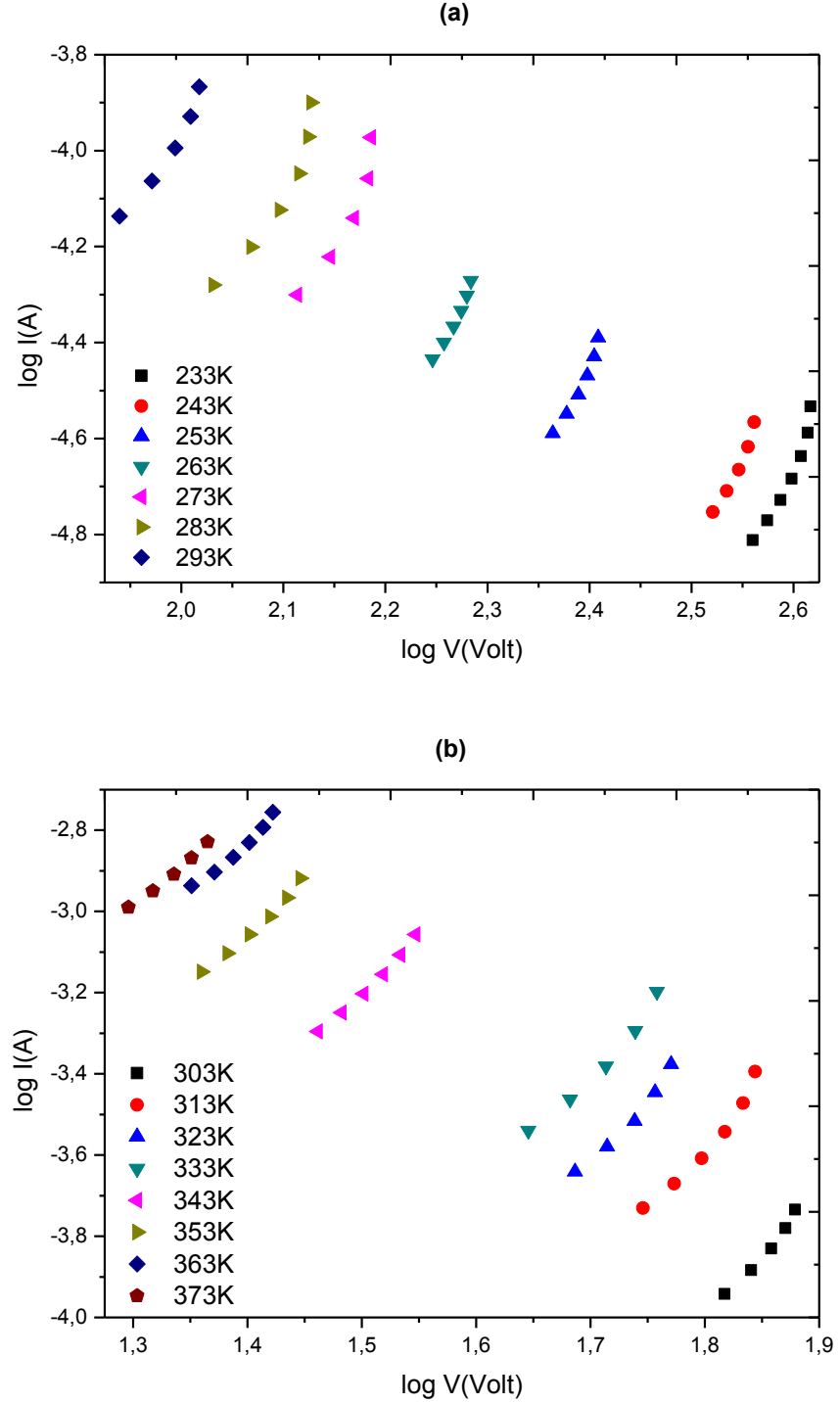


- Omik iletkenlik bölgesini voltaja bağıllığı  $I \propto V^2$  şeklinde olan SCLC bölgesinin izlediği görüldü. Bu bölgede  $1 < m < 2$  şeklindedir (Şekil 4.11).



**Şekil 4.11:** (a) Tabakalara paralel kontak durumu için 233 - 293 K sıcaklık aralığında  $1 < m < 2$  bölgesi (b) Tabakalara paralel kontak durumu için 303 - 373 K sıcaklık aralığında  $1 < m < 2$  bölgesi.

- Voltaja bağılılığı  $I \propto V^2$  şeklinde olan SCLC bölgesini, voltaja bağılılığı  $I \propto V^m$  olan SCLC bölgesinin izlediği görüldü. Bu bölgede  $m > 2$  dir (Şekil 4.12).



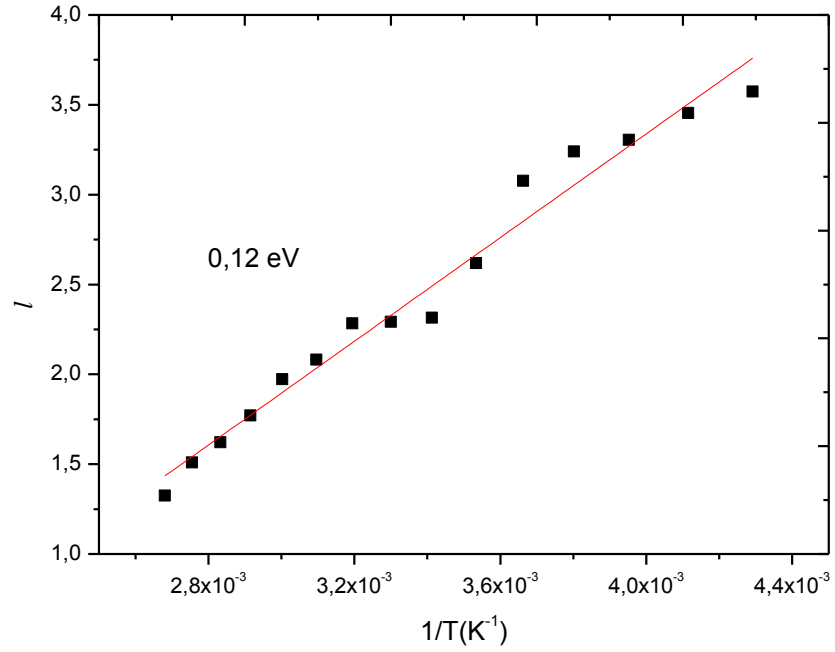
**Şekil 4.12:** (a) Tabakalara paralel kontak durumu için 233 - 293 K sıcaklık aralığında  $m > 2$  bölgesi (b) Tabakalara paralel kontak durumu için 303 - 373 K sıcaklık aralığında  $m > 2$  bölgesi.

- $m$  değerinin 2 den büyük olduğu bölge için (2.28) akım yoğunluğu ifadesine göre  $\log V - \log I$  eğimlerinden  $l$  değerleri bulundu.  $l$  değerlerinin artan sıcaklıkla lineer olarak azaldığı görüldü (Şekil 4.13).

Bu değişimden yararlanarak karakteristik sıcaklık  $T_t$  ve

$$E_t = k_B T_t \quad (4.3)$$

şeklindeki tuzak dağılımının enerjisi hesaplandı [43,83].

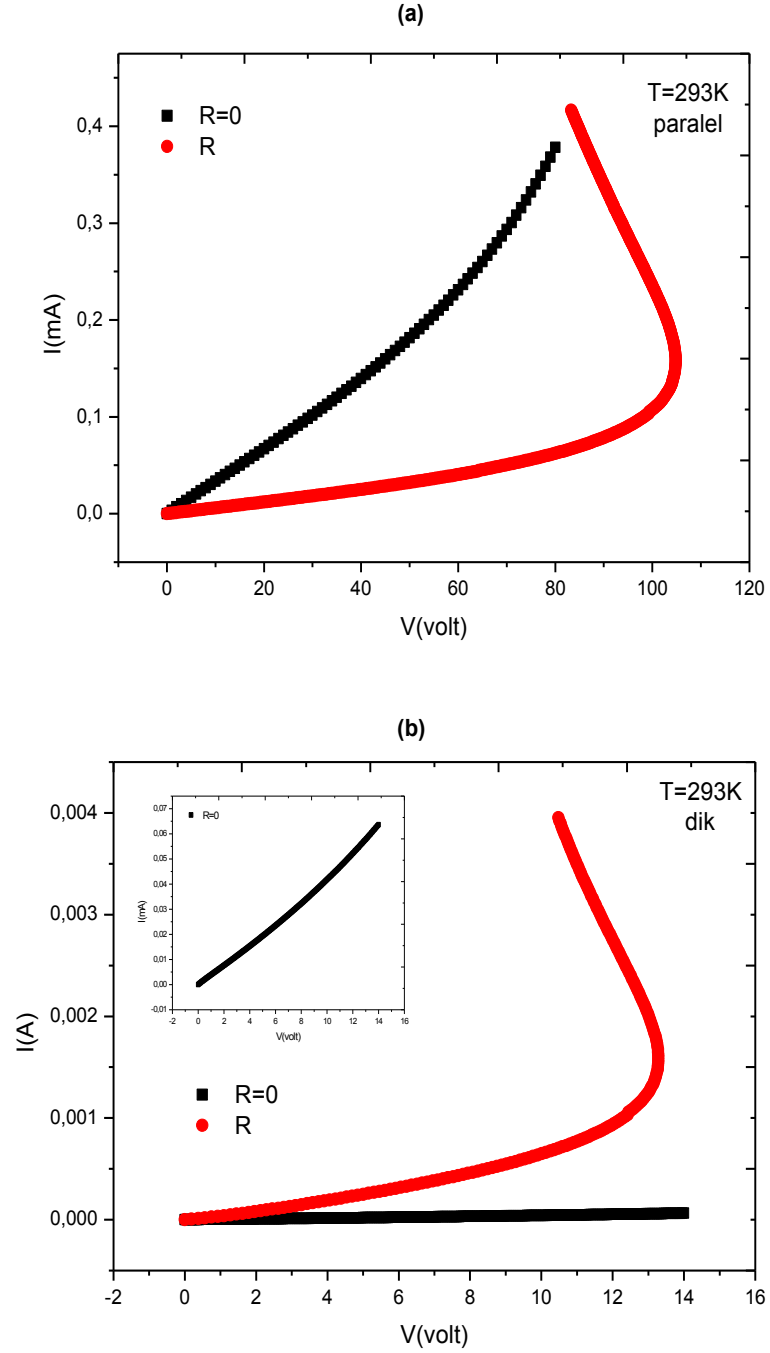


Şekil 4.13:  $m > 2$  bölgesi için kuvvet kanunu üstelinin sıcaklıkla değişimi.

### 4.3. ELEKTRİKSEL ANAHTARLAMA

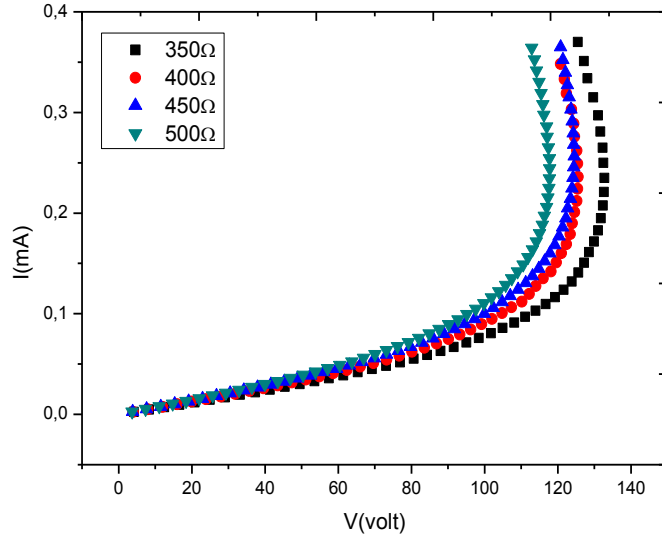
TlSbSe<sub>2</sub> bileşiğinin I-V karakteristikleri 233-373 K sıcaklık aralığında, 0-1000 Volt arası voltaj değerleri uygulanarak gözlemlendi.

- 293 K' de seri direnç kullanarak ve seri direnç kullanmadan yapılan ölçümler sonucunda, seri dirençli ölçümlerde örnekte anahtarlama meydana geldiği görüldü (Şekil 4.14).



293 K'de farklı seri dirençler kullanılarak I-V ölçümleri alındı. Bu ölçümlerden yola çıkarak;

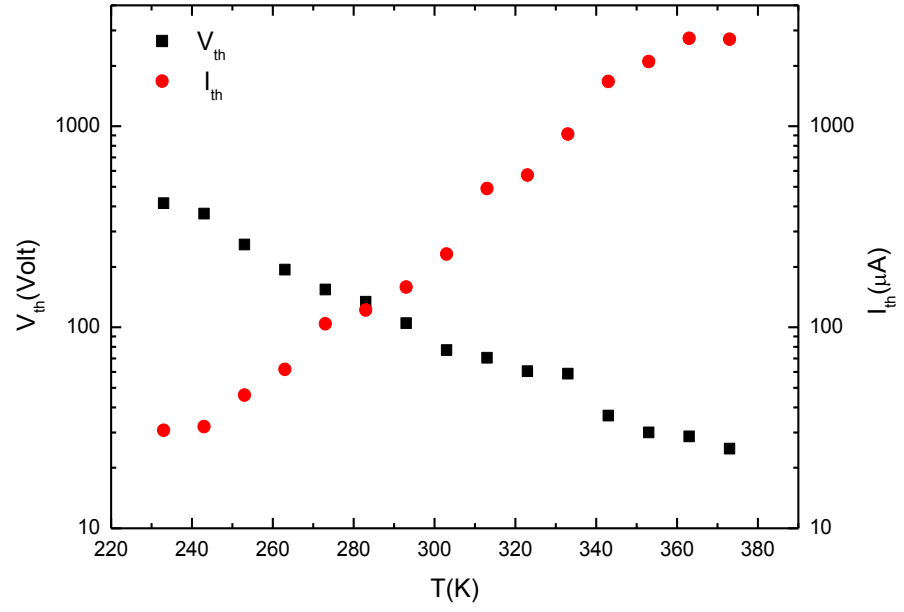
- Seri direnç arttıkça  $V_{th}$  voltajının azaldığı gözlemlendi (Şekil 4.15).



**Şekil 4.15:** Farklı seri dirençler kullanılması durumunda I-V karakteristiği.

Yapılan tüm sıcaklık ölçümleri sonucunda hem tabakalara paralel hem de dik kontaklı örnekte;

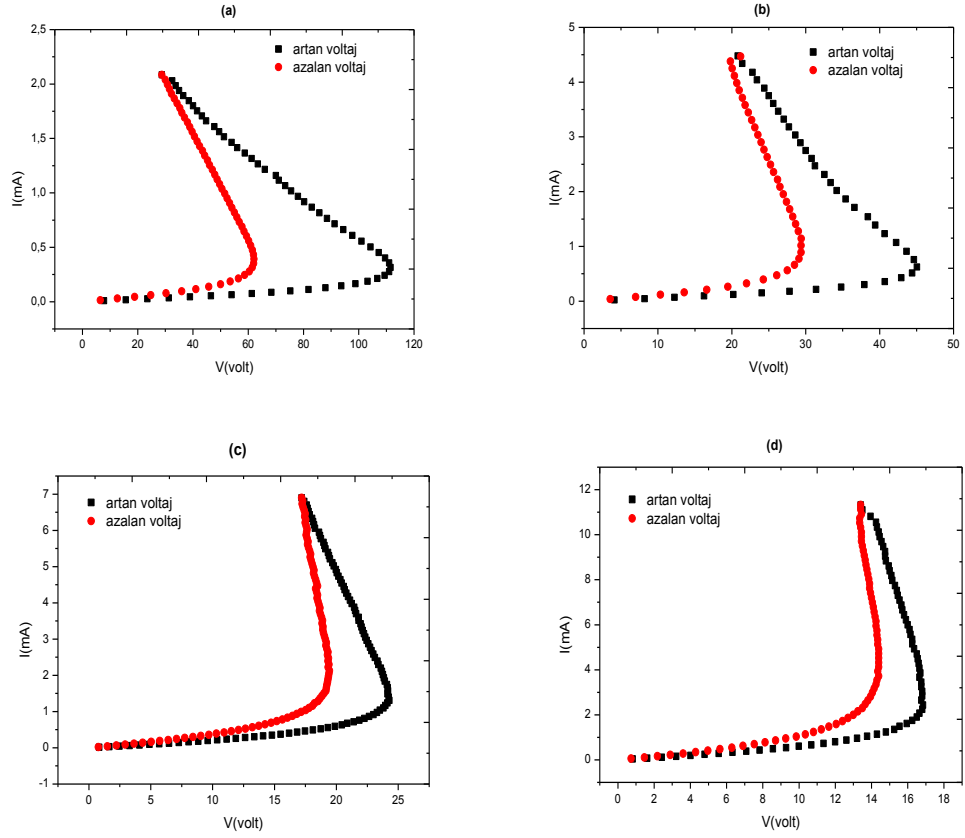
- Kritik bir voltaj ( $V_{th}$ ) değerinde malzemede anahtarlama meydana geldiği görüldü (Şekil 4.8 ve 4.9).
- $V_{th}$  değeri artan sıcaklıkla azalırken  $I_{th}$  değerinin arttığı gözlemlendi (Şekil 4.16).



Şekil 4.16:  $V_{th}$  ve  $I_{th}$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

Anahtarlama tipini belirlemek için 293-353 K sıcaklık aralığında artan ve azalan voltaj değerleriyle I-V ölçümleri yapıldı.

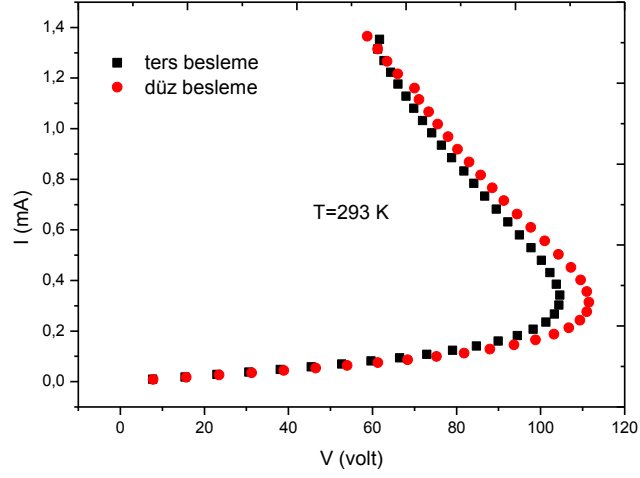
- Davranışın tüm sıcaklıklarda tersinir olduğu gözlemlendi ve dört farklı sıcaklık için değişimler Şekil 4.17' de verildi.



**Şekil 4.17:** Farklı sıcaklıklarda I-V karakteristikleri, (a) 293K (b) 313K (c) 333 K (d) 353K.

293 K' de düz ve ters besleme durumlarında I-V ölçümleri alındı.

- Düz ve ters besleme etkisinde örneğin aynı davranışı sergilediği belirlendi (Şekil 4.18).

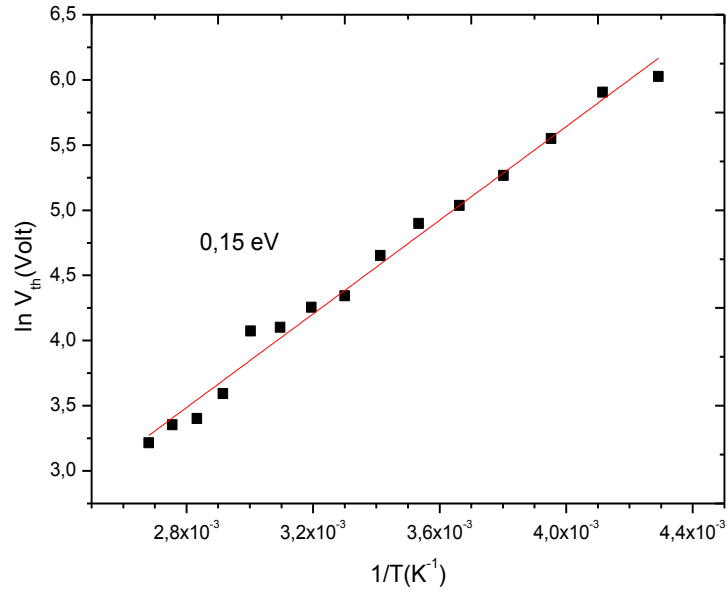


Şekil 4.18: 293 K’ de düz besleme ve ters besleme etkisindeki I-V karakteristiği.

Ayrıca

$$V_{th} = V_0 \exp \left[ \frac{\Delta E_{th}}{kT} \right] \quad (4.4)$$

bağıntısından hareketle  $\ln V_{th} - 1/T$  grafiğinin lineer bölge eğiminden  $\Delta E_{th}$ , threshold voltajı için aktivasyon enerjisi hesaplandı (Şekil 4.19).

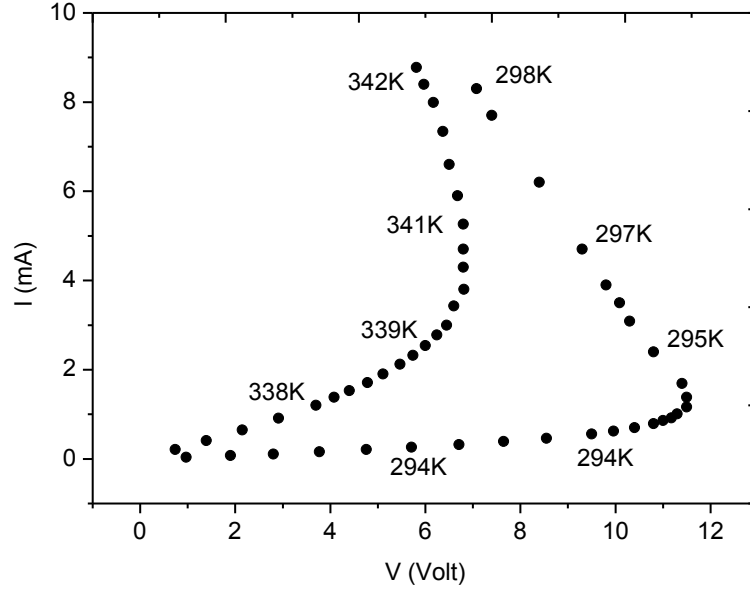


Şekil 4.19: Threshold voltajının sıcaklıkla değişimi.



Kalkan ve grubunun yaptığı bir önceki çalışmada [33] tabakalara dik kontaklı örnekte, 294 ve 338 K için NDR bölgesinde örneğin sıcaklık değişimlerine bakılmıştır.

- NDR bölgesinde sıcaklığın önemli bir değişiklik göstermediği gözlenmiştir (Şekil 4.20).



Şekil 4.20: Tabakalara dik kontaklı örnekte 294 ve 338 K için NDR bölgesinde ölçülen sıcaklık değerleri [33]

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

### 5.1. İLETKENLİK VE ELEKTRİKSEL ANİZOTROPI

TlSbSe<sub>2</sub> örneğinin I-V grafiklerine bakıldığında (Şekil 4.3 ve 4.4) dik kontak durumu için ~4,5 V ve paralel kontak durumu için ~12 V değerlerine kadar omik olan davranışın bu değerlerden yüksek voltajlarda omik olmadığı görüldü. Yüksek voltajlardaki süperlineer eğri, taşıyıcı injeksiyonuna işaret etmektedir.

I-V grafiklerine bakıldığında her iki kontak durumu için ölçümlerin aynı davranışı sergilemelerine rağmen değerlerinde farklılık göstermesi malzemenin elektriksel anizotropiye sahip olabileceğine göstermektedir.

Şekil 4.5' te tabakalara dik ve paralel kontaklı örnek için öz direncin sıcaklığa bağlı değişiminde öz direncin artan sıcaklıkla eksponansiyel olarak azalması yarıiletkenlerin tipik davranışı olarak gözlenmektedir.

Elektriksel iletkenlik, denklem (2.5)' e göre eksponansiyel olarak artan sıcaklıkla artmaktadır. Bu bağıntıdan hareketle  $\ln \sigma - 10^3/T$  grafiğinin lineer bölge eğimlerinden hesaplanan aktivasyon enerjilerinin artan sıcaklıkla artması çok daha fazla yük taşıyıcısının engeli aşarak elektriksel iletkenliğe katkıda bulunduğunu göstermektedir.

Tabaka yapıları yarıiletken bileşiklerde tabakalara dik elektriksel iletkenlik, ardışık tabakalar arası kayma, dönme veya ana bileşikten daha farklı yapıda tabakaların varlığı gibi kusurlardan etkilenir. Bu düzlemsel kusurlar tabakalara dik doğrultuda latit periyodikliğini bozar ve bir potansiyel engeli gibi davranarak tabakalar arasındaki uzayda serbest taşıyıcıların hareketini sınırlar. Bu engeller, yükseklikleri  $H$  ve genişlikleri  $b$  ile karakterize edilirler.

Elektriksel iletkenlik orta ve yüksek sıcaklıklarda serbest taşıyıcıların termal aktivasyonu ile gerçekleşir. Taşıyıcılar  $H$  bariyer yüksekliğinden daha yüksek termal enerjiye sahip olarak bariyeri aşabilir ve elektriksel iletkenliğe katkıda bulunabilirler. Düşük sıcaklık bölgelerinde ise taşıyıcılar engeli aşmak için yeterli termal enerjiye sahip değildirler. Bu durumda kuvantum mekaniksel tünelleme gerçekleşir. Tünelleme sıcaklığa bağlı değilken, termal aktivasyon eksponansiyel olarak sıcaklığa bağlıdır.

Düşük sıcaklık bölgelerinde anizotropi faktörü yüksektir. Orta ve yüksek sıcaklık bölgelerinde termal enerjinin bariyer yüksekliği  $H$  ye yaklaşmasıyla çok daha fazla taşıyıcı, bariyeri aşabildiğinden  $\sigma_{\perp}$  artar. Böylece  $\alpha$  değeri azalır.

Hazırladığımız TlSbSe<sub>2</sub> örnekleri için 293 K' deki anizotropi faktörü ~14 olarak hesaplandı (Şekil 4.7). Bu da TlBiSe<sub>2</sub>, Tl<sub>4</sub>Bi<sub>2</sub>S<sub>5</sub>, TlInSe<sub>2</sub> gibi diğer tabaka yapılı kristaller için elde edilmiş  $\alpha$  değerleriyle uyumludur [14,28,76,77].

Şekil 4.7' de 233-268 K sıcaklık aralığında anizotropi faktörü hemen hemen sabit olup bu bölgede iletkenlik için tünelleme mekanizmasının geçerli olduğu düşünülmektedir. 268-353 K aralığında ise anizotropi faktörü artan sıcaklıkla azalmaktadır. Bu ise taşıyıcıların termal aktivasyonla engeli aştığını göstermektedir.

Yüksek sıcaklık bölgesi için bariyer yüksekliği

$$\alpha = A \exp \left[ \frac{H}{k_B T} \right] \quad (5.1)$$

eşitliğinden faydalanarak Şekil 4.7' de lineer bölge eğiminden bariyer yüksekliği  $H \approx 37$  meV olarak hesaplandı. Burada  $A$  bozulmuş tabakaların konsantrasyonunu açıklayan bir sabittir. Elde edilen bariyer yüksekliği değeri tabaka yapılı kristaller için elde edilmiş değerlerle uyumludur [13,78].

## 5.2. ANAHTARLAMA ÖNCESİ İLETKENLİK MEKANİZMA TAYİNİ

Şekil 4.8 ve 4.9' da TlSbSe<sub>2</sub> bileşiğinin 233-373 K sıcaklık aralığında akım-voltaj karakteristiklerinde gözlenen anahtarlama düşük sıcaklıklarda daha belirgin olmaktadır. Orta ve yüksek akım değerlerinde I-V eğrilerinin eğimleri negatif olup değişim S-tiptir. Bu nedenle malzememiz S-tip anahtarlama göstermektedir.

TlSbSe<sub>2</sub> kristaline farklı değerlerde seri dirençler bağlanarak elde ettiğimiz grafikten de (Şekil 4.15) görüldüğü gibi küçük direnç değerlerinde OFF durumu daha uzun olmaktadır. Yani bir başka deyişle seri direnç değeri küçüldükçe threshold voltaj değeri artmaktadır. Bu da artan sıcaklıkla threshold voltajın azalmasını da göz önünde bulundurarak uygun seri direnci seçmemize yardımcı olmaktadır.

I-V karakteristiklerinin anahtarlama öncesi lineer olamayan kısmında mümkün mekanizmalar; uzay yükü sınırlayan akımlar (SCLC), Schottky emisyonu, Poole-Frenkel emisyonu ve hopping iletkenliktir. Yaptığımız incelemeler sonucu düşük voltaj bölgesinde lineer I-V eğrileri ve yüksek voltaj bölgesinde quadratik I-V eğrilerinin gözlenmesinden dolayı bu malzemede geçerli iletkenlik mekanizmasının büyük bir olasılıkla uzay yükü sınırlayan akımlar (SCLC) olduğunu düşünmekteyiz. SCLC mekanizmasında akımın birden artması tüm tuzakların dolduğunu gösterir. Böylece elektrotlardan sızan taşıyıcılar yarıiletkenin iletkenlik bandına akar [79].

Yüksek-direnç (OFF-state) bölgesi için logV-logI (Şekil 4.10) değişimlerine bakıldığında düşük alanda tüm sıcaklıklar için eğimin 1 olduğu omik davranış gözlenmiştir. Bu mekanizmaya göre yeterince düşük voltajlarda tuzaklanmış taşıyıcılar termal olarak eksite olurlar. Bu eksite taşıyıcı yoğunluğu sızan taşıyıcı yoğunluğundan daha fazla olduğundan akıma katkıda bulunurlar. Termal denge durumunda tuzak seviyeleri E<sub>F0</sub> seviyesine kadar doludur. Yük taşıyıcılar metal kontakta yarıiletkene geçer ve Fermi seviyesi E<sub>Fn</sub> değerine yükselir. Böylece taşıyıcılar E<sub>F0</sub> ve E<sub>Fn</sub> arasında yer alırlar. Uygulanan voltajın belli bir değerinde tuzaklar dolmaya başlar ve akım uzay yükü sınırlayan akım (SCL) olur ve V<sup>2</sup> kanununa uyar (Şekil 4.11). Omik iletkenlik bölgesini tuzakların dolmaya başladığı bölge olan ve voltaja bağlılığı I ∝ V<sup>2</sup> şeklinde olan SCLC bölgesi izlemektedir. Uygulanan voltaj arttırılmaya devam ettiğinde akım

birden artar. Bu tüm tuzakların dolduğunu gösterir. Öyle ki metalden sızan tüm yükler iletkenlik bandında akmaktadır. Tuzakların dolmaya başladığı bölgeyi, tuzakların tamamen dolmasıyla voltaja bağlılığı  $I \propto V^m$  olan SCLC bölgesi izlemektedir (Şekil 4.12). Bu bölgede  $m > 2$  dir.  $m$  değerinin 2 den büyük olması bu örneklerde tuzakların exponansiyel dağılımını göstermektedir. Şekil 4.13’ te SCLC teorisinin de ileri sürdüğü gibi  $l$  değerinin sıcaklık azaldıkça lineer olarak arttığı gözlenmiştir. Bu değişimden yararlanarak  $T_t = 1445$  K ve  $E_t=0.12$  eV olarak hesaplandı. Elde edilen bu değer aynı sıcaklık aralığında iletkenlik ölçümleri ile elde ettiğimiz sonuçla ve literatür ile uyumludur [23].

### 5.3. ELEKTRİKSEL ANAHTARLAMA

I-V eğrilerinin tamamen tersinir (Şekil 4.17) ve her iki voltaj polaritesi (Şekil 4.18) için davranışın tekrarlanabilir olması ayrıca threshold voltaj yakınlarında malzemenin sıcaklığının hissedilebilir olarak artmaması (Şekil 4.20) threshold (eşik) anahtarlamının elektronik orjinli olduğunu göstermektedir. Elektronik süreçte, NDR bölgesinin görülmesi ile ilişkili yüksek iletkenlik durumu, dengede olmayan çoğunluk taşıyıcıların artması ve/veya onların mobilitelerinin artmasından dolayıdır. Bu Gunn efekt, tünelleme, taşıyıcı injeksiyonu, uzay yük efekt ve Poole-Frenkel efekt gibi değişik mekanizmalara dayandırılabilir. Bizim çalışmamızda, yüksek alanda iletkenliğin artması uzay yük sınırlayan akımlarla açıklanmaktadır.

Şekil 4.16’ da artan sıcaklıkla threshold voltajın eksponansiyel olarak azaldığı gözlenmiştir. Bunun anlamı voltajın ayarlanması ile istenilen her hangi bir sıcaklıkta anahtarlama elde edilebilmesidir. Benzer threshold voltaj değişimi literatürde de gözlenmiştir [64, 72, 80- 82] . Elde edilen  $\ln V_{th}$  ile  $10^3/T$  değişimi

$$V_{th} = V_0 \exp(\Delta E_{th}/k_B T) \quad (5.2)$$

bağıntısına uymaktadır. Burada  $V_0$ , bir sabit olup  $\Delta E_{th}$ , threshold voltaj aktivasyon enerjisidir.  $\ln V_{th} - 10^3/T$  eğiminden aktivasyon enerjisi 0.15 eV olarak hesaplandı.  $\Delta E_{\sigma}$  iletkenlik aktivasyon enerjisi olmak üzere  $\Delta E_{th}/\Delta E_{\sigma}$  değerinin elektrotermal modele

göre 0.5 değerinden farklı olması threshold anahtarlamanın elektrotermal orjinli olmadığını da göstermektedir [80- 82]. Yüksek sıcaklıklarda threshold anahtarlamanın kaybolması termal eksitasyonla tuzaklardan taşıyıcıların azaldığına işaret etmektedir [64, 72].

Sonuç olarak  $\text{TlSbSe}_2$  örneğinin düşük anisotropi faktörüne sahip olması taşıyıcıların oldukça düşük potansiyel engelini termiyonik emisyon ile aşabildiğini göstermektedir. Örnek S-tip NDR' a sahip threshold anahtarlama göstermekte olup elde edilen deneysel sonuçlara göre anahtarlama öncesi lineer olmayan davranış için SCLC iletkenlik mekanizması geçerlidir. Tuzakların dolmasıyla anahtarlamanın meydana gelmesi, ayrıca I-V eğrilerinin tamamen tersinir ve her iki voltaj polaritesi için davranışın tekrarlanabilir olması anahtarlamanın orjininin elektronik olduğunu göstermektedir.

## KAYNAKLAR

- [1]. Karabulut, O., Yılmaz, K., Boz, B., 2010, Electrical and optical properties of Co-doped TlGaS<sub>2</sub> crystals, *Crystal Research and Technology*, 46 (1), 79-84.
- [2]. Salam, R. and Shams, N., 1989, Electrode Dependence of Space-Charge-Limited Current in a-Si/c-Si Heterostructures, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 113, 103-105.
- [3]. Al Orainy, R.H., 2012, Interpretation of Switching Properties of InGaSe<sub>2</sub> Single Crystal, *Acta Physica Polonica A*, 121 (3), 666-672.
- [4]. Adler, D., Shur, M.S., Silver, M., Ovshinsky, S.R., 1979, Threshold Switching in Chalcogenide-Glass Thin Films, *Journal of Applied Physics*, 51(6), 3289-3309.
- [5]. Szot, K., Speier, W., Bihlmayer, G. and Waser, R., 2006, Switching the Electrical Resistance of Individual dislocations in single-crystalline SrTiO<sub>3</sub>, *Nature Materials*, 5, 312-320.
- [6]. Waser, R. and Aono, M., 2007, Nanoionics-based resistive switching memories, *Nature Materials*, 6, 833-840.
- [7]. Oka, K., Yanagida, T., Nagashima, K., Tanaka, H. and Kawai, T., 2009, Nonvolatile Bipolar Resistive Memory switching in Single Crystalline NiO Heterostructured Nanowires, *Journal of the American Chemical Society*, 131 (10), 3434, 3435.
- [8]. Pargament, A.L., Boriskov, P.P., Velichko, A.A., Kuldin, N.A., 2010, Switching Effect and Metal-Insulator Transition in Electric Field, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 71, 874-879.
- [9]. Anderson, B., Bryant, I., Luling, M. and Spies, B., 1994, Oilfield Anisotropy: Its Origins and Electrical Characteristics, *Oilfield Review*, 6 (4).
- [10]. Bahr, K. and Duba, A., 2000, Is the Asthenosphere electrically anisotropic?, *Earth and Planetary Science Letters*, 178, 87-95.
- [11]. Behrens, J.P., 2005, *The Dedection of Electrical Anisotropy in 35 Ma Pacific Litosphere Results from a Marine Controlled-Source Electromagnetic Survey and Implications for Hydration of the Upper Mantle*, Doktora, University of California, San Diego.
- [12]. Chin, A. B., Garmirian, L.P., Nie, R. and Rutkove, S.B., 2008, Optimizing Measurement of the Electrical Anisotropy of Muscle, *Muscle & Nerve*, 37, 560-565.

- [13]. Rabinal, M.K., Titus, S.S.K., Asokan, S., Gopal, E.S.R, Godzaev, M.O., Mamedov, N.T., 1993, Effect of High Pressure on the Electrical Conductivity of  $\text{TlInX}_2$  (X=Se,Te) Layered Semiconductors, *Physica Status Solidi (b)*, 178, 403-408.
- [14]. Bakhyshev, A.E., Agaeva, M.F. and Darvish, A.M., 1979, Electrical and Optical Properties of  $\text{TlInSe}_2$  Single Crystals, *Physica Status Solidi (b)*, 91, K31-K34.
- [15]. Ebnalwaled, A.A., Al-Orainy, R.H., 2013, Anisotropic Properties and Conduction Mechanism of  $\text{TlInSe}_2$  Chain Semiconductor, *Applied Physics A*, 112, 955-961.
- [16]. Werheit, H. and Rospendowski, S., 1986, Anisotropy of the Electrical Conductivity of Boron Carbide, *AIP Conference Proceedings*, 140, 234-239.
- [17]. Anagnostopoulos, A.N., Kyriakos, D.S. and Kalomiros, J.A., 1988, Electronic Behavior of  $\text{Ga}_{2/3}\text{PS}_3$  Single Crystals, *Physical Review B*, 37 (8), 4026-4031.
- [18]. Haniyas, M.P., Anagnostopoulos, A.N, Kambas, K. and Spyridelis, J., 1992, Electrical and Optical Properties of As-Grown  $\text{TlInS}_2$ ,  $\text{TlGaSe}_2$  and  $\text{TlGaS}_2$  Single Crystals, *Materials Research Bulletin*, 27, 25-38.
- [19]. Anagnostopoulos, A.N. and Karoutis, A., 1982, Electron Trap Distribution Determined by Means of Conductivity Measurements on Highly Anisotropic  $\text{ZnIn}_2\text{S}_4$  Crystals, *Physica Status Solidi (a)*, 71, 543-548.
- [20]. Gallos, L.K., Anagnostopoulos, A.N. and Argyrakis, P., 1994, Conduction Anisotropy in Layered Semiconductors, *Physical Review B*, 50 (19), 14643-14646.
- [21]. Park, J.B., Hwang, T.K., Kim, H.G. and Doh, Y.D., 2007, Experimental and Numerical study of the Electrical Anisotropy in Unidirectional Carbon-Fiber-Reinforced-Polymer Composites, *Smart Materials and Structures*, 16, 57-66.
- [22]. Peng, H., Xie, C., Schoen, D.T. and Cui, Y., 2008, Large Anisotropy of Electrical Properties in Layer Structured  $\text{In}_2\text{Se}_3$  Nanowires, *Nano Letters*, 8 (5), 1511-1516.
- [23]. Gitsu, D.V., Grincheshen, I.N., and Popvich, N.S., 1982, Dependence of Electrophysical Parameters of  $\text{TlSbSe}_2$  Layer Crystals on Growth Conditions, *Physica Status Solidi (a)*, 72, 113-116.
- [24]. Gitsu, D.V., Grincheshen, I.N., and Popvich, N.S., 1983, The Electric and Photoelectric Properties of  $\text{TlSbSe}_2$  Crystals in the Region of Impurity Conduction, *Physica Status Solidi (a)*, 76, 5-7.
- [25]. Grincheshen, I.N., Popvich, N.S. and Shtanov, A., 1984, Relaxation Peculiarities in  $\text{TlSbSe}_2$  Crystals, *Physica Status Solidi (a)*, 85, 85-88.



- [26]. Banyas, J., Grigas, J. and Valiukenas, 1992, Microwave Dielectric Properties of TlSbSe<sub>2</sub> Crystals, *Solid State Communications*, 82(8), 633-636.
- [27]. Syrbu, N.N., Krasovsky, V.T., Grincheshen, I.N., 1993, Optical Phonons and Chemical Bonding in TlSbS<sub>2</sub>, TlSbSe<sub>2</sub> and Tl<sub>3</sub>SbS<sub>3</sub> Crystals, *Crystal Research and Technology*, 28(3), 371-380.
- [28]. Ren, J. and Whangbo, M.-H., Begel, H., Cantow, H.-J. and Magonov, S.N., 1993, Interpretation of the Scanning Tunneling and Atomic Force Microscopy Images of Layered Compound TlSbSe<sub>2</sub> by electron Density Calculations, *Chemistry of Materials*, 5, 1018-1023.
- [29]. Crissafis, K., Ozer, M., Vinga, E., Polychroniadis, E., Chatzistavrou, X. and Paraskevopoulos, K. M., 2006, Characterization and Phase Transformation Study of TlSbSe<sub>2</sub> Crystals, *Journal of Thermal Analysis of Calorimetry*, 86 (3), 839-843.
- [30]. Hoang, K. and Mahanti, S. D., 2008, Atomic and electronic structures of thallium-based III-V-VI<sub>2</sub> ternary chalcogenides: *Ab initio* calculations, *Physical Review B*, 77, 205107.
- [31]. Deger, D., Ulutas, K., Yildirim, S., Kalkan, N., 2009, Relaxation Spectrum of the TlSbSe<sub>2</sub> Thin Films, *Physica B*, 404, 5231-5233.
- [32]. Kalkan, N., Yildirim, S., Deger, D., Ulutas, K., Celebi, Y.G., 2005, dc conduction properties of TlSbSe<sub>2</sub> crystals, *Materials Research Bulletin*, 40, 936-941.
- [33]. Kalkan, N., Yildirim, S., Ulutas, K., Deger, D., 2008, Electrical Switching in TlSbSe<sub>2</sub> Chalcogenide Semiconductors, *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, 37 (2), 157-160.
- [34]. Lin, H., Markiewicz, R.S., Wray, L.A., Fu, L., Hasan, M.Z. and Bansil, A., 2010, Single-Dirac-Cone Topological surface states on pseudo-IV-VI Semiconductors: Thallium-Based III-V-VI<sub>2</sub> Ternary Chalcogenides, *Physical Review Letters*, 105, 036404-1-4.
- [35]. Ereemeev, S.V., Bihlmayer, G., Vergniory, M., Koroteev, Yu.M., Menshchikova, T.V., Henk, J., Ernst, A. and Chulkov, E.V., 2011, *Ab initio* Electronic Structure of Thallium-Based Topological Insulators, *Physical Review B*, 83, 205129-1-8.
- [36]. Ulutas, K., Kalkan, N., Yildirim, S. and Deger, D., 2005, Conduction mechanisms in TlSbSe<sub>2</sub> chalcogenides, *Crystal Research and Technology*, 40 (9), 898-900.
- [37]. Pargament, A.L., Malinenko, V.P., Tulubaeva, O.I. and Aleshina, L.A., 2004, Electroforming and Switching Effects in Yttrium Oxide, *Physica Status Solidi (a)*, 201(7), 1543-1550.

- [38]. Omar, M.A., *Elementary Solid State Physics*, Addison-Wesley Publishing Company Inc, Menlo Park, California, 1975.
- [39]. Bar-Lev, A., *Semiconductors and Electronic Devices*, Prentice-Hall International, London, 1984.
- [40]. Sze, S.M. and Kwok, K.NG, 1981, *Physics of Semiconductor Devices*, 3<sup>rd</sup> edition, John Wiley & Sons Inc., U.S.A, 978-0-47 1-1 4323-9.
- [41]. Kao, K.C., and Hwang, W., 1979, *Electrical Transport in Solids in the Science of the Solid State*, 14, Pergamon Press, 663, 0080239730.
- [42]. Simmons, G. J., 1967, Poole-Frenkel Effect and Schottky Effect in Metal-Insulator-Metal Systems, *Physical Review*, 155 (3) , 657-660.
- [43]. Zhang, J. and Harell, W.R., 2003, Analysis of the I-V characteristics of Al/4H-SiC Schottky Diodes, *Journal of Vacuum Science and Technology*, 21(2), 872-873.
- [44]. Cheong, K.Y., Moon, J.H., Kim, H.J., Bahng, W. and Kim, N-K., 2008, Current conduction mechanisms in atomic-layer-deposited HfO<sub>2</sub>/nitrided SiO<sub>2</sub> stacked gate on 4H silicon carbide, *Journal of Applied Physics*, 103(8), 084113-1-8.
- [45]. Brutting, W., Berleb, S., Muckl, A.G., 2001, Space- Charge- Limited-Conduction with a Field and Temperature Dependent Mobility in Alq Light-Emitting Devices, *Synthetic Metals*, 122, 99-104.
- [46]. Hartnagel, H., 1969, *Semiconductor Plasma Instabilities; Including Gunn-effect and Avalanche Oscillations*, Elsevier Publishing Company, NewYork, 978-0444197498.
- [47]. Bonch, V.L.-Brunevich, Zvyagin, I.P. and Mironov, A.G., 1975, *Domain Electrical Instabilities in Semiconductors*, Consultants Bureau, New York 0306109115.
- [48]. Pozhela, J., 1981, *Plasma and Current Instabilities in Semiconductors*, Pergamon Press, Oxford, 978-0-08-025048-9.
- [49]. Asche, M., Gribnikov, Z.S., Mitin, V.V., Sarbei, O.G., 1982, *Hot electrons in Many-Valley Semiconductors*, Izdatel'stvo Naukova Dumka, Russia.
- [50]. Park, S.J., Kim, I.S., Kim, S.K., Yoon, S.M., Yu, B.G. and Choi, S.Y., 2008, Phase transition characteristics and device performance of Si doped Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>, *Semiconductor Science and Technology*, 23, 105006.
- [51]. Fairman, R., Ushkov, B., 2004, *Semiconducting Chalcogenide Glass III: Applications of Chalcogenide Glasses*, Elsevier Academic Press, 80, 9780127521893.

- [52]. Nassary, M. M., Hussein, S. A., Belal, A. E., El-Shalkh, H. A., 1994 Investigation of the Switching Phenomena in Indium Monotelluride Single Crystals, *Physica Status Solidi (a)*, 145 (1), 151-155.
- [53]. Al-Ghamdi, A. A., Hussein, S. A. and Nassary, M. M., 2004, Memory-Switching Effect in GaSe Single Crystals, *Material Science Research India*, 2 (2), 107-114.
- [54]. Aydogan, S., Karacali, T., Yogurtcu Y. K., 2005, Investigation of the Switching Phenomena in Ga<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> Single Crystals, *Journal of Crystal Growth*, 279 (1-2), 110-113.
- [55]. Hantias, M. P. and Anagnostopoulos, A. N., 1993, Negative Differential-Resistance Effects in the TlGaTe<sub>2</sub> Ternary Semiconductor, *Physical Review B*, 47, 4621.
- [56]. Nassary, M. M., Hussein, S. A., Nagat, A. T., 1994, Behaviour of Switching Phenomena in Single Crystals of TlGaTe<sub>2</sub>, *Crystal Research and Technology*, 29 (6), 869-873.
- [57]. Abay, B., Gurbulak, B., Yildirim, M., Efeoglu, H. and Yogurtcu, Y.K., 1996, Electrothermal Investigation of the Switching Phenomena in p-type TlInSe<sub>2</sub> Single Crystals, *Physica Status Solidi (a)*, 153, 145-151.
- [58]. Al-Ghamdi, A. A., Nagat, A. T., Bahabri, F. S., Al-Orainy, R. H., Al-Harbi, S. R., Al-Hazmi, F. S., 2009, Negative-Differential-Resistance Effects in TlInTe<sub>2</sub> Ternary Semiconductor, *Journal of Alloys and Compounds*, 484 (1-2), 561-566.
- [59]. Abay, B., Gurbulak, B., Yildirim, M., Efeoglu, H. and Yogurtcu, Y.K., 1996, Electrothermal Investigation of the Switching Effect in p-type TlInSe<sub>2</sub>, TlInTe<sub>2</sub> and TlGaTe<sub>2</sub> Chain Chalcogenide Semiconductors, *Journal of Electronic Materials*, 25 (7), 1054-1059.
- [60]. Karakotsou, Ch., Anagnostopoulos, A.N., 1996, Crisis in Electrical Behaviour of the TlInSe<sub>2</sub>, Semiconducting Compounds, *Physica D*, 93, 157-164.
- [61]. Hantias, M., Anagnostopoulos, A. N., Kambas, K. and Spyridelis, J., 1993, Negative-Differential-Resistance Effects in the TlGaTe<sub>2</sub> Ternary Semiconductor, *Physical Review B*, 47 (8), 4261.
- [62]. Abutalybov, G. J., Abdullaeva, S. G. and Zainalov, N. M., 1982, *Soviet Physics Semiconductors*, 16, 1348.
- [63]. Adler, D., Hensch, H. K., Mott, S. N., 1978, The Mechanism of Threshold Switching in Amorphous Alloys, *Reviews of Modern Physics*, 50 (2), 209-220.

- [64]. Karthik, C., Mehta, R. J., Jiang, W., Castillo, E., Borca-Tasciuc, T. and Ramanath, G., 2011, Threshold Conductivity Switching in Sulfurized Antimony Selenide Nanowires, *Applied Physics Letters*, 99, 103101-3.
- [65]. Rajesh, R., and Philip, J., 2003, Memory Switching in In-Te Glasses: Results of Heat-Transport Measurements, *Semiconductor Science and Technology*, 18 (2), 133-138.
- [66]. Pergament, A., Stefanovich, G., Velichko, A., Melnichenok, I, Kotsuba, E., Romanov, V., 2006, Switching Effect in Oxides of Vanadium, Nickel and Zinc, *Journal of International Research Publication: Materials, Methods & Technologies*, 1, 89-100.
- [67]. Pagnia, H., 1992, Prospects for Metal/non-Metal-Metal Microsystems: Sensors, Sources and Switches, *International Journal of Electronics*, 73 (5), 819-825.
- [68]. Thurstas, R.E., Oxley, D.P., 2002, The Electroformed Metal- Insulator-Metal Structure: A Comprehensive Model, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 35, 802-809.
- [69]. Fors, R., Khartsev, S. I. and Grishin, A. M., 2005, Giant Resistance Switching in Metal-Insulator-Manganite Junctions: Evidence for Mott Transition, *Physical Review B*, 71, 045305.
- [70]. Scott, J. C., 2004, Materials Science: Is There an Immortal Memory?, *Science*, 304 (5667), 62-63.
- [71]. Pergament, A. L., Boriskov, P. P., Velichko, A. A., Kuldin, N. A., 2010, Switching Effect and the Metal-Insulator Transition in Electric Field, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 71, 874-879.
- [72]. Murugavel, S. and Asakon, S., 1998, Composition Tunable Memory and Threshold Switching in  $\text{Al}_{20}\text{As}_x\text{Te}_{80-x}$  Semiconducting Glasses, *Journal of Materials Research*, 13 (10), 2982-2987.
- [73]. Solymar, L. and Walsh, D., *Lectures on the Electrical Properties of Materials*, Oxford (1970).
- [74]. Çağlar, M., 2002, *Püskürtme Yöntemi ile Elde Edilen In katkılı ZnO Filmlerinin DC ve optik özellikleri*, Doktora, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye.
- [75]. Ren, J. and Whangbo, M.-H., Begel, H., Cantow, H.-J. and Magonov, S.N., 1993, Interpretation of the Scanning Tunneling and Atomic Force Microscopy Images of Layered Compound  $\text{TlSbSe}_2$  by electron Density Calculations, *Chemistry of Materials*, 5, 1018-1023.
- [76]. Ozer, M., Kalkan, N., Kyritsi, K.G., Paraskevopoulos, K.M., Anagnostopoulos, A.N., Stergioudis, G., Polychroniadis, E.K., 2002, The Influence of  $\text{Tl}_4\text{Bi}_2\text{S}_5$

- Precipitates on the Crystalline TlBiS<sub>2</sub> Properties, *Pysica Status Solidi (a)*, 193 (1), 3-11.
- [77]. Anagnostopoulos, A.N., Manolikas, C. and Papadopouls, D., 1983, Comparison of the Structure and the Electric Properties of ZnIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub>(III)-and CdInGaS<sub>4</sub>-Layered Crystals, *Pysica Status Solidi (a)*, 77, 595-601.
- [78]. Ozer, M., Paraskevopoulos, K.M., Anagnostopoulos, A.N., 1996, Large Single-Crystal Growth and Characterization of the Narrow Gap Semiconductor TlBiS<sub>2</sub>, *Semiconductor Science and Technology*, 11, 1405-1410.
- [79]. Chiang, Y-D., Ghang, W-Y., Ching, Y-H., Chen, C-Y., Ho, C-H., Lin, S-J., Wu, T-B., He, J-H., 2011, Single-ZnO-Nanowire Memory, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 58 (6), 1735-1740.
- [80]. Afifi, M.A., Hegab, N.A., 1997, Threshold Switching in Te<sub>46-x</sub>As<sub>32+x</sub>Ge<sub>10</sub>Si<sub>12</sub> Chalcogenide Glass System, *Vacuum*, 48 (2), 135-141.
- [81]. Fadel, M., Hegab, N.A., Yahia, I.S., Salem, A.M., Farid, A.S., 2011, Electrical and Switching Properties of Se<sub>85</sub>Te<sub>15-x</sub>Sb<sub>x</sub> (0<x<6 at. wt. %) thin films, *Journal of Alloys and Compounds*, 509 (29), 7663-7670.
- [82]. Slankamenac, M.P., Lukic, S.R. and Zivanov, M.B., 2009, Electrical Switching in the Bulk Metal Chalcogenide Glassy Semiconductor Cu<sub>10</sub>(AsSe<sub>1.4</sub>I<sub>0.2</sub>)<sub>90</sub>, *Semiconductor Science and Technology*, 24 (8), 085021.
- [83]. Rafiq, M.A., Tsuchiya, Y., Mizuta, H., Oda, S., Uno, S., Durrani, Z.A.K., Milne, W.I., 2005, Charge injection and trapping in silicon nanocrystals, *Applied Physics Letters*, 87, 182101.

## ÖZGEÇMİŞ



### Kişisel Bilgiler

<b>Adı Soyadı</b>	HANİFE BAŞ
<b>Uyruğu</b>	T.C.
<b>Doğum tarihi, Yeri</b>	17/10/1987, İSTANBUL
<b>Telefon</b>	0538 391 0217
<b>E-mail</b>	<a href="mailto:hanifebas1017@gmail.com">hanifebas1017@gmail.com</a>

### Eğitim

Derece	Kurum/Anabilim Dalı/Programı	Yılı
Yüksek Lisans	İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü/Fizik Anabilim Dalı/Genel Fizik Programı	2014
Lisans	İ.Ü. Fen Fakültesi/ Fizik Bölümü	2010
Lise	Yenilevent Lisesi (Yabancı Dil Ağırlıklı Lise)	2005

### Makaleler / Bildiriler

Baş, H., Kalkan, N., 2014, *Anisotropic Conductivity of TlSbSe<sub>2</sub> Ternary Compounds*, poster, 21-24 Temmuz 2014, Turkish Physical Society-31th International Physics Congress – Nurol Kültür Merkezi – Bodrum/Muğla.

Kalkan, N., Baş, H., 2013, *DC Electric-Field Effect in TlSbSe<sub>2</sub> Ternary Compounds*, poster, 2-5 Eylül 2013, Turkish Physical Society-30th International Physics Congress – İstanbul Üniversitesi – İstanbul.

Baş, H. ve diğ., 2013, *Dielectric Properties of TlSbSe<sub>2</sub> Ternary Compounds*, sözlü bildiri, 2-5 Eylül 2013, Turkish Physical Society-30th International Physics Congress – İstanbul Üniversitesi – İstanbul.

Baş, H ve diğ., 2012, *Dielectric Properties of TlInSe<sub>2</sub> Ternary Compounds*, sözlü bildiri, 5-9 Eylül 2012, Turkish Physical Society - 29th International Physics Congress-Nurol Kültür Merkezi – Bodrum/Muğla.

Baş, H 2007, *Günlük Hayatta Fizik*, sözlü bildiri, Ulusal Fizik Öğrencileri Kongresi (UFOK) 3 - Eskişehir Osmangazi Üniversitesi - Eskişehir.