

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TlGaSe₂ YARIİLETKEN KRİSTALİN
MEMRİSTİF ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

BUKET BİLGEN KANDEMİR
DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE
2020

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TlGaSe₂ YARIİLETKEN KRİSTALİN
MEMRİSTİF ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

BUKET BİLGEN KANDEMİR
DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. MİRHASAN SEYİTSOY

GEBZE
2020

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

**INVESTIGATION OF MEMRISTIVE
PROPERTIES OF CRYSTALLINE
SEMICONDUCTOR TlGaSe_2**

BUKET BILGEN KANDEMİR
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF PHILOSOPHY
DEPARTMENT OF PHYSICS**

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. MIRHASAN SEYITSOY

GEBZE
2020

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 23/01/2020 tarih ve 2020/5 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 21/02/2020 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Buket BİLGİN KANDEMİR'in tez çalışması Fizik Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. MirHasan SEYİTSOY



ÜYE : Prof. Dr. Savaş BERBER



ÜYE : Prof. Dr. Kemal ÖZDOĞAN (YTU)



ÜYE : Prof. Dr. Faik MİKAİLZADE



ÜYE : Dr. Öğr. Üyesi Ferhat DEMİRAY (İBU)



ONAY

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

ÖZET

Bu çalışmada akım tarama yöntemiyle farklı kontaklarla oluşturulmuş metal-TlGaSe₂ katmanlı p-tipi yarıiletken kristalin akım-voltaj (I-V) karakteristiği iki-prob ölçme yöntemiyle araştırılmıştır. İncelenen tüm kristal örneklerinde akım-kontrollü memristif etki ve anahtarlama gözlemlenmiştir. Gözlenen anahtarlama karakteristiğinin, deneysel olarak üretilen memristif sistemlere yakın olduğu görülmüştür. TlGaSe₂-metal yapıların voltaj tarama yöntemi ile kaydedilen I-V grafiklerinde Mott diyot parametreleri hesaplanmış ve kontak mekanizmasının metal-yalıtkan-yarıiletken mekanizma olduğu görülmüştür. Bu yapı metal-yalıtkan-yarıiletken-yalıtkan-metal (MISIM) sandviç tipi şeklindedir. Yapının voltaj tarama grafikleri Mott diyot hesaplamalarıyla uyumlu olduğu gösterilmiştir. Sandviç MISIM cihazın elektroforming uygulanarak kapasitans-voltaj (C-V) karakteristikleri incelenmiş, memkapasitif özellik gösterdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: memristör, akım-voltaj karakteristiği, kapasitans-voltaj karakteristiği, metal-yalıtkan-yarıiletken-yalıtkan-metal yapı (MISIM), TlGaSe₂ kristali.

SUMMARY

In this study, the current-voltage (I-V) characteristics of the TlGaSe₂ layered p-type semiconductor crystal an electric current which was passed through under the influence of the electric field was investigated by two-probe measurement method. Memory effect and threshold-type switching have been observed in all examined crystal samples. The observed switching characteristic of the crystals was found to be similar to the experimentally produced memristive systems. The Metal-TlGaSe₂-Metal Mott diode parameters were calculated in I-V graphics recorded with voltage scanning method and contact mechanism has been found to be a metal-insulatorsemiconductor mechanism. The structure is in type metal-insulator-semiconductorinsulator-metal (MISIM) sandwich. The voltage sweeping graphics of the structure have been shown to be compatible with Mott diode calculations. The capacitance-voltage (C-V) characteristics of sandwich type was investigated and memcapacitive properties revealed.

Key Words: memristor, current-voltage characteristics, capacitance-voltage characteristics, metal-insulator-semiconductor-insulator-metal structure (MISIM), TlGaSe₂ crystal.

TEŞEKKÜR

Benim ve pek çok meslektaşımın kendisini örnek aldığı, ömrünü bilime adanmış danışmanlarımdan Prof. Dr. Rauf SÜLEYMANLI'yı tez çalışmam esnasında kaybetmenin derin üzüntüsünü bütün ekip arkadaşlarımla yaşadık, kendisine son bir teşekkür etme fırsatım hiç olmadı. Saygı ve özlemle andığımı buraya not düşmek isterim.

Okula ilk kaydımдан itibaren bana karşı nezaketini elden hiç bırakmayan, her türlü sorularıma ziyadesiyle yön gösterici cevaplar veren sayın danışmanım Prof. Dr. MirHasan SEYİTSOY'a her şey için teşekkür ederim.

Öğrenim hayatımda emeği geçen bütün öğretmenlerime teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca desteklerini esirgemeyen, Arş Gör. Dr. Yasin ŞALE ve Arş Gör. Serdar GÖREN'e teşekkür ederim.

Varlıklarıyla bana güç veren annem Emine BİLGİN'e ve babam İzzet BİLGİN'e teşekkür ederim.

Kardeşim Dr. Öğr. Üyesi Nüket BİLGİN'e bana kattığı her şey için teşekkür ederim.

Hayat arkadaşım Kürşad KANDEMİR'e bana olan güveni, özverisi, desteği ve sabrı için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
TABLolar DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ	1
2. TLGASE ₂ KRİSTALİ	4
2.1. Kristal Yapı	4
2.2. Kristal Üretim Yöntemi	7
2.3. TlGaSe ₂ Kristalin Deneye Hazırlanması	9
2.4. Metal- TlGaSe ₂ Yarıiletken Kontağın Oluşturulması	10
2.5. TlGaSe ₂ Kristali Faz Geçişleri	12
2.6. Kristal Kusurları	13
2.6.1. Noktasal Kusurlar	13
2.6.2. Çizgisel Kusurlar (Dislokasyonlar)	14
2.6.3. Hacimsel veya Kütlesel Kusurlar	15
2.6.4. Düzelemsel ve Arayer Kusurları	15
2.7. Kusurların Etkileri	17
2.7.1. Donor veya Akseptör	17
2.7.2. Tuzak	17
2.7.3. Rekombinasyon	17
2.7.4. Optik Yakalama Merkezi	18
2.7.5. Saçılma Merkezi	18
3. KATILARDA İLETKENLİK	19
3.1. Yalıtkan ve Yarıiletken	19
3.2. İki Terminalli Doğrusal Olmayan Devre Elemanları	20
3.2.1. Kapasitör	22

3.2.2. Direnç	22
3.2.3. İndüktör	23
3.2.4. Memristör	23
3.3. Yarıiletkenlerde Elektriksel İletkenlik	27
3.4. Metal-Yarıiletken Kontakların Teorisi	30
3.4.1. Yüzey veya Arayüzey Durumlarının Etkisi	34
3.5. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları	36
3.5.1. Termiyonik Emisyon Teorisi	37
3.5.2. Difüzyon Teorisi	41
3.5.3. Genelleştirilmiş Kuram Termiyonik Emisyon-Difüzyon Torisi	43
3.6. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları	45
3.6.1. Elektrot-Sınırlı İletim Mekanizması	46
3.6.1.1. Schottky Emisyonu (Termiyonik Emisyon)	46
3.6.1.2. Fowler-Nordheim Tünellemesi	47
3.6.1.3. Doğrudan Tünelleme	49
3.6.1.4. Termiyonik Alan Emisyon	50
3.6.2. Katı-Sınırlı İletim Mekanizması	51
3.6.2.1. Poole-Frenkel Emisyonu	51
3.6.2.2. Atlamalı İletim	52
3.6.2.3. Omik İletim	53
3.6.2.4. Uzak-Yükü Limitli İletim	54
3.6.2.5. İyonik İletim	55
3.7. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken Kapasitör Oluşumu	55
3.7.1. Yığılma	56
3.7.2. Tükenim	57
3.7.3. Tersinim	57
4. MEMRİSTOR	58
4.1. Temel Memristör Parmak İzi	58
4.1.1. Memristör Modelleri	59
4.1.2. Chua'nın Memristör Modeli	60
4.1.3. Hp Memristör Modeli	61

4.2. Memristörde Elektriksel İletkenlik	64
4.3. Memristörün Akı-Yük İlişkisi	67
4.4. Memristörün Akım-Gerilim İlişkisi	68
4.5. Memkapasitör ve Memindiktör	69
4.6. Memkapasitör ve Özellikleri	73
4.7. Memindüktör ve Özellikleri	74
5. DENEYSEL PROSEDÜR	76
5.1. Kullanılan Cihazlar Ve Bilgisayar Programları	76
5.1.1. Pikoampermetre	76
5.1.2. Kreostat ve Vakum Pompası	77
5.1.3. Lakeshore	77
5.1.4. Elektrometre	78
5.1.5. Keithley 4200 SSC	79
5.1.6. Empedans Analizörü	79
5.1.7. Güç Kaynakları	80
5.2. DeneySEL Prosedür ve Veriler	80
5.2.1. Farklı Kontaklarla Üretilmiş Sandviç Yapıların Akım Tarama Verileri	81
5.2.2. In/ TlGaSe ₂ /Au Sandviç Yapısının I-V-T Verileri	94
5.2.3. In/ TlGaSe ₂ /Au Sandviç Yapısının C-V-T Verileri	99
6. SONUÇLAR	105
KAYNAKLAR	108
ÖZGEÇMİŞ	115
EKLER	116

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
A^*	: Richardon sabiti
A	: İletken kesit alanı
C	: Kapasitans
Cu	: Bakır atom sembolü
d	: Aktif katman kalınlığı
e	: Elektron yükü
E/ξ	: Elektrik alan
E_c	: İletkenlik bandı enerjisi
E_y	: Yasak enerji aralığı
E_v	: Valans bant enerjisi
ϵ_r	: Bağlı dielektrik sabiti
ϵ_0	: Boşluk geçirgenliği
ϵ_s	: Yarı iletken dielektrik sabiti
Φ_B	: Bariyer yüksekliği
Ga	: Galyum atomu sembolü
G	: Memdüktans
h	: Plank sabiti
I	: Akım
In	: İndiyum atom sembolü
J	: Akım yoğunluğu
J_{TE}	: Termiyonik emisyon akım yoğunluğu
J_{TED}	: Termiyonik difüzyon akım yoğunluğu
K	: Kelvin
k_B	: Boltzman sabiti
l	: Materyal uzunluğu
L	: İndüktans
m	: Kütle
m^*	: Etkin kütle
μ_e^*	: Elektronun etkin kütlesi

μ_h^*	: Boşlukların etkin kütlesi
μ_s^e	: Elektronun sürüklenme mobilitesi
M	: Memristans
n	: Taşıyıcı sayısı
n_m	: Elektron yoğunluğu (ileri besleme durumunda akım geçerken maksimum potansiyel enerjideki x_m konumunda bulunan)
n_0	: Elektron yoğunluğu (x_m konumunda denge durumunda ki elektron yoğunluğu)
N_C	: İletkenlik bandı etkin durum yoğunluğu
N_D	: Donör yoğunluğu
O	: Oksijen atomu sembolü
Pt	: Platin atom sembolü
R	: Direnç
ρ	: Elektriksel iletkenlik
q	: Elektriksel yük
Se	: Selenyum atomu sembolü
t	: Zaman
T	: Sıcaklık
Tl	: Talyum atom sembolü
Ti	: Titanyum atom sembolü
V	: Voltaj
v_T	: Termal hız
v_d	: Taşıyıcı sürüklenme hızı
v_R	: Etkin yeniden birleşme hızı
v_i	: İyonlaşma hızı
w	: Tükenim bölgesi genişliği
Ψ	: elektron potansiyel
AC	: Alternatif akım
DC	: Doğru akım
HRS	: Yüksek direnç durumu
LRS	: Düşük direnç durumu
MS	: Metal -yarıiletken
MOS	: Metal-oksit-yarıiletken

MIS : Metal-yariiletken-yalıtkan
MISIM : Metal-yalıtkan-yariiletken-yalıtkan-metal

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: TlGaSe ₂ yarıiletken bileşikleri faz diyagramı.	4
2.2: TlGaSe ₂ kristal yapısı.	6
2.3: TlGaSe ₂ kristal örgü görüntüsü.	6
2.4: Bridgman-Stockbarger tekniği.	9
2.5: Kristalin holder (tutucu) üzerindeki konumlarının; a) önden görüntüsü, b) şematik çizimi, c) arkadan görüntüsü.	11
2.6: F-tipi TlGaSe ₂ kristalinin tabakalarına paralel yüzeylerine Au-In kontak yapıldığında oluşan sandviç yapısı.	12
2.7: a) Atomsal boşluk, b) arayer (interstitial) atomu, c) küçük yeralan (substitutional) atomu, d) büyük yeralan atom, e) Frenkel kusuru, f) Schottky kusuru.	14
2.8: a) Kristal bölgeyi birbirinden ayıran ikiz sınırı, b) Mükemmel kristal, c) İkizlenmeden dolayı atomlardaki ötelenme.	16
2.9: Tane sınırları.	16
3.1: Yük q, akım I, voltaj v, magnetik akı Φ arasındaki mümkün ilişkiler.	21
3.2: a) Temel devre elemanları ilişkileri, b) Aristo'nun madde teorisi.	24
3.3: Memelementlerin sembol gösterimi.	27
3.4: Elektrik alanda boşluk ve elektronların hareketi.	30
3.5: Kontak oluşumundan önce metal p-tipi yarıiletken enerji diyagramı.	31
3.6: a) Schottky bariyer, b) Mott bariyer, i) yük yoğunluğu, ii) elektrik alan büyüklüğü, iii) elektrostatik potansiyel.	34
3.7: Engel üzerinden elektronların termiyonik emisyonla geçişini gösteren enerji bant diyagramı.	38
3.8: Dielektrik filmlerde iletim mekanizmalarının sınıflandırılması.	46
3.9: Metal-Yalıtkan-Yarıiletken yapıda Schottky emisyon enerji bant diyagramı şeması.	47
3.10: a) MIS yapının Fowler-Nordheim tünellemesinin şematik enerji bant diyagramı, b) elektron dalgasının bariyerden geçişi.	48
3.11: MIS yapıda doğrudan tünelleme enerji bant diyagramı.	50

3.12:	a) MIS yapıda termiyonik akım emisyonu enerji bant diyagramı şeması, b) Termiyonik emisyon, alan emisyonu ve termiyonik-alan emisyonu kıyaslaması.	50
3.13:	MIS yapıda Poole-Frenkel emisyonu şematik gösterimi.	52
3.14:	MIS yapıda atamalı iletim enerji bant diyagramı.	53
3.15:	MIS yapıda omik iletim bant diyagramı.	54
4.1:	Dış elektrik alanının etkisi altında, a) Boşluklar, düşük direnç oluşturmak için cihaz hacmi boyunca dağıtılır, b) Boşluklar genişir ve yüksek direnç oluşturmak için bir uç plakaya biriktirilir.	59
4.2:	Memristör uygulamaları sınıflandırması.	60
4.3:	Chua'nın memristör modeli.	61
4.4:	Chua'nın memristör sembolu ve φ - q eğrisi	61
4.5:	HP Laboratuvarında üretilen çapraz mimari memristör ve fiziksel iç yapısı.	62
4.6:	Memristörün iç yapısında oksijen hareketleri.	63
4.7:	HP modelinin I-V grafiği	64
4.8:	Yapının a) forming, b) Yüksek direnç, c) düşük direnç durumu.	65
4.9:	Memristöre ait yük-akı karakteristiğine üç farklı örnek.	67
4.10:	Memristörün akım-gerilim karakteristiğinin frekansa bağlılığı.	68
4.11:	a) Williams'ın tanımladığı memristör I-V eğrisi, b) $q(t)$ - $\varphi(t)$ arasındaki tek değerli ilişki, c) farklı I-V altında, yeşil eğri eşitliğin sağındaki ikinci terim için, mavi eğri ise eşitliğin sağındaki ilk ve ikinci terimin toplamıdır, d) memkapasitör q - v eğrisi, e. $\sigma(t)$ - $\varphi(t)$ arasında ki tek değerli ilişki, f) farklı $\sigma(t)$ ve $\varphi(t)$ altında, yeşil eğri eşitliğin sağındaki ikinci terim, mavi eğri eşitliğin sağındaki ilk ve ikinci terimin toplamıdır, g) memindüktörün $I(t)$ - $\varphi(t)$ eğrisi, h) Farklı $I(t)$ - $\varphi(t)$ altında, yeşil eğri eşitliğin sağındaki ikinci terim, mavi eğri eşitliğin sağındaki ilk ve ikinci terim toplamıdır. Basitlik açısından bütün hesaplamalarda A ve w terimlerinin ikiside 1 alınmıştır.	70
4.12:	Memristör su borusu analogisi.	72
4.13:	Memkapasitörün yük-gerilim karakteristiğinin frekansa bağlılığı	74

5.1:	Keithley 6485 modeli pikoampermetre.	76
5.2:	Janis kapalı helyum kreostatu	77
5.3:	Lakeshore 340 model sıcaklık kontrol cihazı.	78
5.4:	Keithley 6517A elektrometre cihazı.	78
5.5:	Keithley-4200 yarıiletken karakterizasyon sistemi.	79
5.6:	HP4192A empedans analizörü.	80
5.7:	Güç Kaynakları.	80
5.8:	Deney düzenek şeması.	81
5.9:	140 ve 300 K. olmak üzere iki farklı sıcaklıkta akım tarama yöntemiyle ölçülen farklı etiketlenmiş TlGaSe_2 örneklerinin I-V karakteristikleri; Oklar, tarama yönünü göstermektedir.	84
5.10:	a) ve b) F-tipi TlGaSe_2 örneğinin I-V karakteristikleri, tabakaların paralelinde kristalin üst yüzeyinde biriken Au-In metalik elektrotları ile mevcut tarama yönteminde gerçekleştirildi. I-V karakteristikleri logaritmik ölçekte görüntülenip farklı sıcaklıklara karşılık gelmektedir. Oklar, taramanın yönünü gösterir; c) Şekil 5.9:(a-b)'deki farklı süpürme yönü için “gaga” pozisyonunun sıcaklık bağımlılıkları.	87
5.11:	Farklı TlGaSe_2 kristalleri için 300 K de akım tarama metoduyla elde edilen sıkıştırılmış histerisiz eğrileri.	88
5.12:	F işaretli Au-In TlGaSe_2 örnekleri 300 K'de farklı zamansal adımlarla (1 μs , 10, 100 ms, 1 s) akımın uygulanmasıyla elde edilen I-V karakteristikleri.	90
5.13:	a) K-tipi TlGaSe_2 örneğinin, katmanlara dik kristalin üst ve alt yüzeylerinde biriken Au-In metal elektrotları ile deneysel I-V özellikleri. Ölçümler akım tarama yönteminde gerçekleştirildi. I-V özellikleri iki farklı sıcaklıkta doğrusal ölçekte gösterilir; 140 ve 300 K. Tarama yönü negatiften pozitif değerlere kadardır; b) Seri dirençli diyot modeline göre montaj sonuçları. Hesaplamalar Denklem (6.5) kullanılarak yapıldı. Fiting parametreleri şekilde gösterilmiştir.	92
5.14:	300 K sıcaklığında In/ TlGaSe_2 /Au Mott bariyer diyot. Au-In üst ve In-Au alt metal elektrot. Deneysel (siyah çizgi), Schottky (kırmızı)	

düz çizgi) ve fit (kırmızı noktalı çizgi) akım-voltaj karakteristiği, a) elektroforming işleminden önce, b) elektroforming işleminden sonra.	95
5.15: In/TlGaSe ₂ /Au kristalinin 80 K' de I-V eğrisi. a) elektroforming öncesi, b) elektro-şekillendirme sonrası, logaritmik I-V grafiği.	97
5.16: Oda sıcaklığında In/TlGaSe ₂ /Au cihazın ölçülen (siyah) sonuçları ve Mott bariyer diyot teorisine göre fitting eğrisi (kırmızı). 500 Hz'de ölçüldü. Yüklenme, boşalma ve tersinin bölgeleri.	100
5.17: In/TlGaSe ₂ /Au cihazının farklı elektroforming voltajlarından sonra deneysel C-V karakteristiği. Veriler 500 Hz frekansta 300 K'da kaydedildi. Elektroform süreci boyunca, a) pozitif forming voltajı Au-In üst elektrota uygulandı, b) negatif forming potansiyeli Au-In üst metal elektrota uygulandı. Au-In üst metal elektroduna uygulanan forming potansiyelinin işaretine bağlı olarak C-V eğrileri üzerinde ters voltaj besleme bölgesinden ileri doğru bariyer diyot kapasitansındaki değişiklikler.	102
5.18: In/TlGaSe ₂ /Au sandviç yapısının 60-300 K sıcaklık aralığında 500 Hz frekansta C-V grafikleri. Sıcaklık artışı 20 K olarak ayarlandı. Elektroforming işlemi Şekil 5.17'deki gibi uygulandı. a) Au-In üst metal elektrot +30 V sabit gerilimde tutulmuştur, b) Au-In üst metal elektrot sabit -30 V negatif voltaj uygulandı.	104

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: TlGaSe ₂ katmanlı kristalinin örgü sabitleri ve eksenler ve arasındaki açılar.	5
3.1: Dört temel devre elemanın I-V ilişkisi	21

1. GİRİŞ

Bu tez kapsamında TiGaSe_2 katmanlı p-tipi yarıiletken kristalinin memristif özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda farklı TiGaSe_2 kristali yüzeyleri farklı metallerle kontaklanan bu numunelerin akım-gerilim ve kapasitans-gerilim karakteristiğinin sıcaklığa bağlı değişimi incelendi. Elektrik alan etkisi altında, akım-kontrollü gerilim taraması ve tam tersi voltaj-kontrollü akım taraması yapılmıştır. Elde edilen veriler incelendiğinde akım-gerilim karakteristiğinde histerisis gözlenmekte olup, memristif özellikler gösteren eşik tipi anahtarlama özelliklerinin var olduğu ortaya koyulmuştur. Elektroniğin en temel devre elemanları deyince ilk aklımıza gelen iki terminalli pasif devre elemanları olup bunlar direnç, kondansatör, indüktördür. 1971 yılında Leon Chua California Üniversitesi'nde yaptığı çalışmalarda bu devre elemanı ailesine bir üye daha eklenmesi gerektiğiyle ilgili kuramsal bir öneride bulunmuştur. 5 Eylül 1971'de Circuit Theory dergisinde yayınlanan makalesine göre voltaj, yük, akım ve manyetik akının birbirleriyle basit diferansiyel denklemlerle ifade edilebilen ilişkilerden (akım-gerilim arasındaki ilişki; direnç, yük-voltaj arasındaki ilişki; kapasitör, akım-manyetik akı arasındaki ilişki; indüktör diye adlandırılan devre elemanları olarak tanımlanır.) yola çıkarak eksik dediği devre elemanını yine basit bir diferansiyel denklemle tanımladı [1]. Chua bu yeni devre elemanının temelde bir direnç olduğunu ancak cihaz üzerinden akan yük miktarına bağlı olarak direnci değişen bir cihaz olduğunu fark etti. Dolayısıyla cihazın bir hafızası olduğunu önerdi ve kayıp devre elemanını İngilizce sözcükler olan *memory* (hafıza) ve *resistor* (direnç) kelimelerinden yola çıkarak “*Memristor*” olarak adlandırdı. Çünkü kayıp olarak nitelendirdiği bu devre elemanının belleği (*memory*) vardı ve bir direnç (*resistance*) gibi davranmaktadır. Fakat hafızalı direnç yeni bir şey değildi. Geçici olmayan bellek örneği alırsak, Bernard Widrow'un “*memistör*” adlı yeni bir devre elemanı ortaya çıkardığı 1960'a kadar uzanır [2]. Memistor adını seçmesinin nedeni tamamen memristorle aynı sebepten kaynaklanmaktadır. Memistor üç terminale sahiptir ve direnci akım sinyalinin zamana bağlı integrali ile kontrol edilmektedir ve bu da memistorün direncinin yük tarafından kontrol edildiği anlamına gelmektedir. Bununla birlikte, memristor tam olarak nanoölçek araştırmacılarının aradıkları şey değildir. Çünkü sadece yük kontrollü üç terminalli (transistörlü) bir cihazdı. Buna ek olarak, iki terminalli bir nano-cihaz, üç-terminal nano-cihazlardan

[3] daha avantajlı olan nano ölçekli hizalama olmadan imal edilebilmektedir. Dahası, elektrokimyasal memistörler, katı hal entegre devrenin ortaya çıkma eğilimine olan ihtiyacı karşılayamamaktadır. 1968’de Fano elektromanyetik teori konseptinde yazdığı kitapta temel devre elemanları sayısını; direnç, kondansatör, indüktör ve “bilinmeyen devre elemanı” olarak dörde çıkardı. Kısa bir süre sonra Chua, Maxwell denklemleri ile dördüncü devre elemanını teorik olarak açıklamıştır ve çok geçmeden Kang ile birlikte memristif özellik gösteren yeni bir sınıf olarak memristör ailesine (mem-element) yeni elemanlar ekleneceğinin ilk sinyallerini vermektedir [4]. 1990’da Thakoor ve arkadaşları kalıcı hafızalı tungstenoksit tabanlı katı hal ince film bulduklarını bildirmektedir [5]. Bunun konsepti HP memristörle neredeyse aynıdır. Bu katı hal memistör elektriksel olarak programlanabilir, değişken dirençli ve elektriksel nötr ağlarda kullanılabilen bir analog sinaptik hafıza bağlantısıdır [5]. Chua’nın bu kuramsal önerisinden 37 yıl sonra *Hewlett-Packard Şirketi (HP)* mühendislerinden Stanley Williams önderliğinde bir grup mühendis 2008 yılında kayıp devre elemanını bulduklarına dair makaleyi *Nature Dergisi*’nde yayımladı [6]. HP mühendisleri bu makalede laboratuvarlarında geliştirdikleri bir memristörü de sundular. Pt/TiO₂/Pt yapısında iki Pt film arasına saf TiO₂ ve oksijenden azaltılmış TiO_{2-x} bölgeleri oluşturmuşlardı. Katkılanmış ve katkılanmamış bölgelerin toplam kalınlığı birkaç nm mertebesindeydi. İşte bu buluşu yapmalarının da en temel sebebi burada yatmaktadır nano ölçekte işler son derece küçük değişimlere bağlıdır. Bu nedenledir ki makro boyutta insanlığın dikkatinden kaçan bir detay nanoteknoloji çalışmaları ile dikkat çekmektedir. Memristor, wired.com tarafından “2008’in devrim yaratan on teknolojisi” listesine de dahil edildi. Memristörün dördüncü temel devre elemanı olarak sahneye çıkışının en önemli katkısının bilgi teknolojisine olacağı düşünülmektedir. Kendi kalıcı iç belleği olacağından anında açılıp kullanılabilecek bilgisayarlar ki memristörlü bir bilgisayar gerilimi anımsayabildiğinden tekrar açıldığında kaldığınız yerden devam etmenize olanak sağlayabilecektir [7]. Ve insan beyni gibi analog çalışan, öğrenebilen, konuşulani anlayan yeni nesil bilgisayarlar yapılması artık mümkün görünmektedir. Yapılan araştırmanın erken sinir ağlarının modellenmesi matematiği ile ilgili daha büyük bir projenin parçası olduğunu belirtmek ilginçtir [8]. 2008 yılında yayımlanan bahsi geçen makalenin ardından araştırmacılar, farklı sistemlerde memristörlerin varlığını araştırmaya devam etmektedir. Bu bağlamda kaotik devre araştırmaları hakkında pek çok makale yayımlanmıştır [9] - [12]. Memristör elektronikte yeni bir dalga gibi yayılırken transistörlerin yerini alması

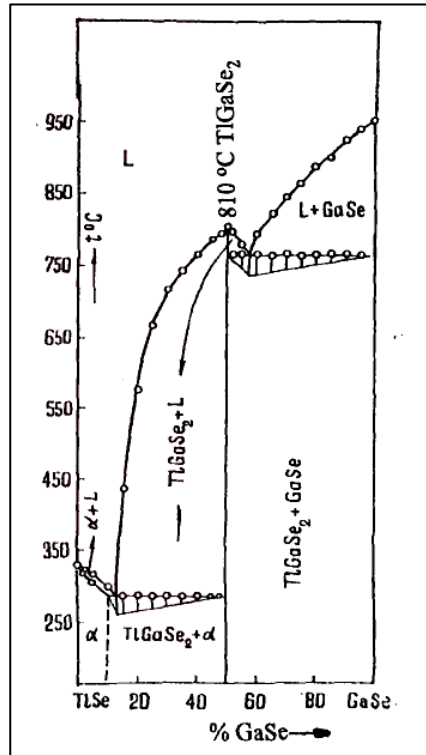
pek de mümkün görünmemektedir ancak daha küçük alana daha fazla bilgi depolayabileceği aşikardır. Gelecekte memristörün, sinaps rolünü oynayacağı ve hayvan sinir sistemlerinde modellenen “nöromorfik” bilgisayarların temeli olacağı düşünülmektedir. Bilgi teknolojilerinde depolama gereksinimin sonsuzluğu sonlu bir depolama sisteminde tıkanıklığa uğramaktadır ancak RRAM tabanlı memristörler üç boyutlu üretilerek daha az yer kaplayan yeni bir mimarı ile karşımıza çıkacağı düşünülmektedir. Buna ilaveten amip tek hücrelisinde varlığı daha önceden bilinen memristör 2014’de Plant Signaling&Behavior dergisinde Volkov ve arkadaşlarının yayınladığı makale ilk defa bitkilerde bulunmuş oldu [13]. Yakın zamanda *Venus sinekkapan*, *küstüm çiçeği (Mimosa pudica)* ve *Aloe vera* bitkilerinin elektrik devrelerinin araştırıldığını ve memristörün varlığının bulunduğunu ortaya çıkaran çalışmalar yapıldı [14] ve analitik bir model geliştirildi [15]. Nöromorfik devrelerde sinaps olarak memristörlerin kullanılması, verimli hesaplama için gerekli olan hem yüksek bağlantı hem de yüksek yoğunluk sunabileceği gösterildi [16]. Memristörün pek çok alanda akım-gerilim sıkıştırılmış (pinched) histerisis eğrisi olarak görünmesi biyoloji, kimya, fizik vb. gibi pek çok birbirinden bağımsız alanlarda yayımlandı ve gaz deşarj arkları, cıva lambaları, güç dönüşüm cihazları gibi pek çok ilgisiz fenomende gözlemlendi. Bu cihazlar genellikle doğrultucu tip akım-gerilim karakteristiği sergilemektedir [17]. Bu çalışmaların; hafıza, öğrenme ve kendiliğinden davranışı taklit eden nöromorfik cihazlar, sirkadiyen ritimler ve biyolojik saat mekanizmalarını anlamak için bir başlangıç noktası olabileceğine inanılmaktadır. Çeşitli araştırma gruplarının çalışmaları devam etmektedir [18] - [21].

Bizim çalışmamızda, nano yapılarda görülen memristif özelliklerin hacimsel yapı olarak niteleyebileceğimiz milimetre ölçeğindeki TlGaSe₂ kristalinde gözlemleri araştırıldı. MISIM sandviç yapının, akım tarama, voltaj tarama ve kapasitans ölçümleri yapıldı. Memristörün parmak izi olan sıkışmış histerisis eğrisi gözlemleri çalışmaya yeni yönler verip araştırmamızı genişletmemize yol açtı. Elektroforming işleminin grafiklerde gözlemlenen etkisi cihazın geçmişini hatırladığını açıkça göstermektedir. Nanoyapılarda gözlemlenen memristif özelliğin milimetre ölçeğinde hacimsel yapıda gözlemlenmesi çalışmanın önemini göstermektedir.

2. TlGaSe₂ KRİSTALİ

2.1. Kristal Yapı

$A^3B^3C_2^6$ tip yarıiletken bileşikler zincirli-tabakalı kalkojenit üçlü yarıiletken bileşikler diye adlandırılır. Verilen kimyasal formülde B üçüncü grup metallerinin üç değerlikli katyon iyonlarından iken C atomu ise tek değerlikli kalkojen iyonlarıdır. A^3C^6 ve B^3C^6 ikili faz diyagramlarının bölümleri üzerine tesis edilir. A^3C^6 ve B^3C^6 bileşikleri zincirli veyahut tabakalı yapıda kristalleşmektedir. Bu yarıiletken bileşiklerden, tek kristal yapı elde edilebilmesi için erime sıcaklığı ve bileşiğin karşılıklı çözünürlüğü gibi verilerin bilinmesi gerekir. TlGaSe₂ p-tipi yarıiletken bileşiklerinin kaliteli bir kristal elde edilebilmek için eriyiğin tabiatının bilinmesi elzemdir. TlGaSe₂ tek kristali için bu veriler konsantrasyon aralığı 0-100 arasında olan TlSe – GaSe ikili faz diyagramlarından elde edilir. TlGaSe₂ için erime sıcaklığı $810 \pm 5^\circ\text{C}$ ’ dir ve Şekil 2.1’den görüleceği gibi %50-50 konsantrasyon aralığında TlGaSe₂ fazı mümkündür [22].



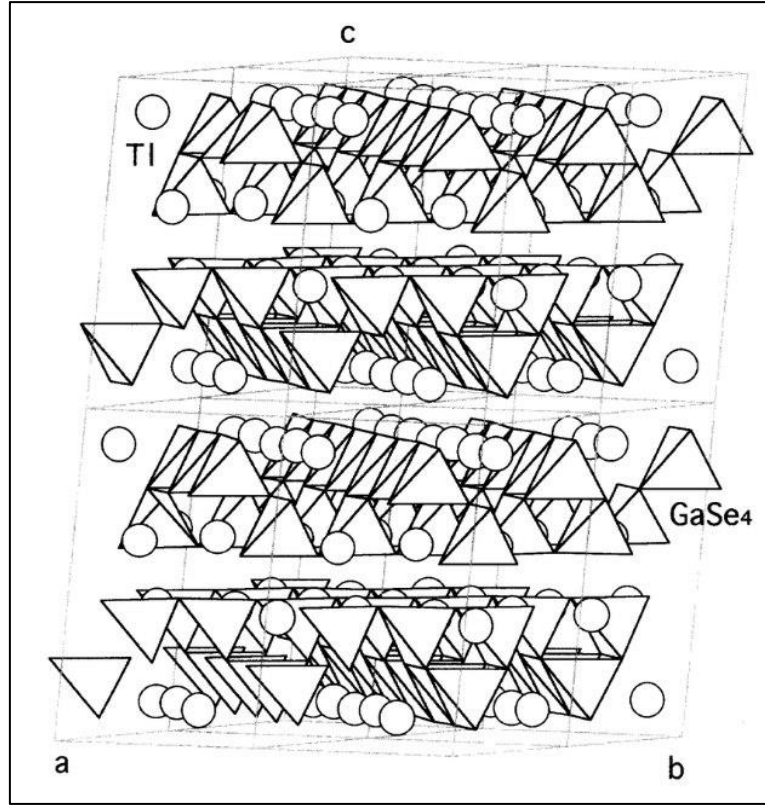
Şekil 2.1: TlGaSe₂ yarıiletken bileşikleri faz diyagramı.

TlGaSe₂ kristali oda sıcaklığında C_{2h}^6 (C2/c) uzay-grup simetrisine sahip monoklinik yapıdadır [23]. Birim hücrede 64 atom (16 Tl - 16 Ga - 32 Se) ile kararlı bir kristal yapıdadır. Kristal köşelerine metal-kalkojen tipi atomların bağlı olduğu Ga_4Se_{10} tetrahedrallerinden oluşmaktadır. Yan yana gelen ardışık bu tetrahedrallerin köşelerinde Se atomları bulunmaktadır. Tl-atamları, tetrahedral komplekslerin bir tabaka halinde birleşmesinden kaynaklanan trigonal prizmatik boşluklar içinde yerleşmektedir (Şekil 2.2) [24]. Ardışık tetrahedral tabakalar birbirlerine göre 90 derece dönüktürler. TlGaSe₂ yarıiletken monoklinik kristali deforme olmuş tetragonal yapı olarak düşünülebilir. Monoklinik TlGaSe₂ kristal yapılarının katmanlı anizotropik olmalarından, tabakalar arasında Van der Waals bağı [25], tabakalar içinde ise iyonik-kovalent bağı varlığı söz konusudur. Kristali meydana getiren atomlar arası mesafeler 3.45 Å (Tl-Se), 3.92 Å (Se-Se) ve 3.42 Å (Tl-Tl) olarak elde edilmektedir [26]. Kristal direk bant geçişine sahip olup bant aralığı, oda sıcaklığı civarında yaklaşık 2.1 eV'dur [27].

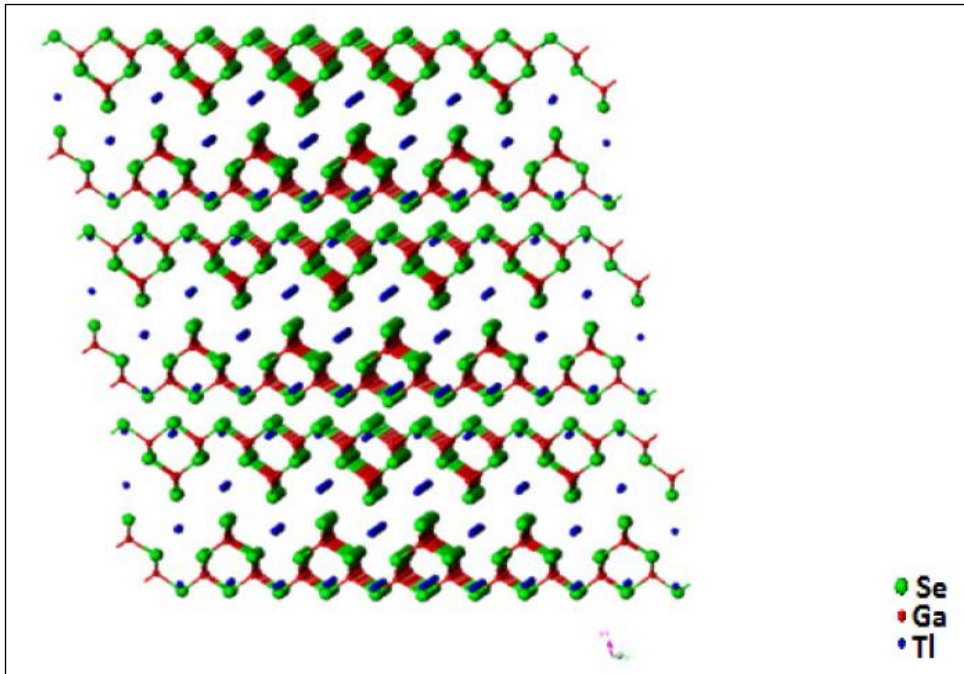
Tablo 2.1: Deneyde kullanılan TlGaSe₂ katmanlı kristalinin Bravais kafesi için ilkel temel vektörleri ve eksenler arasındaki açılar.

Kristal	Kristal Yapısı	a (Å)	b (Å)	c (Å)	β
TlGaSe ₂	Monoklinik	7.7486	7.7486	15.8503	89.8911

TlGaSe₂ kristallerinin yoğunluğu piknometrik yöntem ile ölçülüp 6.34 gr/cm³ olarak verilmektedir [28]. Kristal yarıiletken özellik göstermektedir [22]. Kristal oda sıcaklığında paraelektirik fazda ve monoklinik yapıdadır. Kristalin örgü görüntüsü Şekil 2.2-3'de gösterildi [29]. Kristal transparandır yani ışığı geçirebilir, katmanları ise yansıtıcı yüzey özelliği gösterir. TlGaSe₂ kristali koyu kırmızı renginde, saydam, çok sert, kırılman ve katmanlı yapıya sahip p-tipi kalkojen yarıiletken grubunda tanımlanan kristaldır.



Şekil 2.2: TlGaSe₂ kristal yapısı.

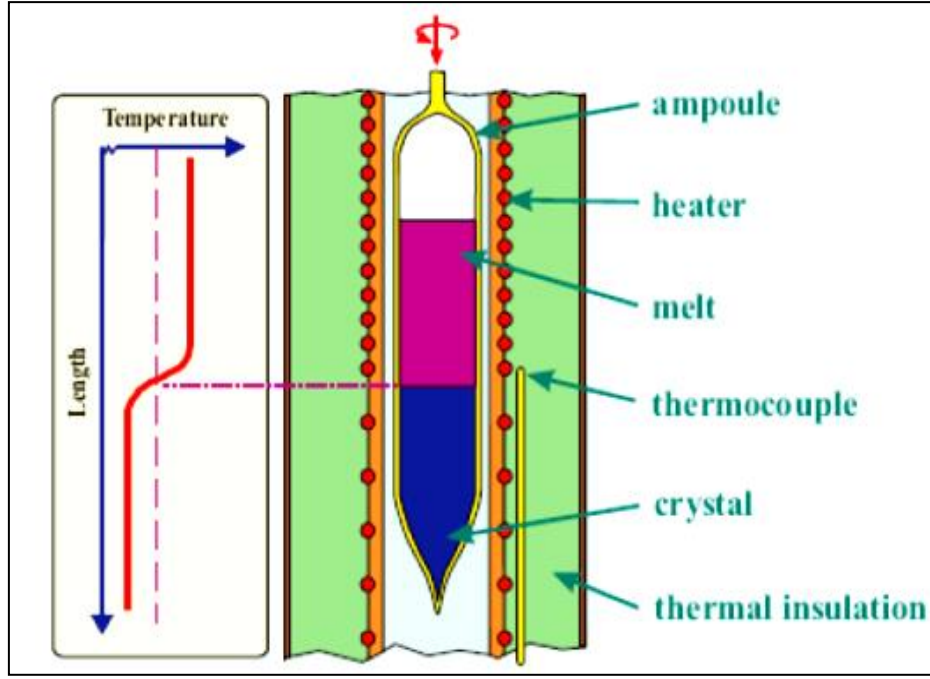


Şekil 2.3: TlGaSe₂ kristal örgü görüntüsü.

2.2. Kristal Üretim Yöntemi

TlGaSe₂ kristali ismini Percy Williams Bridgman ve Donald C. Stockbarger'den alan *Bridgman-Stockbarger* yöntemi ile üretildi. *Stockbarger* metodu ile kristal büyütme işlemi *Bridgman* tekniğinin geliştirilmiş halidir. *Stockbarger* tekniğinde ampul ve fırın sabit kalıp fırın tüpünün sıcaklık gradyenti belirli adımlarla düşürülmektedir. *Bridgman* metodunda ise kristal, fırın tüpü boyunca oluşan sıcaklık gradyenti boyunca yatay (yatay *Bridgman*) ve düşey (düşey *Bridgman*) olarak hareket ettirilebilmektedir. *Bridgman-Stockbarger* tekniği malzemenin özel tüpler içinde erime noktasına kadar ısıtılması ve çok yavaş hızlarda soğutularak kristalin elde edilmesi prensibine dayanmakta olup Şekil 2.3'de gösterildi. Ampul tasarımı TlGaSe₂ kristal büyütme sürecinde büyük önem taşımaktadır. Kuvarz ampulün koni uzunluğu kaliteli kristal büyümesinin önemli bir parçasıdır. Ampul uzunluğu ~10 cm ve ampulün iç çapı ~1 cm olarak ayarlanır. Az kirlilik içeriyor olmasına rağmen kullanılacak ampullerin önceden temizliği önemlidir, eğer temizlik yetersizse safsızlıklar kristal büyüme sürecini etkilemektedir. Ampul temizliği için piyasada bulunan 4-metil-3-nitro-benzoik asit (%99 saflıkta) kullanıldı. Kristal üretimi için gerekli elementler %99.9999 saflıkta seçilerek eşdeğer molekül oranında tartılarak kuvarz ampul içine yerleştirilir. Elementlerin uçuculuğu ve büyüme ampulü ile etkileşimini düzeltmek için stokiometri Tl:Ga:Se (1:1:2) oranları düzeltmesi yapılmıştır (~%2 Se'nin fazlası alındı). Konulan maddelerin oksitlenmemesi amacıyla ampul, difüzyon pompası yardımı ile ~10⁵ Atm mertebesinde vakumlandı. Mekanik bir motor yardımıyla, ampul düzgün eriyik karıştırma işlemi için döndürülmüştür. Bu ampulün uçları oldukça ince ve orta kısım ile ise boğumludur. Kristal oluşumu uç kısımlarda başlamaktadır. Ampul içinde, önce yaklaşık 950⁰C altında bir ön sentez yapılarak polikristal malzeme şekli oluşması sağlandı. Sentezlenen polikristal TlGaSe₂ malzemesi altta bir ucu özel olarak tasarlanan kuvars ampule yüklenir. Kuvars ampul tekrar ~10⁻⁶ Atm basınca konur. Daha sonra ampul değişken (gradyent) sıcaklık alanına sahip fırına yerleştirilir. Fırın, yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru sıralanmış üç bölgeden oluşmaktadır. Fırın sıcaklığı oda sıcaklığından ~2 K/saat'lik bir hızla ~1150 K'ya kadar yükseltilir. TlGaSe₂ malzemenin erime sıcaklığı ~1053 K'dır. Yüksek sıcaklık bölgesinde maddelerin erimesini sağlamak amacıyla bir veya iki gün bekletildi. Malzeme tamamen eridikten sonra, ampul kademeli çeviri hareketi

ile ~ 5 mm/gün oranında sıcaklık gradyan bölgesi boyunca indirilir. Daha sonra fırın özel mekanizma aracılığıyla saatte 1-2 mm hızla hareket ettirilerek ampul daha düşük sıcaklıktaki ikinci bölgeye geçirilir. Kaliteli kristaller elde etmek için bu hız minimum tutulmalıdır. Kristalleşme ilk olarak bu bölgenin sivri olan ucunda başlar ve böylelikle kristalizasyon merkezi oluşur (Şekil 2.4) [30]. Ampul bir sonraki bölme olan daha düşük sıcaklıktaki üçüncü bölmeye geçtiğinde büyütülmüş kristal kademeli olarak tavlansaktadır. Kristal büyütmek için genellikle yaklaşık $25^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ sıcaklık gradyenti uygundur. Kristalin özelliklerine göre sıcaklık gradyenti adım adım oda sıcaklığına düşürülerek işlem sürdürülür. Ampul sürekli soğuk bölgeye geçtiğinde kristalleşme bütün hacme yayılır. TlGaSe_2 kristali kendi kendine çekirdekleşme işlemiyle büyütülmüştür. Katılaşmanın sağlanması amacıyla ampul, fırın içinde oda sıcaklığında 24 saat bekletilir. Böylece optik olarak kaliteli ve şeffaf TlGaSe_2 kristal büyütmeye işleminin tamamı yaklaşık 5-6 gün sürmektedir [31]. İncelediğimiz TlGaSe_2 kristalleri %99.999 saflıkta üretildi. Bölüm 5.2.1’de verilerini sunacağımız farklı kontaklarla incelenen 3 farklı etiketle ayırdığımız kristallerin element oranları şu şekildedir: Y ve Kh etiketli kristal bileşenleri benzer orandadır; Tl (%28.87), Ga (%26.23), Se (%44.90) ve F-kristali Tl (%22.58), Ga (%26.58), Se (%50.84) şeklindedir. Görülebileceği gibi F-kristali Tl azaltılmış ve Se atomlarınca daha yoğundur. Kullanılan kristaller Azerbaycan Ulusal Bilimler Akademisi Fizik Enstitüsü Optoelektronik Laboratuvarı’nda büyütülmüştür yalnız F-kristali Almanya’da bir laboratuvardan alındı.



Şekil 2.4: Bridgman-Stockbarger tekniği.

2.3. TlGaSe₂ Kristalinin Deneye Hazırlanması

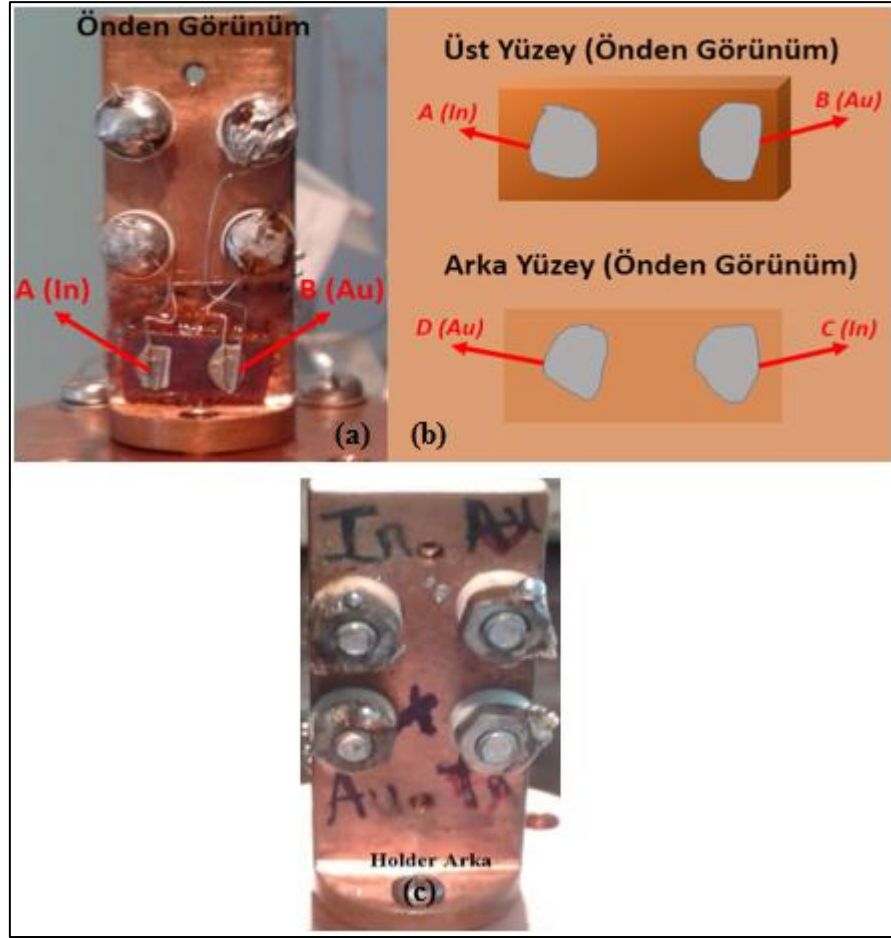
Kristalin kırılğan ve katmanlı yapıda olmasından dolayı tamamen sabitlenerek kesilmesi gerekmektedir. Bunun için kristal, sıcak halde sıvı olan ve çok kısa sürede donan özel bir karışımla sabitlendi. Bu malzemenin özelliği çok kısa sürede donması ve aseton ile kolayca çözülmesidir. Karışım kristalin üzerine eritilerek damlatılıp, kristalin etrafında kristali sabitleyerek tekrar donmuştur. Böylece kristal kesilirken yerinden oynamaz. Kristal katmanlarına dik olacak şekilde elmas uçlu kristal kesme makinesi ile 2x3 mm² yüzey alanı ve ~500-750 µm kalınlık ölçülerinde kesildi. Kristal aseton banyosunda tutularak bu malzemeden ayrıldı.

Üzerinde çalıştığımız kristalin güzel bir özelliği katmanlı paralel (001) bir yapıya sahip olmasıdır. Katmanlar arası bağlar (Van der Waals etkisi) sıkı olmadığı için dikkatlice üst tabakanın ayrılması sonucu ortaya çıkan yüzey oldukça temizdir. TlGaSe₂ katmanlı kristallerinin ayrılan yüzeyleriyle atmosfer gazlarının arayüzey formasyonu incelendi. Sonuç olarak oda sıcaklığında TlGaSe₂ katmanlı tek kristallerinin atomik temiz yüzeylerinde ortamdaki O₂'ne göre düşük aktiviteli nitrojen ve su buharının yüzeye tutunamadığı tespit edildi [25]. Bu yüzden ayrıca bir temizleme

işlemine tabi tutulmasına gerek duyulmadı. Bunun temel sebebi ise yüzeyde boşta kalan bağ olmamasıyla açıklanabilir.

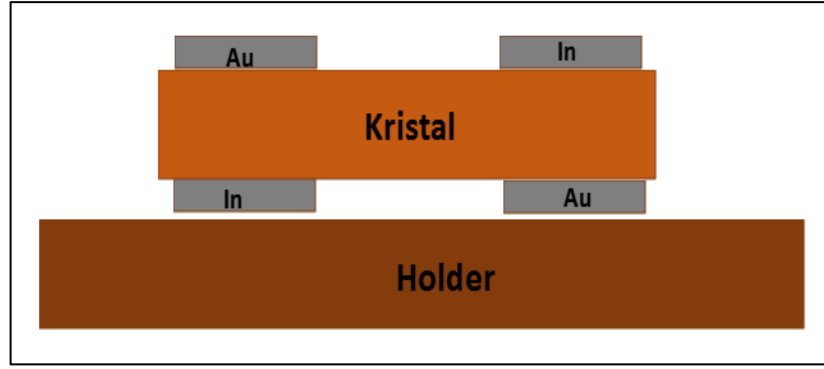
2.4. Metal-TlGaSe₂ Yarıiletken Kontakın Oluşturulması

Metal/yarıiletken eklemeleri (100) yöneliminde ~500 µm kalınlığında tek TlGaSe₂ tek kristal yüzeyine imal edildi. İmalat işlemi için, TlGaSe₂ alttaşı organik bir çözücü içinde yağdan arındırıldı. İlk önce her biri 5 dakika boyunca ılık trikloroetilen aseton ve metanol ile yağdan arındırıldı ve son olarak kısa bir süre deiyonize su içine bastırıldı. Daha sonra TlGaSe₂ alttaşı elektrik kontakların imalatını yapma üzere termal buharlaştırma işlemi için sistemin tungsten tutucusuna monte edildi. Yüksek saflıkta (%99.9999) Au-metal $\sim 2000 \text{ Å}$ kalınlığında olacak şekilde 10^{-7} mbar basınçta TlGaSe₂ alttaşının plakalara paralel yüzlerine maske (B ve D işaretli) kullanılarak buharlaştırıldı ve iyi bir kontak oluşturmak için ~10 dakika boyunca 400°C'de tavlantıdır. Buharla biriktirme işleminden sonra, numuneler yüzeyde kalan kiri uzaklaştırmak için hızlı bir şekilde izopropil alkol ile durulandı. Daha sonra ~2 mm çapında ve ~2000 Å kalınlığında dairesel nokta şeklinde doğrultucu kontakları oluşturmak için saflık oranı yüksek (99.999 saflıkta) In ve Cu-metal bir maske kullanılarak TlGaSe₂ kristalinin üst yüzeyi üzerine yerleştirilerek oluşturulmuştur. Kontaklar oluşturulduktan sonra ince Cu-teller, yüksek saflıkta gümüş macun kullanılarak metal elektrotlara bağlandı (Şekil 2.5.a-c). Böylece In/TlGaSe₂/Au metal-yarıiletken cihazı üretildi. TlGaSe₂ kristalinin 2.00-2.23 eV aralığında değişen bir enerji bandı aralığına sahip bir yarıiletken olduğu bilinmektedir [32].



Şekil 2.5: Kristalin holder (tutucu) üzerindeki konumlarının; a) önden görüntüsü, b) şematik çizimi, c) arkadan görüntüsü.

Au-metalin iş fonksiyonu 5.31-5.47 eV [33] aralığında değişirken, In-metalin iş fonksiyonu ~ 4.09 eV'dur [34]. Au ve In metallerinin iş fonksiyonu p-tipi TlGaSe₂'nin elektron ilgisinden daha büyüktür. Bilindiği gibi, yarıiletkenlerin elektron ilgisi iletim bandının alt kısmındaki elektronların kristalden kaçması için gerekli minimum enerjidir [35]. TlGaSe₂ tabakalı kristali için bu parametrenin yüksek fotoemisyon etkisinden dolayı deneysel veri datalarından tanımlanması zordur. Schottky-Mott teorisinden [36], bir metal ile p-tipi yarıiletken temasında, metalin iş fonksiyonu yarı iletkenin elektron ilgisinden daha yüksekse aralarında hiçbir engel yoktur. In-metalinin iş fonksiyonu Au-metalinden biraz daha düşük olduğu için In/TlGaSe₂ ara yüzeylerinde omik kontak davranışı yerine doğrultma özelliği gözlenir. Kristal kontakları Şekil 2.6'da gösterildiği gibidir. Y işaretli kristalde In-kontak yerine Cu-kontakta kullanılmıştır.



Şekil 2.6: F-tipi TlGaSe₂ kristalinin tabakalarına paralel yüzeylerine Au-In kontak yapıldığında oluşan sandviç yapısı.

2.5. TlGaSe₂ Kristali Faz Geçişleri

Faz dediğimiz en basit anlamıyla bir sistem içinde bütün fiziksel özelliklerin homojen olarak, aynı zamanda kimyasal kompozisyonun değişmeden kaldığı ve mekanik olarak ayırt edebildiğimiz bölgelere verdiğimiz isimdir. Faz kelimesi iki farklı anlamda kullanılabilir. İlki basit olarak maddenin hallerine faz denilmektedir. Bizim kullanacağımız faz kelimesi fiziksel özelliklerin değişmediği bir sistem içindeki bölgelere verilen isimdir. Daha çok katılar içinde incelenen faz kelimesi kristalin farklı bir haline verdiğimiz değişimdir. Faz değişimi ile maddenin elektrik, mekanik, termodinamik, optik, manyetik özellikleri de değişmektedir. Kristallerin bazı etkiler altında kristal yapılarının değişmesi oldukça yaygındır. Faz geçişi kristal simetrisindeki değişim olarak özetlenebilir. Sıcaklık veya basınç kristal yapının değişimine sebep olabilir. Mutlak sıfırda kararlı bir X kristal yapısı olabilecek tüm kristal yapıları arasında en düşük iç enerjiye sahip olanıdır. Bu X kristal yapısı basınçla değişebilir, çünkü atomik hacim küçüldüğünde sıkı paketlenmiş yapılar ve hatta metalik yapı daha elverişli duruma geçebilir. Örneğin, hidrojen yüksek basınç altında metalik karaktere geçer. Bir Y yapısı X yapısına göre daha alçak frekansta bir fonon spektrumuna sahip olabilir. Y yapısındaki fonon durumları sıcaklık arttıkça X 'deki fononlara göre daha çok uyarılır. Bu durumda doluluk oranı sıcaklıkla artacağından Y yapısının entropisi X yapısına göre daha yüksek olur. Diyebiliriz ki, T sıcaklığındaki kararlı yapının serbest enerjisi $G = H - TS$ formülünün minimumumu ile tayin edilir. O halde faz geçişi olabilmesi için uygun T_c sıcaklığının sağlanması gerekmektedir. Bu anda $G_X(T_c) = G_Y(T_c)$ olmaktadır.

Birçok yapı mutlak sıfırda aynı iç enerjiye sahip olabilirler. Lakin bu yapıların fonon spektrumları tamamen farklı olabilir. Fonon enerjileri komşu atomların dağılımı ve sayısına bağlıdır, bu niceliklerin değişimi yapının değişmesine bağlıdır.

$A^3B^3C_2^6$ tip yarıiletken bileşikler zincirli-tabakalı kalkojenit üçlü yarıiletken bileşikler ailesinin üzerinde en çok araştırma yapılan üyeleri $TlGaSe_2$ ve $TlInS_2$ kristalleridir. $TlGaSe_2$ kristalinde bulunan faz geçişleri ile ilgili bilgiler yetmişli yıllardan itibaren pek çok fiziksel özellik yoluyla araştırılmaya başlanmış olup pek çok araştırma grubu kurularak değişik çalışmalar ve yöntemler ile ortaya çıkan deneysel gözlem ve veriler elde edildi. Yeni kristal katkılama teknikleri ortaya çıkarılmıştır. $TlGaSe_2$ kristali 110 K civarında ferroelektrik faz geçişine sahip olup 120 K civarında ise incommensurate (düzensiz) faza geçer ki bu fazda kristal atomlarının yer değişimi söz konusudur. Oda sıcaklığında ise paraelektrik faza sahiptir. Yapılan deneylerde geçiş parametrelerinin uzaysal homojen olmayan dağılımının oranlı faz, ferroelektrik faz olarak birbirini takip etmesi oldukça doğru şekilde yorumlanmıştır. Temelde ortaya atılan fikirlerin kanıtlanması için deneysel dataların yeterli miktarda olması gerekliliğine rağmen tamamen kabul edilen faz geçişlerinin mekanizmasının doğruluğu hakkında kesin bir şey söylenemez. Buna rağmen $TlGaSe_2$ katmanlı tek kristalinde görülen özel faz geçiş karakteristiğinin mikroskobik özelliklerinin davranışını tanımlamak için deneysel sonuçların değerlendirilmesi ve açıklanabilmesi açısından faydalı ve iyi bir başlangıç noktasıdır [37].

2.6. Kristal Kusurları

Kristal, uzayda atomların iyonların veya moleküllerin düzenli ve periyodik bir şekilde dizilmesiyle oluşan katı bir yapıdır. Ancak bu yapı gerçekte mükemmel elde edilebilir değildir. Gerçek kristal, safsızlıklar veya yapısal bozukluklar içerir. Kristal kusurları dediğimiz bu bozukluklar noktasal, çizgisel ve yüzeysel olabilir.

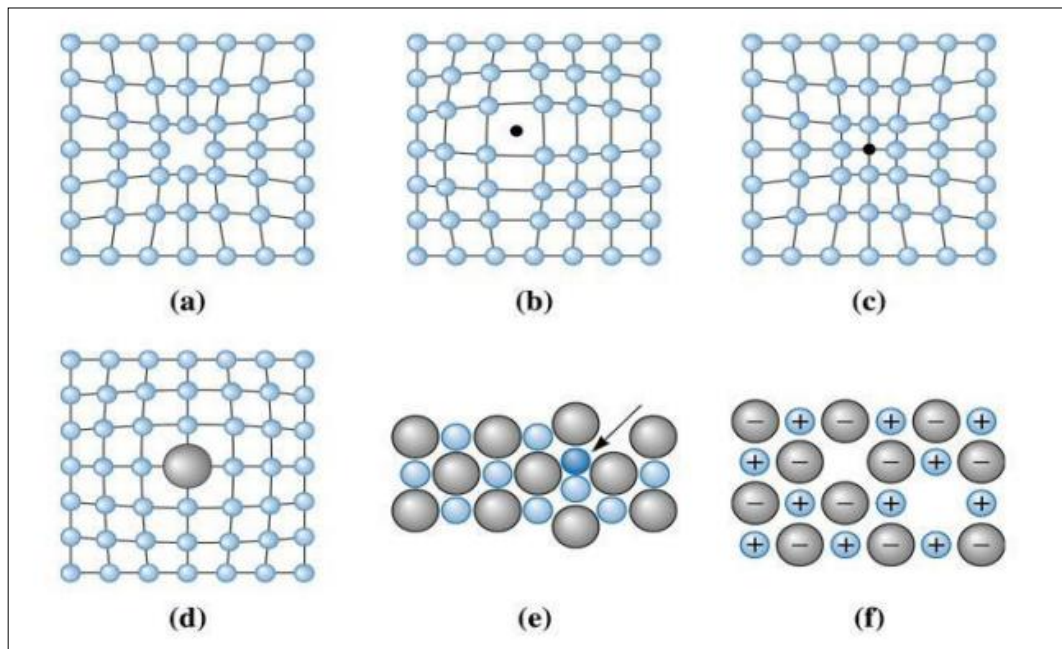
2.6.1. Noktasal Kusurlar

Noktasal kusurlar iki gruba ayrılırlar: safsızlıklar (katkılar) ve doğal noktasal kusurlar. Bu kusurlar kristalin elektrik, optik, ısı, magnetik ve termal özelliklerinin değişimlerine neden olur. Doğal noktasal kusurlar (Şekil 2.7) ise eksik veya yer

değiştirmiş atomlardan dolayı kristal üretilirken oluşan kusurlardır. En basit noktasal kusur eksik atomdur yahut iyon olmayışıdır.

İyonsal yapılarda kararlı yapı için net elektriksel yükün sıfır olması zorunludur. Bu yapılarda zıt elektriksel yükteki iki iyon bulunması gereken yerde bulunmazsa Schottky Kusuru; eğer bir iyonun olması gereken yerde boşluk varsa bu yük dengesizliğini gidermek için başka bir iyon olmaması gereken yerde olur yani yer değiştirmiş iyonlar söz konusu ise bu durum Frenkel Kusuru (Şekil 2.7.e) oluşturur.

Noktasal kusurların mekanik özelliklere etkisi fazla olmamakla beraber elektriksel özelliklere etkisi fazladır.



Şekil 2.7:a) Atomsal boşluk, b) arayer (interstitial) atom, c) küçük yeralan (substitutional) atom, d) büyük yeralan atom, e) Frenkel kusuru, f) Schottky kusuru.

2.6.2. Çizgisel Kusurlar (Dislokasyonlar)

Çizgisel kusurlar kristallerde atomsal dizilişin bir çizgi boyunca bozulması sonucu oluşmaktadır. Bunlar çoğunlukla katılma sürecinde oluşur. Kenar dislokasyonu ve vida dislokasyonu olmak üzere iki tür çizgisel kusur bulunmaktadır. Bu kusurlar malzemenin dayanıklılığını doğrudan etkileyen kusurlardır.

Kenar dislokasyonu, kısmen eksik bir atom düzlemi olarak tanımlanabilir. Yarım atom düzlemi, kafes yapıya girmiş bir bıçak gibi düşünülebilir. Atomların sürekli

olarak kenarlara dışlanmasından kaynaklanır. Dislokasyon çizgisinin bulunduğu bölge mekanik özellikleri büyük ölçüde etkiler. Kenar dislokasyonunun oluşturduğu kusurun büyüklüğü *Burger Çevrimi* uygulayarak saptanır.

Vida dislokasyonu, kristalde bir düzlem boyunca kısmen kayma şeklinde ötelenme sonucu meydana gelir. Bağlı kayma bölgesi boyunca üst ve alttaki atomlar denge konumlarından bir miktar kaymış olup birbirlerini tam karşılamazlar. Bu çizgisel dislokasyonlar adeta bir vida adımı gibi ilerlediklerinden kusura bu isim verildi. Bu kusurda örgü içerisinde bir hat ya tamamen bulunmaz ya da atomlar birbirine olması gerekenden uzak yahut yakındır. Vida dislokasyonlarının oluşturduğu kusurun büyüklüğü de *Burger Çevrimi* yöntemi ile belirlenir.

Gerçekte kristallerde karışık tür dislokasyonlar vardır yani dislokasyon hem kenar hem de vida dislokasyonu içerir [37].

2.6.3. Hacimsel veya Kütlesel Kusurlar

Üretim esnasında özellikle de döküm esnasında ortaya çıktıkları bilinmektedir. Bunlar malzemeyi kullanılamaz hale getirebilen kusurlardır. Örneğin döküm esnasında kristalin içinde oluşabilecek hava kabarcığı o bölgede bir kitle gibi olacak ve gerilim yüklenecektir.

2.6.4. Düzlemsel, Yüzeysel ve Arayer Kusurları

Kristallerin yüzeyleri ile çok kristalli yapılarda kristal bireyleri arasındaki tane sınırları iki boyutlu kusur sayılır.

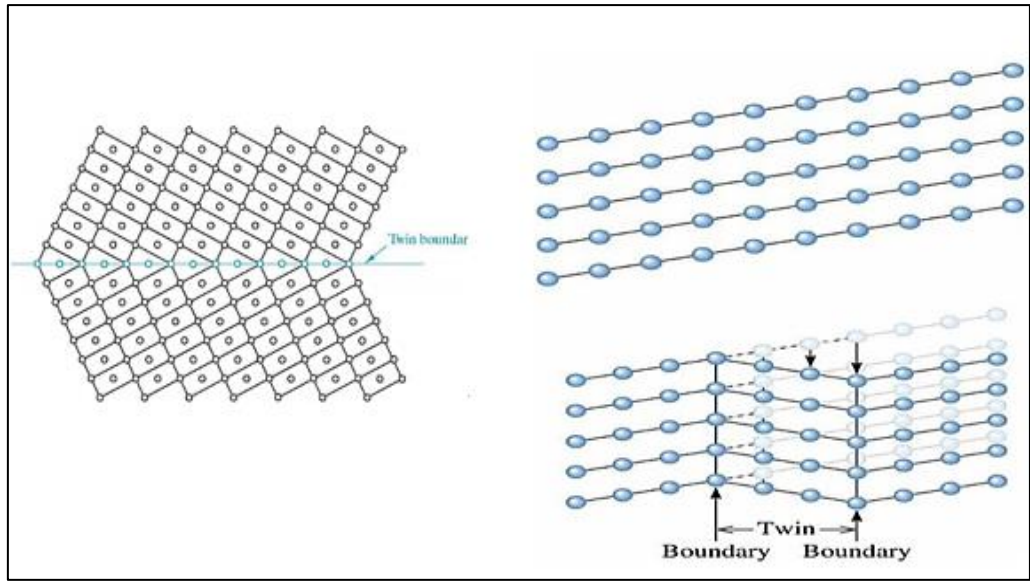
Kendi kafesi içinde düzgün dizilen bir kristalin kendi atomundan farklı başka bir kristal atomu eklenirse (alaşımlama) kristalin kafes yapılanmasında kusur gibi duracaktır. Dolayısıyla kristalin yüzeyinde bulunan atomlarla içinde bulunan atomlar birbirinden farklıdır. Yüzey atomlarının yalnız bir tarafında kusur vardır. Bundan dolayı yüzey atomlarının enerjileri daha yüksek ve içindekilere göre daha zayıf bağlıdır.

Her bir kristal tanesi, belirli atomlarla sınırlanmış olarak çevrelenmiş bulunurken bu sınırlarda atomsal dizilişin bozulduğu yerlerde kristal kusurları oluşur. Yüzeyde

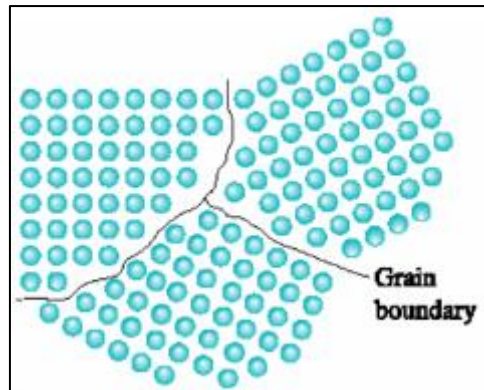
oluşan bu kusurlar ikiz sınırlar ve tane sınırları (büyük açılı ve küçük açılı) şeklinde sınıflandırılabilir.

İkiz sınırlar; iki bölgeyi birbirinden simetrik olarak ayıran sınırdır. İkiz oluşumu kaymadan çok yapı içerisinde burulmadan dolayı oluşmaktadır (Şekil 2.8).

Tane sınırları ise birbirine komşu olarak, tek kristal şeklinde bulunan iki tanenin arasında bulunan yüzeydir. Katılaşma sırasında iki farklı bölgede büyümüş kristaller arasında kalan sınır yüzeyi olabileceği gibi tanelerin çok sayıda ve konumlarının rasgele olması nedeniyle izotropik de olabilmektedir (Şekil 2.9).



Şekil 2.8: a) Kristal bölgeyi birbirinden ayıran ikiz sınır, b) Mükemmel kristal, c) İkizlenmeden dolayı atomlardaki ötelenme.



Şekil 2.9: Tane sınırları.

2.7. Kusurların Etkileri

Yukarıda bahsedilen kusurların yarıiletkenlerin optik ve elektronik özellikleri üzerinde önemli etkileri bulunur. Bu etkiler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

2.7.1. Donor veya Akseptör

Yarıiletkenlerde elektron veren katkı atomuna *verici* veya *donor* denir. Yarıiletkenlerde elektron alan (veya hol veren) katkı atomuna *alıcı* veya *akseptör* denir. Akseptör veya donor kusuru yasak bant içinde izinli enerji düzeyi oluşmasını sağlayabilir. Bu kusurlar serbest yük yoğunluğunu değiştirdiğinden malzemenin iletkenliğini etkiler. Bu kusurların önemli parametreleri yoğunluk ve iyonizasyon enerjileridir.

2.7.2. Tuzak

Tuzak, katı içinde elektron yahut hol yakalayan kusurlardır. Isıl iyonlaşma enerjileri oldukça küçüktür. Bantlara yakın enerji düzeyi oluştururlar. Tuzaklar, yük taşıyıcıların yaşam sürelerinin daha uzun olmasını sağlarlar yani fotoiletkenlik için bir gecikme zamanı oluştururlar. Tuzak kusurlarının önemli parametreleri yoğunlukları ve tuzaklanan taşıyıcı yükler için iyonizasyon enerjileridir.

2.7.3. Rekombinasyon

İletkenlik bandında bulunan herhangi elektron bir meta-kararlı durumdadır ve önünde sonunda değerlik bandındaki daha düşük enerjili bir konuma geçerek kararlı olacaktır. Bunun için elektron boş bir değerlik band durumuna hareket etmelidir. Bu şekilde elektron değerlik bandına geri dönerek kararlı olduğunda, bir deşik yani bir boşluğu kaldırmış olur. Bu sürece rekombinasyon denilmektedir. Rekombinasyon merkezi, elektron yahut hol yakalayabilen ve iyonlaşma enerjisi büyük olduğu için yakalanan taşıyıcıların rekombinasyon olasılıklarının iyonizasyondan çok daha büyük olan bir kusurdur. Kısacası kristal içerisinde rekombinasyon merkezi bulunması

serbest yüklerin yaşam ömürlerini kısaltır. Tek kristal bir yarıiletkende üç tip rekombinasyon meydana gelir. Bunlar;

- Işımalı rekombinasyon
- Auger rekombinasyonu
- Shockley-Read-Hall rekombinasyonudur.

2.7.4. Optik Yakalama Merkezi

Kusurla ilişkili bir elektron, kusurdan iletkenlik bandına, valans bandından kusura yahut kusurun temel durumundan uyarılmış duruma ışıkla uyarılabilir. Böylece kusur yarıiletkenin optik soğurmasına katkıda bulunur. Önemli parametreleri ise optik tesir kesiti ve kusur yoğunluğudur.

2.7.5. Saçılma Merkezi

Kusurlar örgü periyodikliği bozulmasından dolayı serbest taşıyıcıların mobilitelerini belirleyen saçılma merkezleri gibi davranırlar. Eğer kusurlar yüklü ise saçılma için büyük Coulomb tesir kesitine sahip olmalıdır ve serbest taşıyıcıların mobilitesi üzerinde önemli etkileri vardır. Önemli parametreleri ise kusur yoğunluğu ve saçılma tesir kesitleridir.

3. KATILARDA İLETKENLİK

3.1. Yalıtkan ve Yarıiletken

Katıların elektriksel iletkenliği deyince akla iletken, yalıtkan ve yarıiletkenler gelmektedir. Elektriksel iletkenlik aralığı metallere başlayıp $10^6 (ohm \cdot cm)^{-1}$ ile $10^{-16} (ohm \cdot cm)^{-1}$ yalıtkanlığa kadar gitmektedir [38]. Katılarda iletkenlik aralığı oldukça geniş olmakla birlikte yarıiletkenlerde oda sıcaklığı için genelde $1 (ohm \cdot cm)^{-1}$ civarındadır ve bu değer sıcaklığa ve yarıiletkenin saflığına kuvvetlice bağlıdır. Metal, yarıiletken ya da yalıtkanlar farklı sıcaklıklarda çeşitli sebeplerle farklı özellik gösterirler. Metalde serbest taşıyıcı yoğunluğu sıcaklıktan bağımsızdır ve bu nedenle, bir metal için iletkenliğin sıcaklığa bağımlılığı, yalnızca hareketliliğin sıcaklığa bağımlılığından kaynaklanır. Bir yarı iletken veya yalıtkanındaki serbest taşıyıcı yoğunluğu, geniş bir sıcaklık aralığında termal olarak etkinleşir ve bu nedenle bu aralıktaki sıcaklık ile katlanarak artar. Hareketliliğin sıcaklığa bağımlılığı, özel saçılma sürecine bağlıdır. Maddeyi oluşturan atomlar, bir gaz atomları gibi sürekli titreşirler. Kuantum mekaniğine göre bu titreşim hareketi mutlak sıfır sıcaklığında bile durmaz. Ancak atomların enerjisi ne kadar fazlaysa titreşimin genliği de o kadar fazladır. Dolayısıyla ortalama kinetik enerjinin bir ölçüsü olan sıcaklık arttıkça, atomların titreşim hareketinin genliği de artar. Sonuç olarak; serbest elektronların iletken malzemedeki atomlarla çarpışma sıklığı ve bu çarpışmalar sonucunda ısıya dönüşen enerji miktarı artar. Sonuç olarak sıcaklık arttıkça malzemelerin direnci artar.

Ohm kanunu ile elektriksel iletkenliğe değinmekte fayda vardır. Basit olarak Ohm kanunu, devre parametre terimleri ile genellikle $I = V/R$ olarak tanımlanır. Burada I ; devreden akan akım, V ; uygulanan voltaj ve R ; I ; akım ve gerilim arasındaki orantı faktörüdür ve direnç olarak isimlendirilir. Ohm kanunu,

$$J = \sigma E \quad (3.1)$$

şeklinde de ifade edilebilir. Burada J birim yüzeye düşen akım, σ elektriksel iletkenlik ve E elektrik alanı temsil etmektedir. A kesit alanına ve l uzunluğuna sahip bir materyal üzerinden düşünelim. $J = I/A$ olarak akı tanımlandığında ve $E = V/l$ olarak elektrik alan tanımlandığında iki Ohm ifadesini birleştirirsek σ ; J ve E dan bağımsız

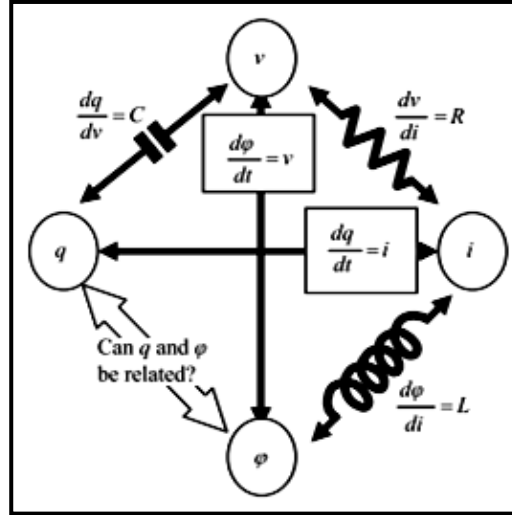
yazılabilir. $\sigma = \left(\frac{1}{R}\right)l/A$ elde edilir. İzotropik malzemelerde iletkenlik skalerdir; anizotropik malzemelerde tensör olabilir. Elektriksel akım yoğunluğu şu şekilde yazılabilir,

$$\mathbf{J} = nq\mathbf{v}_d \quad (3.2)$$

n burada iletkenlik için serbest taşıyıcı yoğunluğu ve elementer q yük ve $\mathbf{v}_d$ elektrik alan tarafından sürüklenme hızıdır. Malzeme içinde rastgele yönlere doğru sıcaklığa bağlı termal hız $v = (2kT/m^*)^{1/2}$ denkleminde tanımlanabilir.

3.2. İki Terminalli Doğrusal Olmayan Devre Elemanları

Elektrik devrelerinde iki tip devre elemanı bulunur: pasif elemanlar ve aktif elemanlar. Enerji üretebilenler aktif eleman olarak sınıflandırılırken, üretmeyenler pasif eleman sınıfındadır. Pasif elemanlara örnek olarak: direnç, kapasitör, indüktör, transformatör; aktif elemanlara ise diyot, transistör, tristör vb. verilebilir [39]. Temel elektronikte kullanılan devre elemanları; akım, gerilim, yük ve manyetik akı arasındaki ikili diferansiyel ilişkilerden çıkar. Akım ve gerilimin ilişkisinden direnç (George Simon Ohm, 1827); yük ve gerilimin ilişkisinden kapasitör (Ewald Georg von Kleist, 1745); akım ve magnetik akı ilişkisinden indüktör (Michael Faraday, 1831) ortaya çıkıyorsa Chua'ya (1971) göre yük ve magnetik akı ilişkisinden de bir devre elemanı olmalıydı (Şekil 3.1); o buna Memristor ismini verdi. Chua bu düşüncesini Mendeleev'den ilham almıştır. Mendeleev'in periyodik tablosunu tamamladığında o an için tabloda bulunmayan bazı elementlerin varlığını ve özelliklerini tahmin etmiştir, zamanla bu elementlerin bulunmasıyla haklılığı ortaya çıkmıştır. Mendeleev sıfırdan yeni bir element bulmadı ama öngörüsü sayesinde kısa bir zamanda periyodik tablonun tamamen olgunlaşmasına sebep olmuş, adını tarihe yazdırdı. Mendeleev'in hipotezi en yakın elementler arasındaki ilişkilerde kayıp element olduğuydu. Chua da benzer şekilde temel devre elemanlarının arasındaki ilişkiye odaklanarak, sonrasında magnetik akı ve yük arasında apaçık yıllardır orada olan ilişkiyi fark etti. Şekil 3.1'de altı mümkün ilişkinin görseli Chua'nın gözünden şu şekildedir [40].



Şekil 3.1: Yük q , akım I , voltaj V , magnetik akı ϕ arasındaki mümkün ilişkiler.

Tablo 3.1’de olduğu gibi devre elemanlarını akım-gerilim ilişkileri üzerinden özetleyebiliriz [41]. İlk sütuna bakarsak, bunlar integral işaretleri dışında aynı görünmektedirler. Sanki Ohm yasasının üç tane daha kardeşi vardır diyebilir miyiz? Memristör için yazılan denklemde bulunan integraller, integral sabitleri sıfır olamayacağından iptal edilemez ve bu, integralden elde edilen hafızayı barındırmaktadır. Zaman içinde akımın integrali, yükten başka bir şey değildir ve zaman içindeki voltajın integrali, manyetik akı ϕ veya akı bağlantısıdır.

Tablo 3.1: Dört temel devre elemanının I-V ilişkisi.

Devre Elemanı	Denklem	Katsayı Faktörü	Fiziksel Tarifi	Özelliği
Direnç	$I = kV$	$k = 1/R$	$R = dv/dIR$	Direnci
Kapasitör	$\int I = kV$	$k = C$	$C = dq/dv$	Kapasitansı
İndüktör	$I = k \int V$	$k = 1/L$	$L = d\phi/dI$	İndüktansı
Memristör	$\int I = k \int V$	$k = 1/M$	$M = d\phi/dq$	Memristansı

3.2.1. Kapasitör

Bir kondansatör, enerjisini elektrik alana depolamak için tasarlanmış bir pasif elemandır. Depolanan yük miktarı q ile temsil edilir ve voltaj V ile doğru orantılı olarak şöyle gösterilir,

$$q = CV \quad (3.3)$$

Burada C kapasitörün kapasitansı olarak bilinen orantı sabitidir. Kapasitansın birimi İngiliz fizikçi Michael Faraday (1791-1867) onuruna Farad (F) olarak verildi. Kapasitörün kapasitansı C , düzleme uygulanan voltajın yüke oranı olarak verilir. Kapasitansın bağlı olduğu fiziksel büyüklükler şu denklemde gösterilebilir,

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (3.4)$$

Burada A düzlemin yüzey alanı, d düzlemler arası mesafe, ϵ düzlemler arasındaki materyalin düzlemler arası dielektrik geçirgenliğidir. Kapasitörün akım-voltaj ilişkisi ise

$$I = C \frac{dV}{dt} \quad (3.5)$$

şeklindedir.

3.2.2. Direnç

Direnç, elektronikte en ufak ilişkisi olanın dahi bileceği en basit devre elemanıdır. Akım ve voltajın diferansiyel ilişkisinden direnç doğar. Özetle malzemenin akıma karşı direnmesidir. Bu akıma direnme kabiliyeti “direnç” olarak adlandırılır ve “ R ” ile temsil edilir. Alman fizikçi Georg Simon Ohm (1787-1854) direnç için akım-voltaj arasındaki ilişkiyi bulmasıyla tanınır. Bu ilişki Ohm Kanunu olarak bilinir. Şöyle ifade edilir;

$$V = IR \quad (3.6)$$

Direnç laboratuarda şu şekilde ölçülebilir;

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3.7)$$

Burada ρ ohm-metre biriminde öz dirençtir diğer bir deyişle materyalin direnebilirliğidir, A materyalin kesit alanı, l ise uzunluğudur.

3.2.3. İndüktör

Magnetik alanda enerji depolamak üzere tasarlanmış pasif devre elemanına indüktör denir. İndüktör üzerindeki voltaj doğrusal olarak akım ile orantılıdır ve şu şekilde ifade edilir:

$$V = L \frac{dI}{dt} \quad (3.8)$$

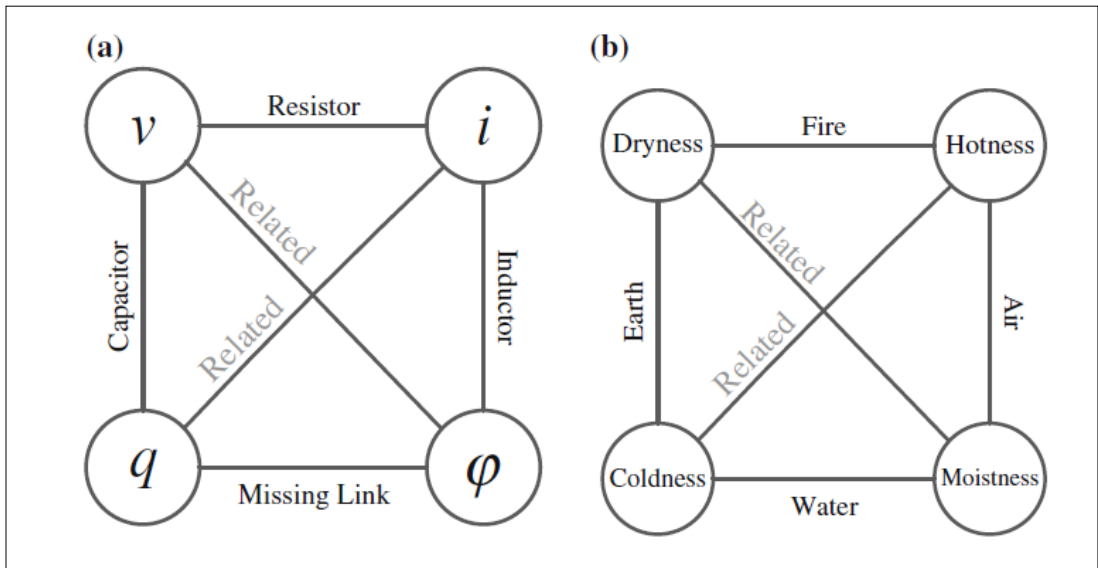
Burada L indüktörün indüktansını veren orantı sabitidir. İndüktans birimi Amerikan araştırmacı Joseph Henry (1797-1878) adını onurlandırmak için Henry (H) dir.

3.2.4. Memristör

Chua dört temel devre değişkeni olan akım I , voltaj V , yük q ve akı ϕ arasında bulunan ilişkileri sınıflandırdığında voltaj V ile akım I arasındaki ilişkiden direnç R ; yük q ve voltaj V arasındaki ilişkiden kapasitör C , akı ϕ ve akım I arasındaki ilişkiden indüktör L elde edilebiliyor ise yük q ile akı ϕ arasındaki ilişkiden de bir sonuç elde edilebileceğini ifade etti ve buna memristör M dedi. Bu dörtlü çıkarım Aristo'nun maddenin kaynağı için önerdiği dört temel durum kavramına benzemektedir (Şekil 3.2). Aristo'ya göre bütün maddeler toprak, hava, ateş ve su olmak üzere dört temel elementten oluşmaktadır ve bu elementleri niteleyen dört özellik vardır, bunlar: sıcak, soğuk, ıslak ve kurudur.

Memristör pasif devre elemanıdır yani enerji depolamaz [40]. Geleneksel direncin aksine memristörün elektriksel direnci sabit değildir. Bu direnç, cihazın iç durumuna bağlıdır. Daha sonra değinileceği üzere, cihazın iç durumu yükün zamanla değişmesine bağlıdır. Bu nedenle memristör cihazın geçmişine bağlıdır. Bu yönüyle memristör eşsizdir. 1971’de Chua, memristörün dahili güç kaynağı olmayan fiziksel bir cihaz olarak henüz ortaya koymayıp, ancak kullanım alanları için önemini vurguladı ve 2008’e kadar bu böyle kaldı.

Devrede voltaj kapatıldığında, memristor hangi voltaj uygulandı ne kadar süre ile uygulandı hatırlayacaktır. Akıma bağlı değişen direnç değeri sebebiyle kullanım alanı düşünüldüğünde oldukça faydalı bir devre elemanı olduğu görülebilir. Devredeki akım kesildiğinde memristör o direnç değerinde kalacaktır ve yeniden akım verildiğinde kaldığı direnç değerinden çalışmaya başlayacaktır. Bu özellik daha önce bahsettiğimiz temel devre elemanlarının hiçbirisi tarafından gösterilmediğinden, memristör dördüncü temel devre elemanı olarak sınıflandırılmaktadır.



Şekil 3.2: a) Temel devre elemanları ilişkileri, b) Aristo'nun madde teorisi.

Temel memristör özellikleri;

- I-V grafiğinde sıkışmış histerisiz döngüsü vardır,
- Memristans AC sinyalde gözlemlenebilir, DC sinyalde görünmez,
- Enerji depolamaz,

- İki terminalli devre elemanıdır,
- Akım kesildiğinde en son direnç durumunu koruması,
- Akım değiştirildiğinde cihazın direncinin değişmesi, hızlı ve sert akım dijital cihaz, yavaş ve yumuşak akım analog cihaz gibi davranmasına neden olması,
- Pozitif yahut negatif diferansiyel dirence sahiptir,
- $q - \varphi$ eğrisi lineer değildir,
- Düşük frekansta çalışır ve frekans bağımlı memristansa sahiptir,
- Tipik olarak sadece küçük skalalarda gözlemlenebilir [42].

Bir memristor yük ' q ' ve akı ' φ ' arasındaki ilişki ile $f_M(\varphi, q) = 0$ tanımlanır (Şekil 3.3). Yük ve akı şu denklemlerle verilir,

$$q(t) = \int_{-\infty}^t I(\tau) d\tau = q_0 + \int_0^t I(\tau) d\tau \quad (3.9)$$

$$\varphi(t) = \int_{-\infty}^t V(\tau) d\tau = \varphi_0 + \int_0^t V(\tau) d\tau \quad (3.10)$$

Burada q_0 ve φ_0 $t = 0$ da sırasıyla ilk durumdaki yük ve akıdır. Memristörün giriş-çıkış tepkisi yük-akı eğrisi ile tanımlanır. Yük-akı eğrisi ise sürekli türevlenebilir ve monoton olarak artıyorsa ideal olarak sınıflandırılır. Memristor kurucu denklemi q veya φ 'nin açık bir fonksiyonu olarak tanımlanırsa yük kontrollü memristör veya akı kontrollü memristör olarak adlandırılır, sırasıyla şu şekildedir,

$$\varphi = \hat{\varphi}(q) \text{ yük-kontrol için} \quad (3.11)$$

$$q = \hat{q}(\varphi) \text{ akı-kontrol için} \quad (3.12)$$

3.11 ve 3.12 denklemlerini zamana bağlı düzenlersek,

$$V = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\hat{\varphi}(q)}{dq} \frac{dq}{dt} = M(q)I \quad (3.13)$$

$$M(q) = \frac{d\hat{\varphi}(q)}{dq} \quad (3.14)$$

$M(q)$ memristans olarak isimlendirilir, birimi Ohm (Ω) dur.

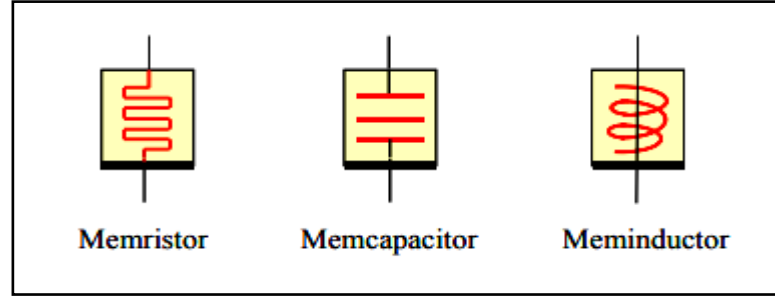
$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{d\hat{q}(\varphi)}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} = G(\varphi)V \quad (3.15)$$

$$G(\varphi) = \frac{d\hat{q}(\varphi)}{d\varphi} \quad (3.16)$$

$G(\varphi)$ memdüksans olarak isimlendirilir, birimi Siemens (S) dir.

Kısaca, bir memristör, iletkenlikteki değişimin akı bağlantısıyla doğrusal orantılı olduğu özel tipte bir memristif cihazdır. Matematiksel olarak, eğer q , φ nin fonksiyonu olarak yazılırsa $q = q(\varphi)$ akım-kontrollü memristör olarak adlandırılır. Yük-kontrollü memristör de benzer şekilde tanımlanabilir. $\varphi = \int_{t=-\infty}^t v dt$ olduğundan, memristörün iletkenliği mevcut durumlarının değişikliğine değil, memristör voltajının (ya da yük kontrollü memristör için akımın) geçmiş kayıtlarında bağlıdır. Cihazın geçmişi q ve φ nin izlediği yola bağlıdır, bu da denklemlerde integral sabiti olarak görülmektedir. Deneysel olarak yük ve manyetik akı elde etmenin güçlüğünden dolayı sıkıştırılmış eğrisi I-V grafiğinden gözlemlenmektedir.

2009 yılında Ventr'a memristörün, son uygulanan “durumu” hatırlama özelliği olan memelement sisteminin daha geniş bir sınıfına ait olduğunu belirtti. Buna göre de “memelement” sınıfı, memristör, memindüktör ve memkapasitör'den oluşmaktadır ve sembolik gösterimleri Şekil 3.3'de olduğu gibidir [43]. Memristör, yük ile akı arasındaki ilişki cinsinden tanımlanır, memindüktör akı ile akım arasındaki ilişkiyi tanımlar ve son olarak memkapasitör ise yükü ile gerilim arasındaki ilişki açısından tanımlanır [4]. Buna ek olarak, memelementlerin karakteristik özellikleri uygulanan sinyalin frekansına, büyüklüğüne ve polaritesine bağlıdır. Yüksek frekansta memristör bildiğimiz (lineer) direnç gibi davranmaktadır. Bunun sebebi, kontrol parametresinin salınımları süresince herhangi bir direnç değişikliği için yeterli zaman olmamasıdır.



Şekil 3.3: Memelementlerin sembol gösterimi.

Memristörün kalıcı hafızaya sahip olması, düşük güç tüketimi ve sinaps benzerliği gibi eşsiz özelliklerinden dolayı ilgi odağı olması kaçınılmazdır ve bu zaman zarfında bilim insanları ve elektronik endüstrisi HP laboratuvarlarında yapılan TiO_2 ince filmine benzer memristörler üretmeyi denemektedirler.

3.3. Yarıiletkenlerde Elektriksel İletkenlik

Yarıiletkenlerin iletkenliği; içerisindeki yabancı maddeler, örgü bozuklukları, kimyasal yapılarında bulunması gereken bazı atomların eksik olmaları, termal uyarma gibi etkilerle değişebilmektedir. Bu aşamada asal yarıiletken tanımlamak gerekli olmaktadır, genel olarak kimyasal bakımdan saf olup bant yapısı itibarıyla yarıiletken olan cisimlere “asal yarıiletken” denilmektedir. Asal yarıiletkene belirli bir oranda yabancı madde katıldığında oluşan yarı iletken ise “katkılı yarıiletken” olarak bilinmektedir. Her yarıiletken, yüksek sıcaklıklarda asal yarıiletken gibi, düşük sıcaklıklarda ise katkılı yarıiletken gibi davranmaktadır.

Asal bir yarıiletken üzerinden tanımlamaları vermek şüphesiz en kolay yol olacaktır. Asal bir yarıiletkende, iletkenlik bandına geçen elektronlar (serbest elektron n_0) valans bantta aynı sayıda boşluk (p_0) bırakacaklar yani ikisinin sayısı birbirine eşit olacaktır. Bunların enerji dağılımları;

$$f(E) = [1 + \exp(E - E_f) / k_B T]^{-1} \quad (3.17)$$

Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu ile belirlenir. Asal bir yarıiletken için elektron ve boşlukların konsantrasyonu sırasıyla;

$$n_0 = N_c \exp[(E_f - E_c)/k_B T] \quad (3.18)$$

$$p_0 = N_v \exp[(E_v - E_f)/k_B T] \quad (3.19)$$

şeklinde tanımlanır. Burada sırasıyla iletkenlik ve valans bandındaki elektron ve hollerin efektif durum yoğunluğu;

$$N_c = 2 \left[\frac{m_e^* k_B T}{2\pi \hbar^2} \right]^{3/2} \quad (3.20)$$

$$N_v = 2 \left[\frac{m_h^* k_B T}{2\pi \hbar^2} \right]^{3/2} \quad (3.21)$$

şeklindedir ve asal bir yarı iletken için Fermi enerjisi;

$$E_f = \frac{E_g}{2} + \frac{3}{4} k_B T \ln \left[\frac{m_h^*}{m_e^*} \right] \quad (3.22)$$

denklemleriyle tanımlanır. Bu denklemlerde; m_e^* elektronların efektif kütesini, m_h^* boşlukların efektif kütesini, k_B Boltzman sabitini, $\hbar$ indirgenmiş Plank sabitini, T mutlak sıcaklığı, E_g yasak enerji aralığını, E_c iletkenlik bandı enerjisini, E_v valans bant enerjisini temsil etmektedir.

Yarıiletkenlerde iletkenlik tanımına geçerseniz, $\mathbf{E}$ elektrik alanı sebebiyle oluşan $\mathbf{J}$ akım yoğunluğu, n taşıyıcı sayısı, $\mathbf{v}_d$ taşıyıcı sürüklenme hızı olmak üzere şu şekildedir.

$$\mathbf{J} = ne\mathbf{v}_d \quad (3.23)$$

Yüklerin hareket denklemi şu şekilde tanımlanabilir.

$$\frac{d(mv_d)}{dt} + \frac{mv_d}{\langle \tau_m \rangle} = eE \quad (3.24)$$

Görüleceği gibi burada mv_d taşıyıcıların momentumu, $\langle \tau_m \rangle$ ortalama momentum relaksasyon zamanıdır, dolayısıyla ikinci terim sürüklenme terimi olarak tanımlanabilir. Bu terim taşıyıcıların kristal boyunca sürüklenmesinden ortaya çıkmaktadır ve bu sürtünmelerin örgü atomlarının ayrı ayrı titreşimlerine bağlı olması $\langle \tau_m \rangle$ 'nin sıcaklığa bağlılığını ortaya koyar. Kararlı durumda ilk terim yok olur,

$$|v_d| = \mu_s^e |E| \quad (3.25)$$

μ_s^e orantı çarpanı, elektronların sürüklenme mobilitesi olarak adlandırılır.

$$\mu_s^e = \left(\frac{|e|}{m} \right) \langle \tau_m \rangle \quad (3.26)$$

Bu ifadeyi (3.23) denkleminde akım yoğunluğu tanımlamak için kullanırsak,

$$J = \sigma E \quad (3.27)$$

burada σ elektriksel iletkenlik olmak üzere,

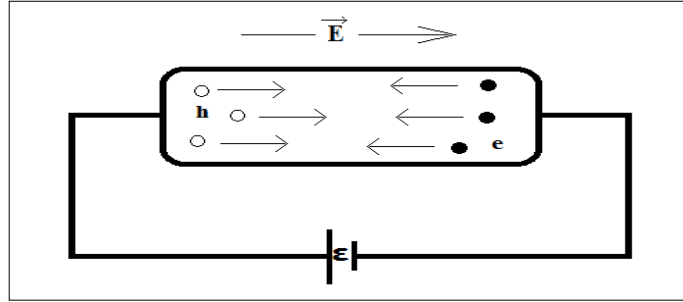
$$\sigma_e = n_0 e \mu_s^e = (n_0 e^2 / m) \langle \tau_m \rangle \quad (3.28)$$

şeklinde tanımlanır ve iletkenliğin tersi $1/\sigma = \rho$ öz direnç olarak tanımlanır.

Elektronlar ve boşluklar makroskopik olarak, yarıiletkenin türüne göre taşıyıcı popülasyonu ya da taşıyıcı yoğunluğu oluşturur. İletkenlik konusundan bahsederken kuantum mekaniğinden ziyade Maxwell denklemleri ve yükün korunması ve konsantrasyon gradyanlarından kaynaklanan difüzyon gibi kavramlar kullanılır.

Genel teoriler ideal kristal içinde bulunan elektron üzerine kuruludur. Kristal yapı; atom, iyon ve moleküllerin oluşturduğu üç boyutlu tekrarlanan ve düzgün uzun erimli yapıya denir. Ne var ki gerçek dünyada mükemmel periyodikliğe ve kusursuzluğa sahip kristali bulmak imkansızdır. Gerçekte kristaller örgü içinde atom boşlukları, atom yer değiştirmeleri gibi safsızlıklar ve kusurlar içerir. Malzemeye dış elektrik alan uygulanması sonucu net bir akım oluşur. Elektronlar elektrik alana zıt yönde hareket ederken, boşluklar elektrik alan ile aynı yönde hareket ederler (Şekil 3.4). Malzeme içinde elektronlar ve boşlukların ikiside elektrik alandan etkilenir, böylece ikiside

iletkenliğe katkıda bulunur ve net bir akım oluşur. Oluşan bu akıma “sürüklenme akımı” denir.



Şekil 3.4: Elektrik alanda boşluk ve elektronların hareketi.

$$J = n_0 e \mu_s^e E + p_0 e \mu_s^h E \quad (3.29)$$

Hem elektronların hem de boşlukların iletkenliğe katkıda bulunduğu durumu göz önüne alırsak,

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_h = n_0 e \mu_s^e + p_0 e \mu_s^h \quad (3.30)$$

yazılabilir. Burada μ_s^h boşlukların sürüklenme mobilitesidir. Yarıiletken asal yarı iletken değil ise n_0 ve p_0 'ın büyüklüklerine göre yarıiletken p yahut n tipi olarak davranır.

3.4. Metal-Yarıiletken Kontakların Teorisi

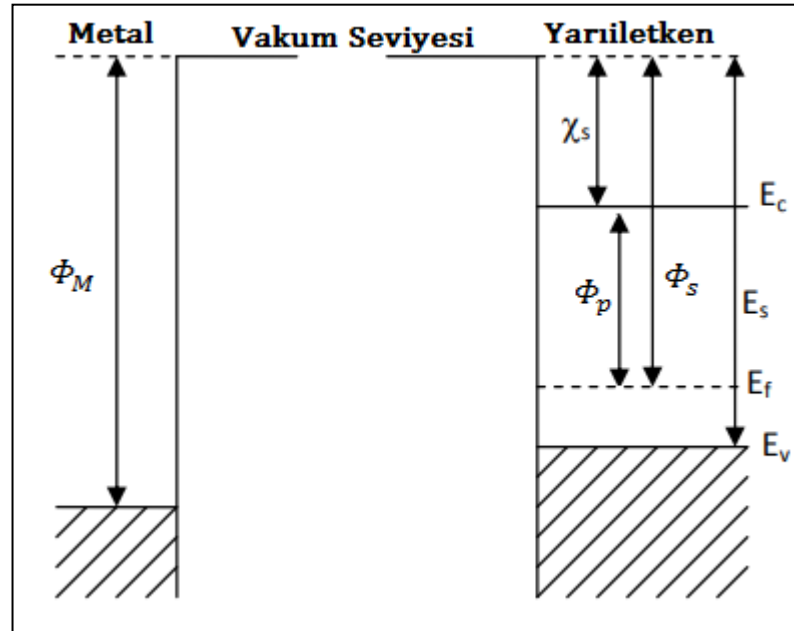
Metal-yarıiletken kontaklar akım-gerilim karakteristikleri incelendiğinde omik yahut doğrultucu olabilmektedir. Akım taşıyıcılarını (elektron yahut hol) bir yönde diğerine göre daha kolay geçiren kontaklara doğrultucu kontak denilmektedir.

Metal-yarıiletken kontakların doğrultma özelliklerine dayalı ilk sistematik araştırmalar 1870li yılların başında radyo ve televizyon teknolojilerinin gelişmesine katkılar sunan Alman araştırmacı Braun tarafından yapıldı. Braun, toplam direncin, uygulanan gerilim polaritesine ve ayrıntılı yüzey durumlarına bağlı olduğunu öne sürmüştür [35], [44]. 1900lerin başında nokta-kontak doğrultmanlarının deneysel uygulamaları başlamış olup 1901'de Bose tarafından ilk defa radyo dalgalarını tespit eden bir cihazda kullanılmış ve patenti alınmıştır [45]. Wilson 1931'de katıların bant

teorisine dayalı olarak yarıiletkenlerin akım iletim teorisini formüle etti [46]. Her ne kadar doğrultucu diyot denildiğinde aklımıza Schottky gelse de Şekil 3.4’de görülen metal-n tipi yarıiletken ara yüzeyinde oluşan engelin yüksekliği,

$$\Phi_B = (\Phi_m - \chi_s) \quad (3.31)$$

olarak Mott tarafından formülize edildi [47]. Bu ideal durumla pratikte çok nadir karşılaşılır ve Schottky-Mott limiti olarak anılmaktadır. Bir elektronu serbest uzayda $T = 0\text{ K}$ ’da Fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkartmak için gerekli olan minimum enerji; iş fonksiyonu olarak tanımlanır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5: Kontak oluşumundan önce metal-p tipi yarıiletken enerji diyagramı.

Burada Φ_B , metal-yarıiletken ara yüzeyinde yüklerin ayrışmasıyla bir potansiyel engel yüksekliği; χ_s , iletkenlik bandının en üst sınırından, bir elektronu vakum seviyesine çıkartmak için gerekli enerji miktarı yani bir diğer deyişle yarıiletkenin elektron ilgisi.

Yarıiletken iş fonksiyonu $\Phi_s = \chi_s + \Phi_p$ olarak yazılabilir. Burada $\Phi_p = E_c - E_f$ olarak tanımlanır. q elektrik yükü olmak üzere, qV_i metalden fermi enerji seviyesine çıkan elektron enerjisi; $\Phi_M = qV_i + \Phi_s$ olarak tanımlanabilir.

$$\Phi_B = (qV_i + \Phi_p) \quad (3.32)$$

Denklem (3.31) ve (3.32) birbirinden bağımsız olarak Schottky ve Mott tarafından ifade edildi. Pek çok durumda engelin Φ_B yüksekliği, termal enerji kT/q 'dan çok büyüktür. Schottky-Mott teorisine göre bir metal ve p-tipi yarıiletken temas ettiğinde, metalin iş fonksiyonu yarı iletkenin elektron ilgisinden daha büyükse aralarında hiçbir engel yoktur yani omik kontak oluşur, eğer p-tipi yarıiletkenin elektron ilgisi metalin iş fonksiyonundan büyükse doğrultucu kontak oluşur [48].

Schottky'nin tanımladığı metal-yarıiletken yapıdaki potansiyel engeli, kimyasal bir tabaka olmayıp, yarıiletken içerisindeki kararlı uzay yüklerinden kaynaklandığını ileri sürdüğü model Schottky engeli olarak bilinir [49]. Ayrıca 1938'de Mott tarafından, Mott engeli olarak bilinen metal-yarıiletken kontaklar için uygun bir teorik model geliştirildi. Mott, yarıiletken-metal kontağının içinde yüklerden yoksun başka bir deyişle kirlilik atomlarının olmadığı, ince bir tabaka olduğunu kabul eder [47]. Bu modele göre Mott, safsızlık olmadığı için ara yüzey tabakadaki elektrik alan büyüklüğünün sabit olduğunu dolayısıyla metale doğru uzaklıkla lineer olarak artan bir elektrostatik potansiyele sebep olacağını varsaymaktadır. Schottky ise engel bölgesinin sabit yoğunlukta kirlilik atomları içerdiğinden elektrik alanın doğrusal olarak arttığını, ayrıca elektrostatik potansiyelin metale kadar kuadratik olarak değiştiğini varsaymaktadır.

Mott engeli, yüksek yoğunlukta katkılanmış yarıiletken ile metal arasına, daha az katkılanmış yahut katkılanmamış saf bir yarıiletken konulduğu zaman kullanılır. Schottky [50] ve Mott [36] akım yoğunluğu hesaplamaları denklem 3.33 ve 3.34 de gösterildi

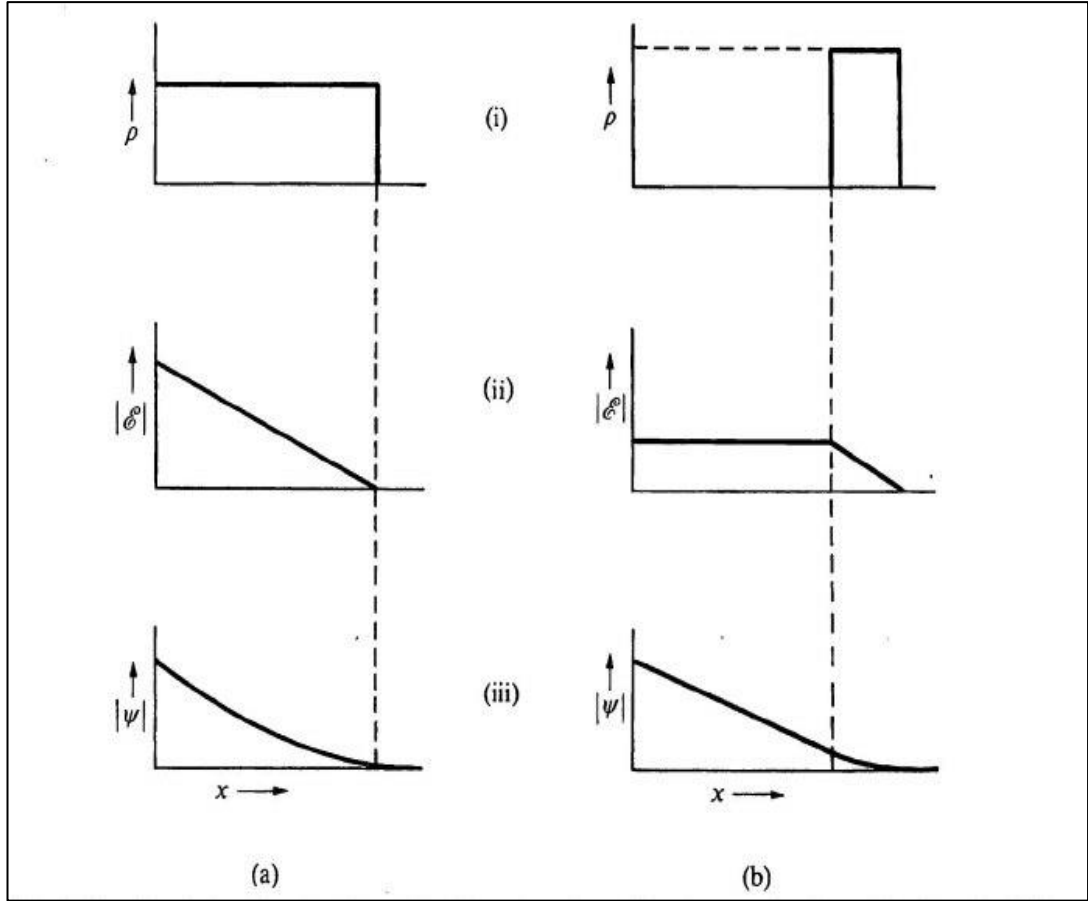
$$\begin{array}{ll} \text{Schottky} & J_t = AA^*T^2 \exp \left[-\frac{q\Phi_B}{k_B T} \left[\exp \left(\frac{qV}{k_B T} \right) - 1 \right] \right] \\ \text{Teorisi} & \end{array} \quad (3.33)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Mott} & J = \frac{J_t \cdot J_d \cdot \exp(q\Phi_B/k_B T) \cdot [\exp(qV/k_B T) - 1]}{J_d + J_t (1 - \exp(q(V - \Phi_B)/k_B T)) \Phi_B / (\Phi_B - V)} \\ \text{Teorisi} & \end{array} \quad (3.34)$$

Burada A kontak yüzey alanı, A^* Richardson sabitidir, Φ_B bariyer yüksekliği, q elektrik taşıyıcı yükü, V metal elektroda uygulanan voltaj besleme, J_t termiyonik

emisyona akımıdır. J_d difüzyon sürüklenme akımıdır ve h Plank sabiti, m^* etkin kütle, k_B Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık olmak üzere etkin durum yoğunluğu N şu formülle bulunur $N = 2(2\pi m^* k_B T / h^2)^{3/2}$. μ yüklü parçacık mobilitesi, l yalıtkan tabaka kalınlığı olmak üzere $J_d = \mu N q \Phi_B / l$ formülüyle bulunur.

Kontağın yarıiletken tarafında bulunan pozitif yüklere, sayısı metal tarafındaki iyonize olmuş negatif yük yoğunluğundan çok daha az olan iyonize olmuş donörlerin neden olduğu ve bunların yarıiletken içinde hareketsiz olmalarından dolayı bunlara yüzey yükü olarak değil, bir uzay yükü olarak bakmak gerekir. Yarıiletkenin uzay yükü bölgesi hareketli yüklerden yoksundur ve dolayısıyla yüksek dirençli yalıtkan bir tüketim bölgesi oluşmaya başlar. Bu sabit uzay yükleri için elektrik alanın büyüklüğü, uzay yük tabakası kenarından olan uzaklıkla lineer olarak artar. Bunun sonucu olarak engel yüksekliği parabolik olur ortaya çıkan bu parabolik engel Schottky engelidir [51]. Özetle potansiyel engelinin şekli tüketim bölgesindeki yük dağılımına bağlıdır. Elektron yoğunluğunun donör konsantrasyonundan daha az olduğu geçiş bölgesinde bantların bükülmesini ihmal edersek, engelin şekli tamamen donörlerin uzaysal dağılımı ile belirlenecektir. Yarıiletkenin metalin hemen yanında donörlerden yoksun ince bir tabakaya sahip olduğunu varsayan Mott tarafındansa farklı bir model ileri sürülmüştür. Şekil 3.6’da gösterildiği gibi [48], elektrik alan kuvveti önce kuadratik olarak daha sonra lineer olarak artan bir elektrostatik potansiyele yol açan böyle bir tabaka boyunca sabit kalacaktır. Metal-yarıiletken kontakta Mott bariyerle akım-voltaj iletim mekanizmasını biraz açabiliriz. Bir Mott bariyeri olan bir diyotun akım-gerilim özelliklerinin analizinde, görüntü kuvvetlerinden dolayı bariyer yüksekliği azalmasının etkisini göz ardı edilmektedir. Bu etki ters beslemede önemlidir; ters akım üzerindeki etkisi daha sonra dikkate alınabilir. Termiyonik emisyon ve difüzyon yaklaşımlarındaki hesaplamaları yapılır ve yarı iletkende dağılım yasasının parabolik olmama ve küresel olmamasının etkileri göz ardı edilir.



Şekil 3.6: a) Schottky bariyer, b) Mott bariyer, i) yük yoğunluğu (ρ), ii) elektrik alan büyüklüğü (E), iii) elektrostatik potansiyel (Ψ), Ψ negatif ve elektron potansiyel enerji ($-q\Psi$) pozitif.

3.4.1. Yüzey veya Arayüzey Durumlarının Etkisi

Metal-yarıiletken sistemlerinin bariyer yüksekliği ara yüzey durumları ve metal iş fonksiyonuyla doğrudan ilişkilidir. Bariyer yüksekliğinin genel tanımı iki varsayım temelinden elde edilebilir: İlki metal-yarıiletken arasında homojen bir kontak olması ve bunun atomik boyutta ara yüzey katmanı olup bu katman sanki elektronlar için şeffafmış gibi herhangi bir bariyerle karşılaşmadan karşıya geçtiği, ikincisi ara yüzdeki enerji başına düşen birim alan ara yüz durumları yarı iletken bir yüzeyin özelliğidir ve metalden bağımsızdır. Bu da demektir ki Schottky-Mott teorisine göre bariyer yüksekliği kontak metalin iş fonksiyonuna bağlı değildir. Deneysel olarak, bariyer yüksekliğinin eşitlik (3.31)'de olandan daha az duyarlı bir fonksiyon olduğu ve bazı durumlarda Φ_B 'nin metal seçiminden neredeyse bağımsız olabileceği bulunmuştur.

Metalin iş fonksiyonuna bu zayıf bağıllığın açıklanması 1947’de Bardeen tarafından yapılmış olup bu tutarsız durumun yüzey durumlarının etkisi nedeniyle olabileceğini öne sürmüştür [52]. Bardeen, ara yüzeyde lokalize olmuş elektronik seviyelerin varlığını ileri sürdü ve bahsi geçen seviyelerin yarıiletken içerisindeki kirliliklere ek olarak yarıiletken ile yalıtkan arasındaki arayüzde bulunduğunu varsaydı. Bu enerji seviyeleri kesikli yahut sürekli bir dağılıma sahip olabilirdi. Bardeen’in bu fikirleri Cowley ve Sze tarafından “sürekli arayüzey seviyeleri” öngörüsü ile takip edildi [53]. Buna göre yüzey seviyelerinin yoğunluğu, yarıiletken band aralığı üzerinde aynı olmalıdır ve band aralığının belirli bir konumunda bir yük nötrallik seviyesi bulunmalıdır. Bu araştırmanın sonucu da Bardeen’in vardığı sonuç gibidir yani ara yüzey seviyelerinin sadece yarıiletkenin özelliği olduğu ve kullanılan metalden bağımsız olduğunu kabul etmektedir. Bardeen; E_c yarı iletkenin iletkenlik bant seviyesi, E_{neut} ise E_c ’nin altında bir mesafede sabitlenmiş enerji olmak üzere; metal iş fonksiyonunu $\Phi_B = E_c - E_{neut}$ olarak tanımlar. Bu denklem Bardeen limit ifadesidir ve metalin iş fonksiyonundan tamamen bağımsızdır.

Ara yüzey durumlarının homojen yayılmamasından ve dolayısıyla kontak boyunca farklı kalınlıkta olmasından dolayı genellikle Schottky kontaklarında I-V ve C-V ölçümlerinden hesaplanan engel yükseklikleri farklılık göstermektedir.

Schottky bariyer diyotlar; güneş pilleri, fotodedektörler, alan etkili transistörler, mikrodalga diyotlar gibi birçok yarıiletken tabanlı elektronik aygıtın temelini oluşturmaktadır. Metal-yarıiletken (MS-Metal-Semiconductor) arasındaki ara yüzey yalıtkan veya organik (polimer) tabaka olabilir; bu durum MS yapısı, metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS-Metal-Insulator-Semiconductor) veya metal-polimer-yarıiletken (MPS-Metal-Polimer-Semiconductor) yapıya dönüştürür. MIS yapılar ilk olarak Moll ve Pfann ve Garrett tarafından voltaj kontrollü varistör (değişken kapasitör) olarak önerildi [54]. Daha sonra karakteristik özellikleri Frankl ve Lindner tarafından incelenmiş olup termal okside silikon yüzeyi kullanılarak Terman ve Lehovec tarafından çalışıldı [54]. İlk başarılı MIS yapısı 1960’larda Ligenza ve Spitzer tarafından Si yüzeyine termal olarak SiO₂ büyütülmesiyle oluşturuldu [55]. Bütün yarıiletken aygıtların güvenilirliği ve kararlılığın belirleyen problemlerin çoğu yüzey koşulları ile ilgili olduğu için, MIS kapasitörler kullanılarak yüzey fiziğini anlamak ve aygıt uygulamalarında büyük önem taşımaktadır.

Literatürde MS veya MIS yapıların yapısal ve elektriksel özellikleri ile ilgili pek çok çalışma mevcuttur. Bu tip Schottky engel diyotların teknolojik öneminden dolayı

akım-iletim mekanizmalarını incelemek büyük ilgi uyandırmaktadır. Baskın iletim mekanizması yüzey hazırlama süreci, ara yüzey tabakanın oluşumu, MS ara yüzeyinde engel yüksekliği, yarıiletkenin katkı konsantrasyonu, arayüzey durumlarının enerji yoğunluğu dağılımı gibi birçok parametreye bağlıdır. Yapısal kusurlardan ve safsızlıklardan doğan arayüzey yük durumları arayüzey yakınlarında yarıiletkenin enerji bant yapısını değiştirebilir. Elektronların kontakta akış hızı, ara yüzey engeli içindeki akış hızları tarafından sınırlıdır. Uygulamalarda (3.31) denkleminin tam sonuç vermemesi bu yüzdendir. Yüzey durumları, ya arayüzeydeki safsızlıklar ve doyuma ulaşmamış bağların etkilerinde ya da arayüzeyde bulunan yapılarda periyodiklikten sapmadan kaynaklanır. Ve uygulamalar açısından yüzey durumlarının yoğunluğu ve varlığını kesin olarak tahmin çok zordur. Eğer yüzey durumlarının fazlaca yoğunluğu mevcut ise, böyle bir durumda kontakın tipi ve iletkenlik süreci tamamıyla yüzey durumları tarafından belirlenir.

3.5. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları

Metal-yarıiletken kontakların akım iletim mekanizması, yarıiletken yüzeyini temizleme işlemlerine, metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan tabaka oluşumuna, ara yüzey durumların yoğunluğuna, yarıiletkendeki safsızlık konsantrasyonuna, diyotun seri direncine, besleme voltajına ve yarıiletken ile metalin başta iş fonksiyonu olmak üzere fiziksel özelliklerine bağlıdır.

Bir metal-yarıiletken kontakta gerilim uygulandığında sistem termal dengede ise yük taşıyıcıları metal ile yarıiletken arasındaki engeli aşmak suretiyle;

- termiyonik oluşturabilir
- tünelleme yapabilir
- yeniden birleşerek

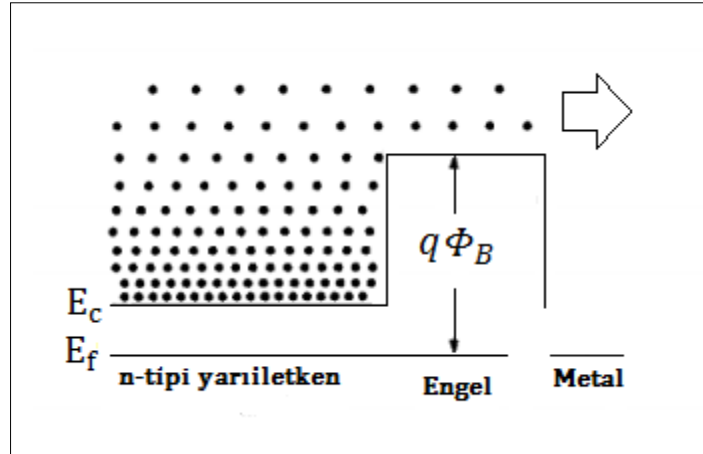
farklı akım iletim mekanizmaları oluşturabilir. Metal-yarıiletken kontaklarda oluşan bu mekanizmalarla ilgili yorum yapabilmek için; ara yüzey durumları, yarıiletkeninin seri direnci, yarıiletkenin tipi, metal ile yarıiletken arasındaki oksit tabaka, gerilimin

yönü, sıcaklık vb. faktörlerin etkisinin belirlenmesi sonuçların doğruluğu açısından büyük önem taşımaktadır. Metal-yarıiletken ara yüzeyinde gerçekleşen akım iletiminden söz ederken tek bir mekanizmadan bahsetmek pek doğru olmayacağından diğer mekanizmaların akıma katkısının (ihmal edilebilir boyutlarda) yanı sıra baskın olan bir mekanizmadan bahsetmek yorumları daha iyi sonuçlara götürür.

Metal-yarıiletken mekanizmalarda en olasıklıklı mekanizma, yeterli termal enerjiyi kazanan yük taşıyıcılarının bariyer potansiyel engeli üzerinden atlaması yani termiyonik emisyon (TE) yapmasıdır. Bu mekanizma, Schottky bariyer diyot elde etmekte yaygın olarak kullanılan standart bir modeldir. Diğer mekanizmalar, alan emisyonu (FE) ve termiyonik alan emisyonunu (TFE) içine alan engel boyunca tünelleme, difüzyon teorisi, deplasyon bölgesinde rekombinasyon ve jenerasyon mekanizmalarıdır. Bu mekanizmaları kısaca açıklayalım.

3.5.1. Termiyonik Emisyon Teorisi

Schottky bariyer diyotlarda potansiyel engelin üzerinden yeterli termal enerjiye ulaşan elektronların taşınması işlemi termiyonik emisyon teorisi ile açıklanır (Şekil 3.7). Termiyonik emisyon teorisinden engel profilinin şekli önemsizdir yani akım akışı sadece engel yüksekliğine bağlıdır. Serbest uzayda, termiyonik emisyon sıcak metal yüzeyden elektron çıkarma (emisyon) olarak ifade edilir. Metal-yarıiletken kontaklarda akımın çoğunluk taşıyıcılar tarafından iletildiğini kabul eder yani; metal-yarıiletken sistemde metal/n-tipi yarıiletken yapılar için bu mekanizma elektronlar; metal/p-tipi yarıiletken yapılarda ise deşikler tarafından sağlanmaktadır.



Şekil 3.7: Engel üzerinden elektronların termiyonik emisyonla geçişini gösteren enerji bant diyagramı.

Bethe Termiyonik Emisyon Teorisini; Maxwell-Boltzman yaklaşımının uygulanabilmesi ve termal denge durumunun etkilenmemesi için, $q\Phi_B$ engel yüksekliğinin kT 'den daha büyük olduğunu farz ederek türetilir. Teori; Schottky bölgesinde taşıyıcı çarpışmaları olamamakta ve taşıyıcıların ortalama serbest yollarının Schottky bölgesinin kalınlığından fazla olduğunu kabul etmektedir. Ayrıca Bethe görüntü (hayali) kuvvetlerin etkisini ihmal etmektedir. Bu temel varsayımlara göre $J_{y \rightarrow m}$ akım yoğunluğu ifadesini yarıiletken-den-metale doğru yazarsak;

$$J_{y \rightarrow m} = \int_{E_f + q\Phi_B}^{\infty} qv_x dn \quad (3.35)$$

Şeklinde dir. Burada v_x ; x yönelimindeki taşıyıcı hızı ve integral alt sınırı olan $E_f + q\Phi_B$ ifadesi metale termiyonik emisyon için gerekli minimum enerjidir. Küçük bir enerji aralığındaki elektron konsantrasyonu olan dn ;

$$dn = N(E)f(E)d(E) = \left[\frac{4\pi(2m^*)^{3/2}}{h^3} \right] \sqrt{E - E_c} \exp \left[\frac{-(E - E_c + q\Phi_n)}{kt} \right] dE \quad (3.36)$$

Şeklinde verilir. Denklemden $N(E)$ ve $f(E)$ sırasıyla bantlardaki durumların yoğunluğu ve Fermi-Dirac dağılım fonksiyonudur, $q\Phi_n = E_c - E_f$ ve m^*

yarıiletkendeki elektronun etkin kütesidir. İletkenlik bandındaki elektronların tüm enerjilerinin kinetik enerji olduğu kabul edersek;

$$E - E_c = \frac{1}{2} m^* v^2 \quad (3.37)$$

$$dE = m^* v dv \quad (3.38)$$

$$\sqrt{E - E_c} = v \sqrt{\frac{m^*}{2}} \quad (3.39)$$

(3.37), (3.38), (3.39) eşitliklerini (3.40) denkleminde yerlerine koyarsak,

$$dn = N(E) f(E) d(E) = \left[\frac{4\pi(2m^*)^{3/2}}{h^3} \right] v \sqrt{\frac{m^*}{2}} \exp \left[\frac{-(\frac{1}{2}m^*v^2 + q\Phi_n)}{kT} \right] m^* v dv \quad (3.40)$$

Toparlarsak,

$$dn = 2 \left(\frac{m^*}{h} \right)^3 \exp \left(-\frac{q\Phi_n}{kT} \right) \exp \left[-\frac{(m^*v^2)}{2kT} \right] 4\pi v^2 dv \quad (3.41)$$

Elde edilir. Bu eşitlik bize bütün doğrultularda hızları v ile $v + dv$ arasında değişen elektronların birin hacim başına sayısını verir. $4\pi v^2 dv = dv_x dv_y dv_z$ dönüşümüyle, birlikte eşitlik;

$$J_{y \rightarrow m} = 2q \left(\frac{m^*}{h} \right)^3 \exp \left(\frac{-q\Phi_n}{kT} \right) \int_{-\infty}^{\infty} v_x \exp \left(-\frac{m^*v_x^2}{2kT} \right) dv_x \int_{-\infty}^{\infty} v_y \exp \left(-\frac{m^*v_y^2}{2kT} \right) dv_y \int_{-\infty}^{\infty} v_z \exp \left(-\frac{m^*v_z^2}{2kT} \right) dv_z \quad (3.42)$$

şeklini alır. x ekseninde ki elektronlar için

$$J_{y \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_n}{kT}\right) \exp\left[-\frac{(m^* v_x^2)}{2kT}\right] \quad (3.43)$$

elde edilir. Bu elektronların engeli aşmak için sahip olmaları gereken hız;

$$\frac{1}{2} m^* v_x^2 = q(V_{bi} - V) \quad (3.44)$$

Şeklinde ifade edilebilir, burada V_{bi} sıfır besleme durumunda ki dahili (built-in) potansiyelidir. Bu eşitlik (3.44) eşitliğinde yerine konulursa

$$J_{y \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left(-\frac{q(\Phi_n + V_{bi})}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (3.45)$$

elde edilir. Eşitlik başındaki sabitlerin bulunduğu ifade $A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3}$ etkin Richardson sabitidir. Termiyonik emisyon için bu sabit, kuantum mekaniksel yansıma ve optik foton saçılmasının etkilerini ihmal eder. Serbest elektronlar için ($m^* = m_0$) için Richardson sabitinin değeri $120 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^2$ dir. TlGaSe₂ kristali için hesaplanan Richardson sabiti $62,40 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^2$ dir [56]. Burada m^* ve m_0 sırasıyla etkin kütle ve serbest elektronun kütlesidir. $\Phi_n + V_{bi}$ toplamı ise bariyer yüksekliği olan Φ_B ye eşittir. O halde yarıiletken-den-metale doğru akım yoğunluğu ifadesi;

$$J_{y \rightarrow m} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (3.46)$$

şeklinde elde edilir.

Termiyonik emisyon teorisine göre metal içinden yarıiletkene hareket eden elektronlar için engel yüksekliği aynı kalır. Dolayısıyla yarıiletken içindeki akım akışı uygulanan gerilimden bağımsızdır. Böylece termal denge durumunda, metalden yarıiletkene geçen elektronlar için akım yoğunluğu ifadesi elde etmek için $V = 0$ olacağından;

$$J_{m \rightarrow y} = -A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \quad (3.47)$$

O halde toplam akım yoğunluğu n-tipi bir yarıiletken için;

$$J_n = \left[A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.48)$$

$$= J_{TE} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.49)$$

Burada doyum akım yoğunluğu denklem (3.50) gibi ifade edilir.

$$J_{TE} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \quad (3.50)$$

3.5.2. Difüzyon Teorisi

Schottky'nin dejenere yarıiletkenler için önerdiği difüzyon teorisi; engel yüksekliğinin elektronların termal enerjisi (kT)'den çok daha büyük olduğu, tükenim bölgesinde elektron çarpışmalarının etkin olduğu ve kıtlık bölgesinin sınırları içerisinde taşıyıcı konsantrasyonunun akım akışından etkilenmediği varsayımına dayanır. Böyle bir durumda kıtlık bölgesindeki akım yoğunluğu, yerel elektrik alana ve taşıyıcı konsantrasyonunun gradyentine bağlıdır. Akım yoğunluğu eşitliği

$$J_n = q \left(\eta \mu_n E + D_n \frac{dn}{dx} \right) \quad (3.51)$$

olarak ifade edilir. Bu denklemde, η n-tipi yarıiletken için elektron konsantrasyonu, μ_n elektron mobilitesi, D_n elektronların difüzyon sabiti, E engelde oluşan elektrik alan ve q ise elektron yüküdür.

Mobilitenin ve difüzyon sabitinin elektrik alanından bağımsız olduğu düşünülürse Denklem (3.51) daha basit bir şekilde ifade edilebilir. N_c iletkenlik bandında etkin hal yoğunluğu ve E_c ise iletkenlik bandının tabanının enerji seviyesi olarak tanımlandığında Fermi parçacıklarının istatistiğinden elektron konsantrasyonunun,

$$\eta = N_c \exp \left[\frac{-q(E_c - \Phi_n)}{kT} \right] \quad (3.52)$$

biçiminde ifade edilebildiğini ve $\frac{\mu_n}{D_n} = \frac{q}{kT}$ biçiminde ifade edilen Einstein ilişkisini de kullanarak Denklem (3.51),

$$J = q\mu_n\eta \left[\frac{d\Phi_n}{dx} \right] \quad (3.53)$$

şeklinde yazılır. Bu denklem elektronlar için sürücü kuvveti sağlayan Φ_n 'in gradyentine bağlıdır. Denklem (3.51) ve Denklem (3.52) birleştirilerek,

$$\begin{aligned} J &= q\mu_n\eta \exp \left[\frac{-q(E_c - \Phi_n)}{kT} \right] \left[\frac{d\Phi_n}{dx} \right] \\ &= kT\mu_n N_c \exp \left[\left(\frac{-qE_c}{kT} \right) \frac{d}{dx} \right] \left[\exp \left(\frac{q\Phi_n}{kT} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.54)$$

elde edilir. Difüzyon teorisi varsayımlarına göre kararlı hal koşulu altında, akım yoğunluğu x konumundan bağımsızdır ve $x = 0$ ve $x = w$ sınırları arasında taşıyıcı konsantrasyonları akım iletiminden etkilenmez (denge koşulları) bu denklemin integrali alınır ve N_d donör yoğunluğunun sabit olduğu düşünülürse, sınır koşulları kullanılarak;

$$qV(0) = -q(\Phi_n + V_{bi}) = -q\Phi_B \quad (3.55)$$

$$qV(w) = -q(\Phi_n + V) \quad (3.56)$$

$$n(0) = N_c \exp \left[\frac{-(E_c(0) - E_f)}{kT} \right] = N_c \exp \left[-\frac{q\Phi_B}{kT} \right] \quad (3.57)$$

$$n(w) = n = N_c \exp \left[-\frac{q\Phi_n}{kT} \right] \quad (3.58)$$

olur ve Denklem (3.55) kullanılarak

$$\begin{aligned}
 J &= 2kT\mu_n N_c \alpha^2 w \left\{ \exp\left[\frac{qV}{kT}\right] - 1 \right\} / \exp\left(\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \\
 &= q\mu_n N_c E_{max} \exp\left(\frac{q\Phi_B}{kT}\right) / \left\{ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right\}
 \end{aligned} \tag{3.59}$$

biçiminde elde edilir. Gauss Teoremi'ne göre ara yüzeyin maksimum alan değeri ϵ_s yarıiletken dielektrik sabiti, w tükenim bölgesi genişliği olmak üzere; $E_{max} = qN_d w / \epsilon_s = 2kT w \alpha^2 / q$ kullanılarak Denklem 3.58, difüzyon teorisi ile belirlendiği gibi

$$J_D = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \tag{3.60}$$

ve bu denklemdeki doyma akım yoğunluğu şu şekildedir;

$$J_0 = q\mu_n N_c E_{max} \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \tag{3.61}$$

Termiyonik emisyon teorisindeki doyma akım yoğunluğu ile kıyaslandığında sıcaklığa daha az bağlı olduğu görülebilir.

3.5.3. Genelleştirilmiş Kuram Termiyonik Emisyon-Difüzyon Teorisi

Isısal yayılım/sürüklenme-difüzyon kuramlarının birleştirilmesi ilk olarak Crowell ve Sze tarafından verildi [57]. Bu kuramda, en büyük potansiyel değerinde v_R etkin yeniden birleşme hızı tanımlanır. Bariyer üzerinden yayımlanan elektronların akım yoğunluğu şu şekilde verilir:

$$J = q(n_m - n_0)v_R \tag{3.62}$$

Burada n_m ileri besleme durumunda akım geçerken maksimum potansiyel enerjide ki x_m konumundaki elektron yoğunluğudur ve şu şekilde verilir;

$$n_m = N_c \exp \left[\frac{E_{Fn}(x_m) - E_c(x_m)}{kT} \right] = N_c \exp \left[\frac{E_{Fn}(x_m) - q\Phi_B}{kT} \right] \quad (3.63)$$

$E_{Fn}(x_m)$, V besleme gerilimi varken x_m konumundaki Fermi seviyesidir (eV olarak). n_0 ise x_m konumunda denge durumundaki elektron yoğunluğudur. $E_{Fn}(x_m) = E_{Fn}$ konumunun potansiyel enerji maksimumunun konumunu ya da büyüklüğünü değiştirmeden dengeye ulaşmak mümkün olduğu durumda şöyle ifade edilir:

$$n_0 = N_c \exp \left(\frac{-q\Phi_B}{kT} \right) \quad (3.64)$$

Diğer sınır şartı ele alınırsa $E_{Fn}(x_m) = 0$

$$E_{Fn}(W_D) = qV \quad (3.65)$$

Crowell ve Sze, difüzyon akımını yayılım akımına eşitleyerek, elektron akım yoğunluğu için son ifadeyi aşağıdaki gibi bulmuşlardır:

$$J_{TED} = \frac{N_c v_R}{1 + (v_R/v_D)} \exp \left(-\frac{q\Phi_B}{kT} \right) \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (3.66)$$

Bu denklemde v_D termiyonik emisyonu karşı difüzyon katkılarını belirleyen ifadedir ve şu şekildedir;

$$v_D = \left[\int_{x_m}^w \frac{q}{\mu kT} \exp \left(-\frac{q\Phi_B - E_c}{kT} \right) dx \right] \quad (3.67)$$

Elektron dağılımının $x \geq x_m$ için Maxwell dağılımına uydukları ve metalden elektron geri dönmediği ve akım yoğunluğu $qn_0 v_R$ ile ilişkili olduğu ideal ısısal yayıcı durumu kabul edilerek, etkin yeniden birleşme hızı aşağıdaki gibi verilir:

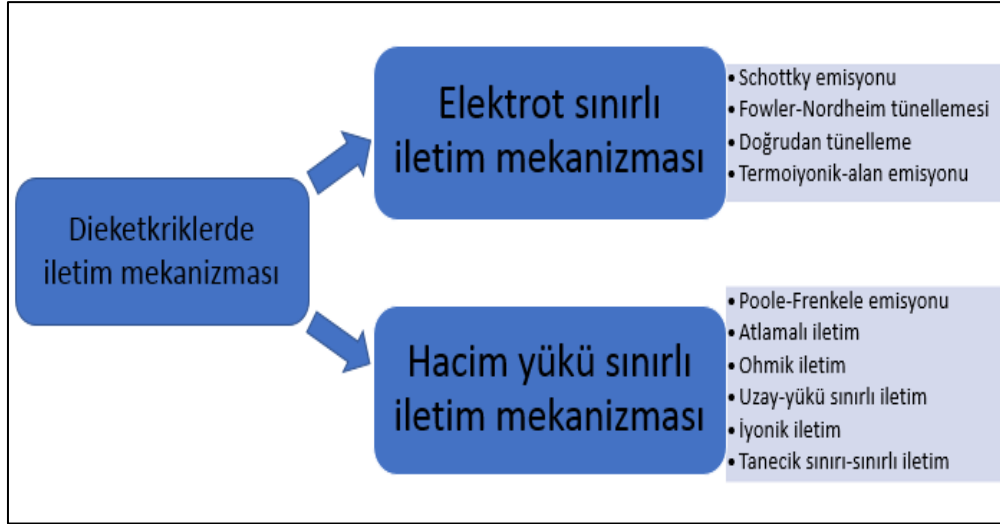
$$v_R = \frac{A^* T^2}{q N_c} \quad (3.68)$$

Burada A^* etkin Richardson sabitidir. $v_R \ll v_D$ durumunda Denklem (3.65) termiyonik emisyon denklemine $J_{TED} = J_{TE}$ ve $v_R \gg v_D$ durumunda ise difüzyon akım yoğunluğu denklemine $J_{TED} = J_D$ dönüşecektir.

3.6. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları

Metal ile yarıiletken arasında yalıtkan bir tabaka içerdiğinden dolayı yapısal olarak kapasitöre benzeyen MIS yapılar 1959'da Moll tarafından ortaya konmuştur [58]. Metal-yarıiletken arasına termal oksidasyon yöntemiyle yahut doğal olarak yalıtkan ara yüzey tabakası eklenmesiyle metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılar oluşur. İki iletkeni izole eden bu yapı kalınlığı $< 100 \text{ Å}$ ise MIS yapı; $> 100 \text{ Å}$ ise metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapı oluşmaktadır. Dünya genelinde literatüre bakıldığında MIS yapılar üzerine yapılan çalışmaların MOS yapılar üzerine yapılan çalışmalardan oldukça az olduğu gözden kaçmamaktadır. Türkiye'de ise MIS yapılar MOS yapılardan daha çok ilgi görmektedir [59]. Ayrıca MIS yapılar yalıtkan malzemenin yüzeyde büyütülmesi durumunda da ismen çeşitlenir, örneğin malzeme polimerse yapı metal-polimer-yarıiletken (MPS) ya da malzeme ferro- elektrik ise metal-ferroelektrik-yarıiletken (MFS) olarak anılır. Yalıtkan yapı metal ve yarıiletken yüzeye ayrıca kontaklanmaz. Arayüzeyin varlığı iki iletkeni izole ettiğinden yük akış mekanizmasını kontrol etmeye yarar. MIS yapıdaki yalıtkan arayüzey tabakanın potansiyel engel yüksekliği gibi temel diyot parametrelerini etkilediği söylenebilir. MIS yapı ve MS yapı karşılaştırıldığında; arayüzeyin varlığının yapının kararlılık ve performans gibi özelliklerine olumlu katkı sağladığı söylenebilir. MIS yapıların I-V ölçüm sonuçlarını değerlendirmelerinin yani idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değeri hesaplamasının MS eklem yapılardan farklı metotlarla gerçekleştirilmektedir. İleri besleme I-V karakteristiği için Cheung fonksiyonları, Norde metodu, Bohlin metodu, Hernandez metodu ve Chattopadhyay metodu gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır.

MIS akım iletim mekanizmasını açıklamak için dielektiklerde iletim mekanizmaları genel olarak elektrot sınırlı ve hacim sınırlı olarak ikiye ayrılır (Şekil 3.8). Aşağıda birkaç model kısaca verilecektir.



Şekil 3.8: Dielektrik filmlerde iletim mekanizması sınıflandırması.

3.6.1. Elektrot-Sınırlı İletim Mekanizması

Bu mekanizma dielektrik arayüzün elektrot elektriksel özelliklerine bağlıdır. Birkaç model şu şekildedir.

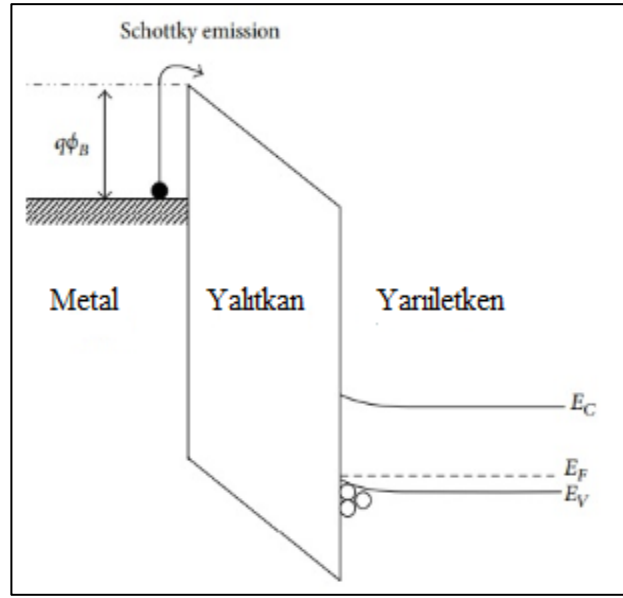
3.6.1.1. Schottky Emisyonu (Termiyonik Emisyon)

Schottky emisyonunda iletim, termal olarak uyarılmış elektronları metal-dielektrik arayüz enerji bariyerini aşarak yarıiletkenine geçmesi şeklinde tanımlanır. Şekil 3.9'da [60] MIS band diyagramında metal elektrota negatif besleme uygulandığı durum gösterildi. Metal-dielektrik arayüzde engeli aşan elektronlardan dolayı bir görüntü kuvveti oluşur ve bu da enerji bariyer yüksekliğinin düşmesine yol açar. Metalden yarı iletkenine gerçekleşen bu elektron emisyonuna termal emisyon yahut Schottky emisyon denir. Matematiksel olarak J akım yoğunluğu şu şekilde ifade edilir.

$$J = A^* T^2 \exp \left[\frac{-q(\Phi_B - \sqrt{qE/4\pi\epsilon_r\epsilon_0})}{kT} \right] \quad (3.69)$$

$$A^* = \frac{4\pi k^2 m^*}{h^3} = \frac{120 m^*}{m_0} \quad (3.70)$$

A^* etkin Richardson sabiti, m_0 serbest elektron kütlesi, m^* dielektrik içerisindeki etkin elektron kütlesi, T mutlak sıcaklık, q elektron yükü, $q\phi_B$ Schottky bariyer yüksekliği, E elektrik alan, k Boltzman sabiti, h Plank sabiti, ϵ_0 boşluğun elektriksel geçirgenliği, ϵ_r dinamik dielektik sabitidir (bilindiği üzere dielektik sabiti kırılma indisinin karesine $\epsilon_r = n^2$ yakın olmalıdır).



Şekil 3.9: Metal-yalıtkan-yarıiletken yapıda Schottky emisyon enerji bant diyagram şeması.

Termiyonik emisyon dielektrik filmler için nispeten yüksek sıcaklıklarda en sık gözlenen iletim mekanizmalarından biridir. Simmons 1965 yılında yayımladığı makalede, yalıtkan elektronik ortalama serbest yolun dielektrik filmin kalınlığından daha az olması durumunda Schottky emisyonu denkleminin değiştirilmesi gerektiğini belirtti [61].

3.6.1.2. Fowler-Nordheim Tünellemesi

MIS yapı için en önemli mekanizmaların başında gelir. Fowler-Nordheim (F-N) etkisi ayrıca metalden diğer bulk kristal katılara tünel etkisi olarak da bilinir. Klasik fiziğe göre açıklanmayacak bu tünel durumu kuantum mekaniği ile açıklanabilir. Klasik fiziğe göre potansiyel bariyeri ile karşılaşan bir elektronun enerjisi bariyerden düşükse, bariyeri geçemez ve geri yansır. Ancak kuantum mekaniği bu duruma ilginç

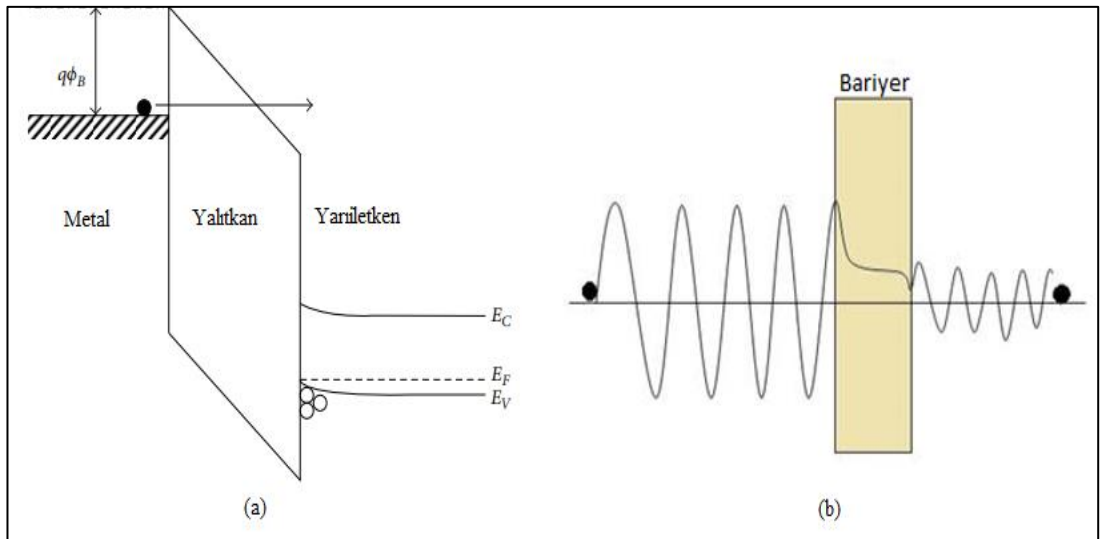
bir olasılık önerir, buna göre bariyer yeterince ince ise ($100 \text{ \AA}$); çok düşük bir ihtimalde olsa elektron dalga fonksiyonu bariyerin içine nüfuz edebilir. Çünkü kuantum fiziğinde elektron bir dalga fonksiyonu ile temsil edilir. Dalga fonksiyonu bariyerle karşılaştığında aniden durmak yerine onun içinden geçebilir. Şekil 3.10.b’de gösterildiği gibi elektronun parçacık dalgası dualite özelliğinden kaynaklanmaktadır. Elektron dalgası bariyerden geçerken, enerjisi değişmeden dalga genliği azalarak sönümlenir.

Bariyer yüksekliğinin üstesinden gelmek için daha az enerjiye sahip olmasına rağmen elektronun potansiyel bariyerden geçebileceği bulunmuştur. F-N tünellemesi olabilmesi için, uygulanan elektrik alanın yeterince büyük olması gerekmektedir. Tünelleme akımını bulmak için çok düşük sıcaklıkta cihazların akım voltajı karakteristikleri ölçülmelidir. Düşük bir sıcaklıkta, termiyonik emisyon çok küçüktür ve tünelleme akımı baskındır.

F-N tünellemesi

$$J = \frac{q^2 E^2}{8\pi h \Phi_B} \exp \left[\frac{-8\pi(2qm_T^*)^{1/2}}{3hE} \Phi_B^{3/2} \right] \quad (3.71)$$

şeklinde matematiksel olarak verilir. m_T^* tünelleme yapan taşıyıcı kütlesidir. Diğer kısaltmalar daha önce tanımlanmıştır.



Şekil 3.10: a) MIS yapının Fowler-Nordheim tünellemesinin şematik enerji band diyagramı, b) elektron dalgasının bariyerden geçişi.

Şekil 3.10 [60] Metal-yalıtkan-yarıiletken yapının F-N tünellemesinin şematik enerji band diyagramı gösterildi. Çok yüksek bir alan uygulanırsa, potansiyel bariyerin yüksekliği ve genişliği azalır. Bu tünel açma işlemi genişliğe bağlıdır ve aslında, bu yük enjeksiyon teorisinde, potansiyel bariyerin genişliği bariyer yüksekliğinden çok daha önemlidir. Daha uzun ve daha geniş bariyerler için tünel olasılığı azalır.

3.6.1.3. Doğrudan Tünelleme

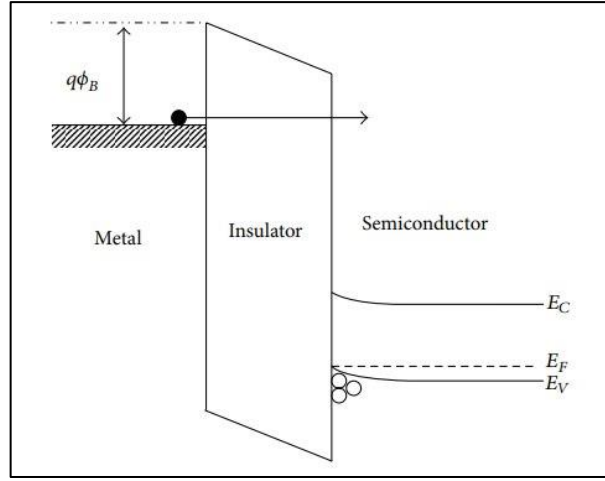
Fowler-Nordheim tünellemesine göre, uygulanan elektrik alan yeterince yüksek olduğunda bantlar doğrusal olarak çok fazla eğilirler ve üçgensel bir potansiyel engeli oluşur. Bu engelle karşılaşan yük taşıyıcıları görece daha ince dielektrik bölgesinden geçer. Ancak alan yeterince büyük değilse o halde yük taşıyıcıları dielektrik katmanın tamamını aynı potansiyelde hisseder ve doğrudan tünelleme oluşturarak dielektrik yüzeyden geçer (Şekil 3.11, [60]). Doğrudan tünellemenin de klasik fizikte karşılığı yoktur. Klasik fiziğe göre taşıyıcılar ancak fazla enerjiyle bariyerin üstünden aşabilirler, bu ise termiyonik emisyondur. Doğrudan tünelleme akım yoğunluğu matematiksel ifadesi genel olarak şu şekildedir.

$$J = \frac{q^2 C(V_G, V_{oks}, t_x, \phi_B)}{8\pi h \epsilon \phi_B} \exp \left\{ -\frac{8\pi\sqrt{2m^*}(q\phi_B)^{3/2}}{3hq|E|} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{|V_{oks}|}{\phi_B} \right)^{3/2} \right] \right\} \quad (3.72)$$

Burada, t_x oksit tabaka kalınlığı, V_G gate voltajı, V_{oks} dielektrik malzeme boyunca gerilim ve C düzeltme fonksiyonunu ifade etmektedir. Yaklaşık olarak şöyle formülize edilir.

$$C(V_G, V_{oks}, t_x, \phi_B) = \exp \left[\frac{20}{\phi_B} \left(\frac{|V_{oks}| - \phi_B}{\phi_0} + 1 \right)^\alpha \cdot \left(1 - \frac{V_{oks}}{\phi_B} \right) \right] \cdot \frac{V_G}{t_x} \cdot N \quad (3.73)$$

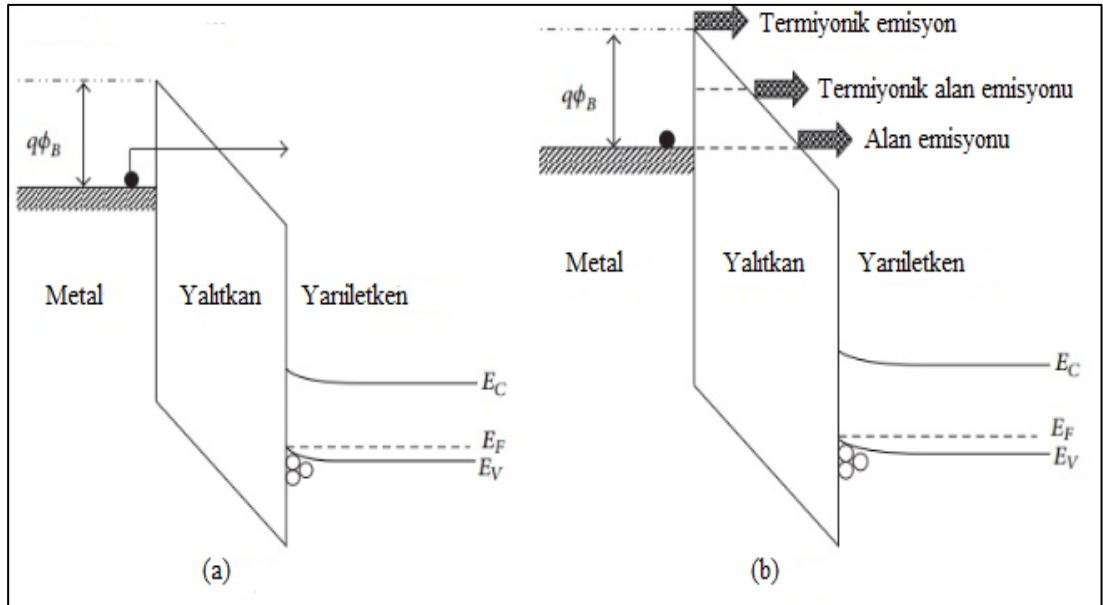
Burada α tünel süreci fitting parametresidir. N ise yardımcı fonksiyon (auxiliary function) ifadesidir. Daha fazla detaya ilgili makaleden ulaşılabilir.



Şekil 3.11: MIS Yapıda doğrudan tünelleme için enerji diyagramı.

3.6.1.4. Termiyonik Alan Emisyon

Termiyonik alan emisyonu Şekil 3.12’de [60] gösterildiği gibi alan emisyonu ile Schottky emisyon arasında yer alır. Tünellenen elektronların enerjileri metalin Fermi enerjisi ile dielektriğin iletim bandı sınırı arasında olmalıdır.



Şekil 3.12: a) MIS yapıda Termiyonik-alan emisyonu enerji bant diyagramı şeması, b) Termiyonik emisyon, alan emisyonu ve termiyonik-alan emisyonu kıyaslaması.

Termiyonik-alan emisyonu matematiksel olarak şu şekildedir,

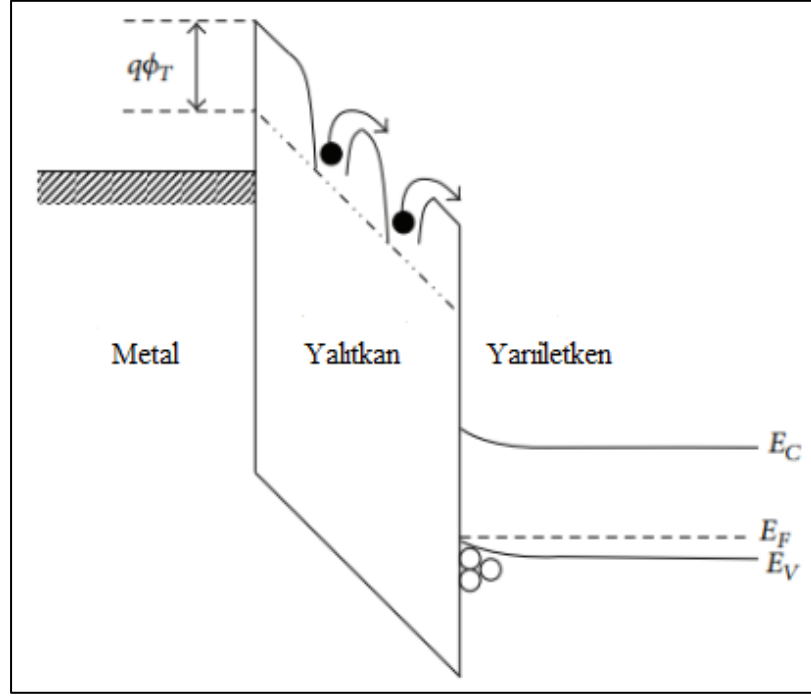
$$J = \frac{q^2 \sqrt{m} (kT)^{1/2} E}{8 \hbar^2 \pi^{5/2}} \exp\left(-\frac{q \Phi_B}{kT}\right) \exp\left[\frac{\hbar^2 q^2 E^2}{24 m (kT)^3}\right] \quad (3.74)$$

3.6.2. Katı-Sınırlı İletim Mekanizması

Hacim sınırlı iletim mekanizmaları dielektriğin elektriksel özelliklerine bağlıdır. Önemli parametre dielektrik filmin sahip olduğu enerji seviyesi tuzaklarıdır. Dielektriğin tuzak enerji seviyeleri, tuzak konumları, tuzak yoğunluğu, dielektrik rahatlama zamanı ve iletim bandındaki durum yoğunluğu gibi parametrelere bağlı olarak değişen birkaç çeşit mekanizma şu şekildedir.

3.6.2.1. Poole-Frenkel Emisyonu

Poole-Frenkel emisyonu, Schottky emisyonuna benzer şekilde termal uyarım içerir. Burada elektronların termal uyarımı, tuzaklardan dielektrik iletim bandına yayılabilir (Şekil 3.13, [60]). Poole-Frenkel etkisi bize elektronun bariyeri geçmesi için ne kadar termal enerjiye ihtiyaç duyduğunun cevabını verir denilebilir. Bu yüzden bazen iç Schottky emisyonu olarak adlandırılır. Tuzak merkezindeki bir elektron göz önüne alındığında, dielektrik film boyunca uygulanan bir elektrik alanı ile elektronun Coulomb potansiyel enerjisi azaltılabilir. Potansiyel enerjideki bu azalma termal olarak uyarılıp iletim bandına geçen elektron sayısını arttırabilir.



Şekil 3.13: MIS yapıda Poole-Frenkel emisyonu şematik gösterimi.

Poole-Frenkel emisyonu için akım yoğunluğu şu şekildedir,

$$J = q\mu N_C E \exp \left[\frac{-q(\Phi_T - \sqrt{qE/\pi\epsilon_i\epsilon_0})}{kT} \right] \quad (3.75)$$

Burada μ elektronik sürüklenme hareketliliği, N_C iletkenlik bandı durum yoğunluğu $q\Phi_T$ tuzak enerji seviyeleridir.

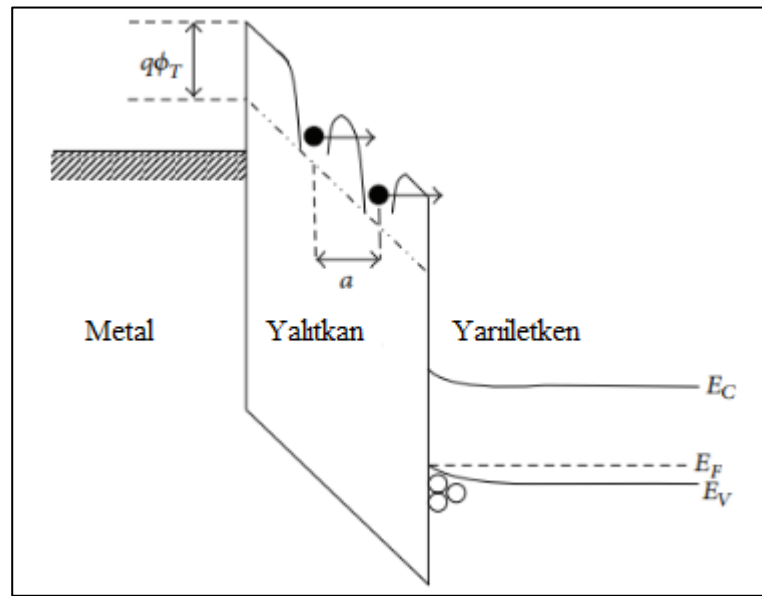
3.6.2.2. Atlamalı İletim

Atlamalı iletim, dielektrik film içinde tuzaklanmış elektronların bir tuzaktan diğerine tünellenme etkisi olarak tanımlanabilir.

Atlamalı iletim matematiksel olarak;

$$J = qanv \exp \left[\frac{qaE}{kT} - \frac{E_a}{kT} \right] \quad (3.75)$$

Şeklinde ifade edilir. Burada a Şekil 3.14’de [60] gösterilen tuzaklar arası ortalama mesafedir. n dielektriğin iletim bandındaki elektron yoğunluğu, ν tuzaktaki elektronların ısısal titreşim frekansı, E_a aktivasyon enerjisi (E_C tuzak durumlarının iletim bandının tabanına kadar olan enerji seviyesidir). Poole Frenkel emisyonu termiyonik etki iken atlamalı iletim tünel etkisi gibidir. Poole-Frenkel emisyonunda taşıyıcılar termiyonik mekanizma ile tuzak bariyerini aşabilirler. Ancak atlamalı iletimde taşıyıcının enerjisi iki tuzak bölgesi arasındaki potansiyel bariyerin maksimum enerjisinden daha düşüktür. Bu yüzden üstünden atlayamayıp tünel geçişi yapabilirler.



Şekil 3.14: MIS yapıda atlamalı iletim enerji band diyagramı.

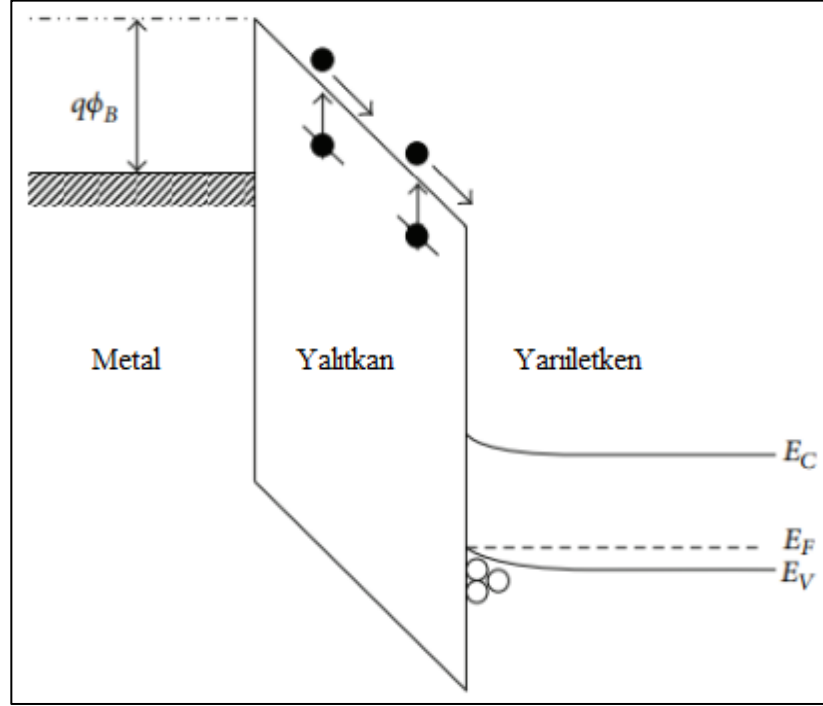
3.6.2.3. Omik İletim

Omik iletim, elektronların iletkenlik bandındaki ve hollerin valans bandındaki hareketlerinden kaynaklıdır (Şekil 3.15, [60]). Bu iletim mekanizmasında elektrik alan ile akım yoğunluğu arasında lineer bir ilişki vardır. Dielektriklerin enerji bant aralığı çok geniş tanımlansa bile sayıca az termal uyarılmış elektronlar iletkenlik bandında bulunabilir. Omik iletim için akım yoğunluğu şu şekilde tanımlanır,

$$J = \sigma E = nq\mu E \quad (3.76)$$

$$n = N_C \exp \left[\frac{-(E_C - E_F)}{kT} \right] \quad (3.77)$$

Burada σ elektriksel iletkenlik, n iletim bandındaki elektronların sayısı, μ elektron mobilitesi, N_C iletim bandındaki etkin durum yoğunluğudur. Bu mekanizma için iletkenlik sıcaklıkla eksponansiyel olarak ilişkilidir.



Şekil 3.15: MIS yapı omik iletim bant diyagramı.

İletim bandındaki hareketli elektronlar veya değerlik bandındaki benzer holler nedeniyle oluşan omik iletim akımı, elektrik alanına doğrusal olarak bağlıdır. Bu akım genellikle dielektrik filmlerin akım-voltaj karakteristiğinde çok düşük voltajda görülebilir. Bu akım mekanizması, dielektiklerde akım taşımada diğer iletim mekanizmalarından önemli bir katkı yoksa gözlemlenebilir.

3.6.2.4. Uzak-Yükü Limitli İletim

Uzak-yükü limitli iletim mekanizması vakum diyodunda elektronları taşıma iletimine benzerdir. Uzak-yük sınırı mekanizması, kontak sınırında bir akümülyasyon bölgesinde yük depolaması olursa elektronlar potansiyeli aşmak için uyarılmaya

ihtiyaç duymazlar. Düşük voltajlarda da çalışabilecek bu mekanizmada termal etki ile de taşıyıcı yoğunluğu enjekte edilmiş yoğunluğu aşar. Ohm kanunu ile uyumlu bir mekanizmadır. Matematiksel olarak şöyle formülize edilebilir,

$$J = \frac{9\varepsilon_i\mu V^2}{8d^3} \quad (3.78)$$

3.6.2.5. İyonik İletim

İyonik iletkenlik difüzyon sürecine benzer. DC iyonik iletkenliği, elektrik alanının uygulandığı süre boyunca azalır, çünkü iyonlar yalıtkanın içine kolayca enjekte edilemez veya çıkarılamaz. Başlangıç akımından sonra, elektronlar ya da boşluklar metal-yalıtkan ve yarıiletken-yalıtkan arayüzeyde potansiyel dağılımının bükülmesine sebep olurlar. Uygulanan elektrik alan kaldırıldığında, geniş iç alanlar kalır, bazı iyonlar ise denge pozisyonlarına doğru geri akar. Bu nedenle histeris I-V grafiği gözlemlenir.

3.7. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken Kapasitör Oluşumu

Metal ile yarıiletken arasında bazen istenilerek, bazense kendiliğinden bir tabaka oluşur bu tabaka yalıtandır denilebilir. Bu yapılar MIS yapı olarak isimlendirilir. Metal ve yarıiletken tabaka arasındaki yalıtkan tabakadan dolayı metal ve yarıiletken arasında bir kapasitans oluşacağından, MIS yapıları elektriksel özellik olarak kapasitörlere benzemektedir. Kapasitans arayüzeyin dielektrik sabitine bağlıdır. İdeal MIS yapılarda yalıtkan katmanın iletkenliği sıfır alınır. Ancak gerçekte, elektrik alan ve sıcaklıkla bu tabakanın iletkenliği sıfır olmayacaktır. Bu yalıtkan olarak nitelendirdiğimiz ara yüzey tabakası metal ile yarıiletkeni birbirinden izole eder ve metal yarıiletken arasındaki yük geçişini düzenler. İleri besleme durumunda yalıtkan bölgedeki elektrik alan

$$\xi_i = \xi_s \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_i} \right) \approx \frac{V}{d} \quad (3.79)$$

Burada, ξ_i , ξ_s sırasıyla yalıtkandaki ve yarıiletkendeki elektrik alan, ε_i ve ε_s dielektrik sabitidir. Bu denklemle ilgili şunu belirtmekte fayda vardır, ihmal edilebilir oksit yükleri olduğunu ve düz bant voltajının ve yarı iletken bant ψ_s bükülmesinin uygulanan voltajla karşılaştırıldığında küçük olduğunu varsayar. İdeal bir MIS yapı şu özelliklere sahiptir.

- Herhangi bir gerilim uygulanmaz iken metalin iş fonksiyonu ve yarıiletkenin iş fonksiyonu arasındaki fark sıfırdır.
- Bir besleme durumu olduğunda, yapıda bulunan yükler yalıtkan ile bitişik, metal yüzeydekiler ile yarıiletkendekiler eşit miktarda fakat zıt yönlüdür.
- Metal elektroda gerilim uygulanması durumunda ideal bir MIS yapıda yarıiletkende yük kaymaları meydana gelir.

MIS eşdeğer devrenin toplam kapasitansı ε_i yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti, A doğrultucu kontağın yüzey alanı ve d_i yalıtkan tabaka kalınlığı olmak üzere şu şekildedir.

$$C_i = \frac{\varepsilon_i}{d_i} A \quad (3.80)$$

İdeal bir MIS yapı yükleri için yığılma veya toplanma (accumulation), tüketim (depletion) ve tersinim (inversion) sistemleri söz konusudur.

3.7.1. Yığılma

MIS yapılarda yarıiletkenin p-tipi olduğu durumda metal elektroduna negatif gerilim uygulandığında, bu gerilimden dolayı oluşan elektrik alan yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcıları olan boşlukları yarıiletken ara yüzeyine doğru çekecektir. Yük akışı olmadığı zaman ideal bir diyotta yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi sabit kalır. Taşıyıcı yoğunluğu eksponansiyel olarak Fermi ve valans bandın enerji seviyesi farkına bağlı olduğundan, bant bükülmesi yarıiletken yüzeyinin yakınlarında çoğunluk taşıyıcı olan boşlukların yığılmasına sebep olur. Yarıiletken yüzeyinde değerlik bandının Fermi seviyesine yaklaştığı, iletkenlik bandının ise buna bağlı olarak yukarı doğru büküldüğü bu duruma, çoğunluk yük taşıyıcılarının ara yüzeyde birikmiş

olmalarından dolayı “yığılma” adı verilir. Yarıiletkenin kapasitansı çok büyük olacaktır.

3.7.2. Tükenim

MIS yapının yarıiletkeninin p-tipi olduğu durumda metal elektrotuna küçük pozitif bir gerilim uygulanırsa yalıtkan içinde oluşan elektrik alan yüzünden yarıiletken ara yüzeydeki boşlukları yüzeyden uzaklaştırır. Böyle bir durumda yarıiletken yüzeyde bulunan boşluk yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındaki boşluk yoğunluğundan küçük olmaya başlar dolayısıyla bantlar aşağı doğru bükülür. İletkenlik bandının yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerinde, elektronlar birikmeye başlar. Yarıiletkenin yüzeyinde, uygulanan gerilimle genişliği değişen bir bölgede, boşlukların azaldığı bir tükenim bölgesi oluşur. Buna “tükenim” olayı denir.

3.7.3. Tersinim

MIS yapıda p-tipi bir yarıiletken olması durumunda metal elektroduna büyük bir pozitif gerilim uygulandığı zaman bantlar aşağıya doğru bükülür. Saf durumdaki enerji seviyesi fermi seviyesinin altına geçer. Bu durumda yarıiletken yüzeyinde ki azınlık taşıyıcılar olan elektron sayısı artmaya başlar. Elektron yoğunluğu boşluk yoğunluğundan daha büyük olur. Bu aşamadan sonra p-tipi yarıiletken yüzeyi n-tipi yarıiletken yüzeyi gibi davranmaya başlar. Bu olay, yarıiletken yüzeyinin tersinimi olarak adlandırılır. Bu durumda cihazın MIS kapasitesini, elektron yoğunluğunun uygulanan gerilimin ac sinyalini takip edebilme yeteneği belirler. Elektron yoğunluğu AC sinyalini küçük frekanslarda takip edebilir ve dolayısıyla kapasitesi artan gerilimle yalıtkan kapasite değerine ulaşır. Ara frekanslarda daha yavaş takip edebilir, buna bağlı olarak ara frekans eğrileri görülür. Yüksek frekanslarda takip edemez. Sabit yük uzay yükü gibi etki eder ve kapasite minimum değerinde kalır. Yüksek frekansta gerilim ani olarak değiştirilirse, azınlık taşıyıcıların yeniden-birleşme (rekombinasyon) hızına bağlı olarak tersinim yükü geç birikir bu da eğrinin minimum kapasitansta kalmasına sebep olur.

4. MEMRİSTOR

4.1. Temel Memristör Parmak İzi

Memristörler karakteristiği ortaya çıkabilmesi için, üç tip belirleyici parmak izi vardır denilebilir [62], [63]. Özetlemek gerekirse;

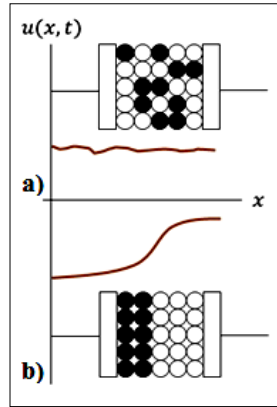
- Herhangi bir iki kutuplu (bipolar) periyodik sinyal uyarımında; akım-voltaj karakteristiğinde sıkıştırılmış histerisis döngüsü göstermek zorundadır. Chua “Eğer sıkıştırılmış histerisis varsa memristördür” dedi [17].
- Sıkışmış histerisis yuvarlak bölgesi (lobe area) uyarılma frekansı arttıkça; monoton olarak azalmalıdır.
- Sıkıştırılmış histerisis döngüsü, frekans sonsuza yöneldiğinde, tek-değerli bir fonksiyona büzülmelidir (shrink).

4.1.1. Memristör Modelleri

Bu eleman, yaşamsal uygulamalarındaki potansiyeli nedeniyle çok önemlidir, bu nedenle memristör tabanlı devrelerin analizi, tasarımı ve simülasyonunda kullanılmak üzere uygun şekilde modellenmelidir. Chua’nın söylediği açıktır “If it’s pinched it’s a memristor”. Ancak bu sıkıştırılmış histerisis döngüsü ilk defa gözlemlenmemekle birlikte, ateş kullanmadan aydınlanmanın ilk araştırmacıları arklar ile aydınlanmayı denediler: Humphry Davy tarafından gerçekleştirilen karbon ark deşarj deneyi, yapay aydınlatma üzerine ilk yazılı kayıt olarak kabul edilir [64]. Deneyleri günümüz şartlarında tekrarlanarak memristörün parmak izlerinin bu deneylerde var olduğu gözlemlendi, insan yapımı ilk memristör olarak kabul edildi [65]. Ayrıca yine aynı dönemlerde Michael Faraday ve Sir Jagadish Chandra Bose tarafından termistörler, elektrik arkları, voltaik yığınlar ve Calzecchi-Onesti’nin coherer etkisi alanında gözlemlendi ve belgelendi, fakat hiç kimse ne anlama geldiğini anlayamadı [66]. Herhangi bir sistemin histerezis davranışı, bir özelliğin diğerinin gerisinde kaldığı ve sistemin bir çeşit atalete sahip olduğu anlamına gelir [66]. 1971’de Chua’nın memristörlerin varlığını ilan ettiği makalenin ardından ilk elle tutulur nesnel model

için bulgular HP laboratuvarlarında yapılan çalışmalarda ortaya çıkan model [6] üzerinden tanımlandı ve sonrasında pek çok model önerildi.

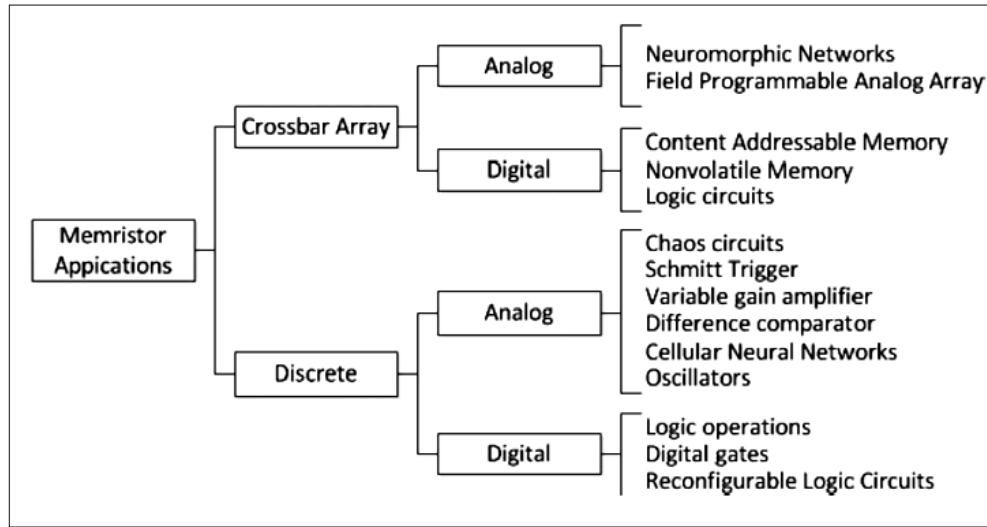
Direnç anahtarlama bellekleri, memristif tabanlı bellek olarak sınıflandırılabilir [17]. Bu anahtarlama iki direnç seviyesine yapılandırılır. Düşük direnç durumu (Low Resistance State-LRS) ve yüksek direnç durumu (High Resistance State-HRS). Bu dirençler mantıksal devrelerden tanıdığımız 0 ve 1 durumlarını aktive eder. Bu cihazlar, Boolean fonksiyonlarının sonuçlarını sunabilen bir ikili anahtar olarak kullanılabilir. Direnç, aygıt boyunca voltaj uygulanarak değiştirilir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1: Dış elektrik alanının etkisi altında, a) Boşluklar, düşük direnç oluşturmak için cihaz hacmi boyunca dağıtılır, b) Boşluklar ilerler ve yüksek direnç oluşturmak için bir uç plakaya biriktirilir.

Memristörün yaygın kullanım alanı olacağı öngörülen hafıza teknolojilerine göre; geleneksel hafıza teknolojileri şu şekilde sınıflandırılabilir; statik rastgele erişimli bellek (Static Random Access Memory-SRAM), dinamik rastgele erişimli bellek (Dynamic Random Access Memory-DRAM), flash bellek, metal-oksit yarıiletken aygıtlar (MOS). Teknoloji daha küçük elemanlara kaydıkça geleneksel belleklerin kaçak akım, performans ölçümlerinin yapılamaması gibi bir takım kullanım zorlukları ortaya çıkmaktadır. Hafıza cihazlarının özellikleri; kapasite, maliyet, hız, unutmama süresi, aktif güç dağıtımı, bekleme gücü, dayanıklılık ve çalışma sıcaklığı gibi birçok performans parametresi tarafından karakterize edilir. Yeni nesil hafıza teknolojileri ise faz-değişimli bellek (Phase-Change Memory-PCM), magnetik rastgele erişimli bellek (Magnetic Random Access Memory-MRAM), ferroelektrik RAM (FeRAM), dirençli RAM (RRAM) ve memristör olarak sınıflandırılabilir. Yakın gelecekte bilgisayar mühendisleri için memristör, klasik bellek cihazları yerine; memristör tabanlı RRAM

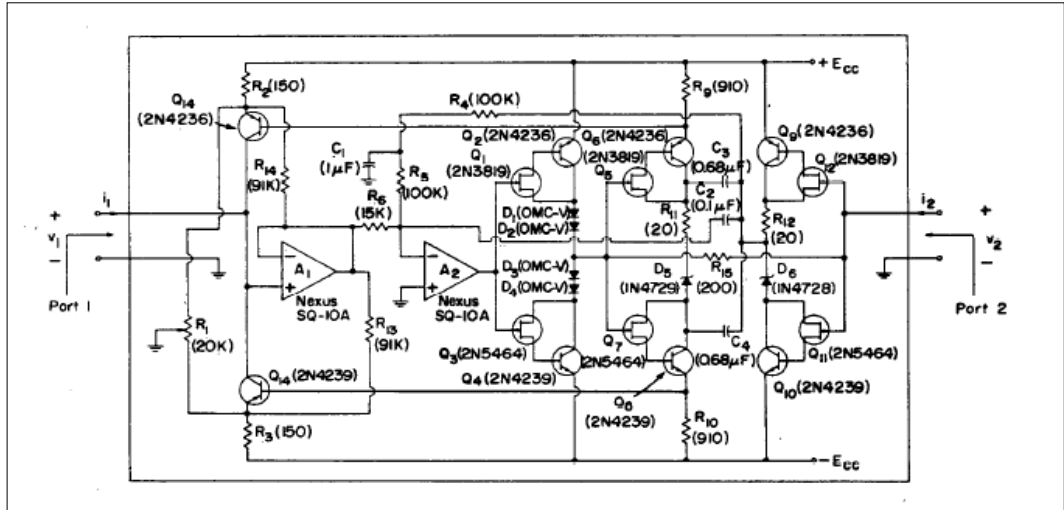
uygulamalarında önemli rol oynayacağı düşünülmektedir [67]. Direnç anahtarlama hafızası Geleneksel bir MOS erişimli bellek hücresinin tersine, memristör tabanlı RRAM, erişim cihazlarını kullanmadan çapraz yüksek bir yapı oluşturma potansiyeline sahiptir. Şekil 4.2’de memristör gelişiminden bu yana uygulama alanlarına ait bir tablo oluşturulmuştur [68]. Memristör dijital bilgisayar alanında uygun kullanıma sahiptir. Bu alandaki uygulamalar, anahtarlama görevi gören programlanabilir bir memristör fikrine dayanmaktadır.



Şekil 4.2: Memristör uygulamaları sınıflandırması.

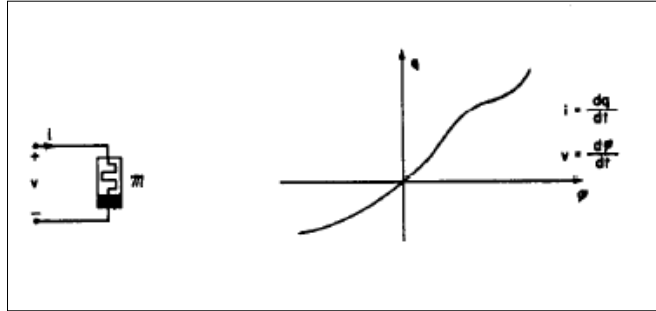
4.1.2. Chua’nın Memristör Modeli

Chua 1971’de “Memristör: Kayıp Devre Elemanı” adlı makalesinde fiziksel olarak bir memristör cihazı değil, temel elektronik devre elemanları ile tasarladığı bir taklit (emülatör) devreyi ele aldı (Şekil 4.3) [1]. Bu devreyi doğrusal olmayan bir direnç sergileyip bellek özelliklerine sahip olduğu için memristör olarak adlandırmıştır.



Şekil 4.3: Chua'nın memristör modeli.

Chua, memristörü ve magnetik akı-yük arasındaki ilişkiyi Şekil 4.4'de görüldüğü gibi aktardı [1].



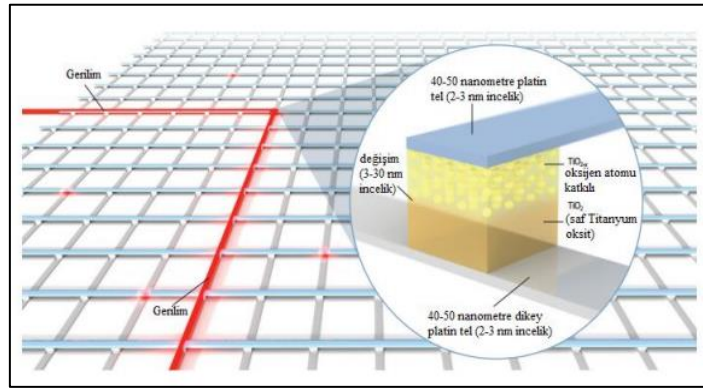
Şekil 4.4: Chua'nın memristör sembolü ve ϕ - q eğrişi.

Chua'nın devresinde memristör, magnetik akı veya yük kontrollü olarak modellenebilir. Chua'nın gerçekleştirdiği taklit devresi aşırı karmaşık bir yapıda olmasından dolayı araştırmacılar yeni taklit devreleri arayışına yöneldiler.

4.1.3. HP Memristör Modeli

2008 yılında, HP laboratuvarlarında bir grup bilim adamı onlarca yıldır kayıp olan devre elemanını bulduklarını ilan etti [6]. Daha sonra memristörü nasıl bulduklarını detaylıca anlattıkları yönlendirici bir kitap yayımlandı [69]. Kısaca değinmek

gerekirse; platin ile iki yüzü kaplanmış TiO_2 malzemenin akım-gerilim grafiğinde gözlemledikleri davranışı uzun bir süre açıklayamadılar. Neredeyse deneyi rafa kaldırmışken, Chua'nın 1971'de yazdığı makaleyi fark edip, anlamak için defalarca okuyup sonunda bulduklarının bahsi geçen memristör olduğuna karar verip sonrasında makalelerini kaleme aldılar [69]. Buna göre platin elektrotlar arasında homojen şekilde oluşturulmuş TiO_2 gerilime maruz kaldığında bir taraf, oksijenlerin Pt tarafına hareketi sonucu oksijence azaltılmış TiO_{2-x} gibi davranmaktaydı. Gerilim cihaz üzerinden kaldırıldığında dahi bu iyonlar bulundukları yerde kalıp (frozen) yeniden akım verildiğinde kaldıkları yerden harekete başlıyorlardı. Bu iyonların hareketini gözünüzde canlandırmak isterseniz asitli şeffaf bir içeceğin içinde yukarı doğru çıkan baloncukları düşünebilirsiniz.

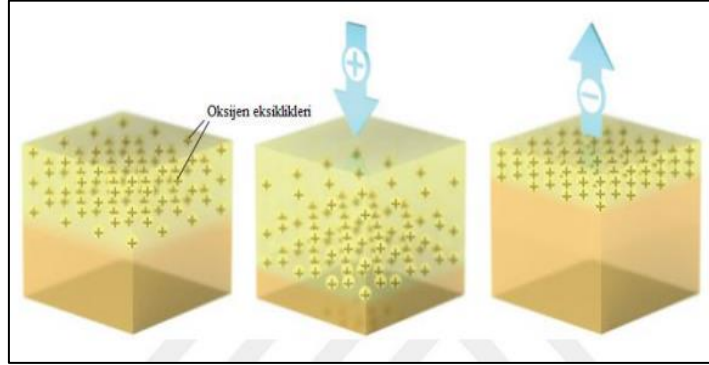


Şekil 4.5: Hp laboratuvarında üretilen çapraz mimari memristör ve fiziksel iç yapısı.

İç yapısı Şekil 4.5’de gösterilen memristör çapraz çerçeve mimarisi, birbirine temas halinde olan dikey tel kafeslerden oluşmaktadır [69]. Keşişim noktaları da iki geçiş teli bir anahtar gibi davranır. Bir anahtar, iki katmandaki 40 nanometre küp TiO_2 ’dir. Alttaki TiO_2 tabakasının, 2:1 oksijen-titanyum oranına sahip olan mükemmel bir yalıtkan olduğu bilinir. Buradaysa, üstteki TiO_2 tabakasının oksijeninin (TiO_{2-x}) %0.5’i eksik olduğundan, x , yaklaşık 0.05’dir. Boşluklar, TiO_{2-x} malzemesini metalik ve iletken hale getirir. Anahtarı kapalı konuma getirmek için, bağlanacak iki kablo arasında pozitif bir gerilim uygulanır. Anahtarı açmak için gerilim tersine çevrilir.

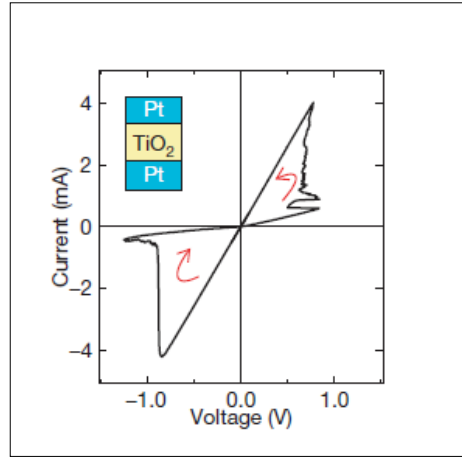
TiO_{2-x} oksijen eksiklikleri, Şekil 4.6’da [69] üst katmana dağılmış olan oksijen “kabarcıkları” olarak ortaya çıkmaktadır. Anahtar, pozitif bir gerilim uygulandığında; pozitif oksijen boşlukları metalik TiO_{2-x} katmanını terk ederek onları aşağıdaki

yalıtkan TiO_2 tabakasına gönderir. Böylece yapı iletken olur. Anahtar üzerindeki gerilim negatif ise, pozitif yüklü oksijen kabarcıklarını TiO_2 'den çeker. Böylece cihazın direnci artar. İki yüzyıldan fazladır kullanılagelen hiçbir pasif devre elemanı bu anahtarlama işlemine benzer bir grafik sergilememektedir. Bunun sebebinin ise oksijen kabarcıklarının gerilim kapatıldığında oldukları yeri terk etmemesi yani göç etmemesi olduğu görülmektedir.



Şekil 4.6: Memristör iç yapısında oksijen hareketleri.

Chua'nın bahsettiği dördüncü devre elemanı da son direnç durumunu hafızasında tutuyordu. Memristör, güç kapatıldığında sistemin bulunduğu son durumu yıllar geçse dahi hafızaya alıp koruyabildiği için bilgi işlem sistemleri geliştirmeyi mümkün kılabilir hatta açma düğmesine bastığınızda sistemin açılması için beklemek zorunda kalmayabiliriz. Memristör direnci, uygulanan gerilimin büyüklüğüne, polaritesine ve gerilimin uygulandığı süreye bağlıdır. Şekil 4.7'de, HP laboratuvarlarında bulunan memristör I-V grafiği gösterildi [6].



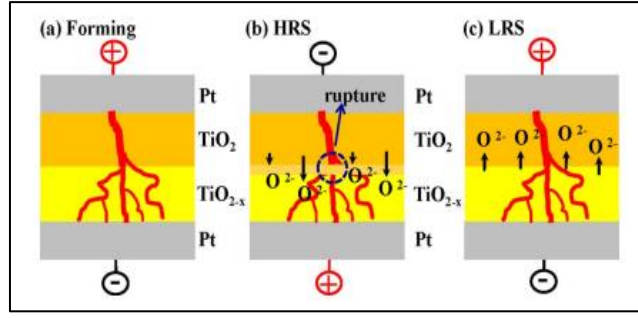
Şekil 4.7: HP Modelinin I-V grafiği.

Kırmızı oklar döngüleri göstermektedir; yüksek direnç ve voltaj arttıkça akımda yavaş bir artma vardır. Yük akarken direnç azalır ve maksimuma erişene kadar gerilim artmasına bağlı akım daha hızlı yükselir. Grafiğin üçüncü bölümünde ise gerilim düştükçe akım azalır, bu aşamada cihazdan yük akar ve direnç düşmeye devam eder. Dolayısıyla grafikte papyonun uç noktaları gibi görünen pik döngüler anahtar gibi davranır. Sonuç olarak karşımıza bir açma-kapama yani anahtarlama döngüsü çıkar. Gerilim negatif olduğunda, cihazın negatif direnci artar, bunun sonucunda Şekil 4.7’de görülen kapalı devre döngüsü oluşur [67].

4.2. Memristörde Elektriksel İletkenlik

HP ekibi tarafından üretilen Pt/TiO₂/TiO_{2-x}/Pt memristör yapısı metal-yarıiletken kontak yapısına sahiptir. Metal-yarıiletken kontak yapıları omik yahut Schottky benzeri davranış gösterebilir. Yapı ikiye bölünüp incelendiğinde Pt/TiO₂ tarafı oksijence zengin tabakasından dolayı Schottky benzeri davranış sergilerken TiO_{2-x}/Pt tarafı ara yüzeyi tipik bir metal-yarıiletken kontak yapısında omik direnç karakteri sergilemektedir [70].

Akım mekanizması ile ilgili neler olduğu konusuna biraz değinmek gerekirse ki halen aygıtların anahtarlama mekanizmaları daha detaylı araştırılmaktadır. Uygulanan elektrik alanla oksijen iyonları ve oksijen boşluklarının göçü ile rezistif anahtarlama gerçekleştirilir. Bu yüzden rezistif anahtarlama çalışmalarında redoks tepkimeleri üzerine odaklanılmaktadır.



Şekil 4.8: Yapının a) Forming, b) Yüksek direnç durumu, c) düşük direnç durumu.

Şekil 4.8.a'da görüldüğü gibi, TiO_2 ile TiO_{2-x} tabakaları arasında redoks reaksiyonu sonucunda oluşan filament yapıda iletim kanalının oluşumu gösterilmektedir. Uygulanan voltajın polaritesinin değişimi durumunda kanalın kopması gerçekleşir. Elektrik alan altında oksijen iyonlarının TiO_{2-x} tabakası içinde tuzaklanma ya da tuzaklanmama olayı gerçekleşir. TiO_2 tabakası oksijen tutulumu gibi davranırken TiO_{2-x} tabakası daha düşük oksijen iyon yoğunluğuna sahiptir. Bu yüzden TiO_{2-x} tabakası oksijen iyonlarının hareketine TiO_2 tabakadan daha duyarlıdır. Şekil 4.8.b'de görüldüğü gibi, negatif bir voltaj uygulandığında oksijen iyonları TiO_{2-x} tabakasından TiO_2/TiO_{2-x} kesişim yüzeyine sürüklenir. Bunun sonucu TiO_{2-x} tabakanın ara yüzeylerinde oksidasyon meydana gelir. Elektroforming süreci ile tabaka tamamen oksitlenmiş olur. Aynı zamanda iyon tuzakları için kısmen oksijen iyonları TiO_{2-x} tabaka içine nüfuz eder. Oksitlenen TiO_{2-x} tabaka içindeki oksijen tuzakları elektron akışını engelleyerek memristörün yüksek direnç konumuna geçmesine sebep olur. Ters polaritede gerilim uygulandığı zaman, yüzeyler arasında oksitlenmiş oksijen iyonları ve TiO_{2-x} tabakasındaki tuzaklanmış oksijen iyonları, Şekil 4.8.c'de görüldüğü gibi yüzeyler arasında oluşan filament yapı iletim yoluyla TiO_{2-x} tabakaya doğru hareket eder. Böylece aygıt düşük rezistans durumuna geçer. Bipolar anahtarlama davranışları oksijence yoğun bölgeden oksijence fakir bölgeye iyon hareketinden ve kısmen TiO_{2-x} tabakasındaki oksijen tuzaklanmasından dolayı TiO_2 ve TiO_{2-x} tabakaları arasında ara yüzeylerde meydana gelen redoks reaksiyonlarından kaynaklanabileceği görülmektedir [71]. Özetle Pt/ TiO_2/TiO_{2-x} /Pt memristör yapısında yük akışı cihazın iç direncine bağlıdır. Ve bu direnç, uygulanan gerilimin genliğine ve polaritesine göre değişir. Memristörün çift kutup (bipolar) anahtarlama yapısında olması polariteye olan bu bağılılığı göstermektedir.

Şekil 4.6’da görüldüğü gibi oksijen boşluğunca zengin TiO_{2-x} tabakası üst elektrotta konumlandırıldığı zaman buraya pozitif polaritede bir voltaj uygulandığında, pozitif yöndeki gerilim, pozitif yüklü oksijen boşluklarını karşı elektrotta iterek yük akışı sağlamış olur. TiO_2 bölgesine oksijen boşluklarının geçmesiyle $\text{TiO}_2/\text{TiO}_{2-x}$ tabakaları arasındaki keskin olmayan sınır hareket ederek hem TiO_{2-x} bölgesinin hem de memristörün iletkenliğinin artmasına sebep olur. Pozitif yüklü oksijen boşlukları TiO_2/Pt ara yüzeyine ulaştıklarında, elektronlar için potansiyel bariyeri çok dar olduğundan bariyer boyunca tünelleme oluşur ve çok fazla yük akışı gerçekleşir. Böylece cihaz ON konumuna geçmiş olur. TiO_{2-x} tabakasının bulunduğu bölgeye ters polaritede voltaj uygulandığı zaman negatif gerilim pozitif yüklü oksijen boşluklarını çekerek karşı elektrotta geçmesini engeller. Pozitif yüklü oksijen boşlukları TiO_2 ’nin dışına çekilir. $\text{TiO}_2/\text{TiO}_{2-x}$ tabakasının sınırı hareket ederek TiO_2 ’nin kapladığı alanı arttırır, bu durumda cihazın direnci ve yalıtkanlığı artar. Böylece aygıt tamamen yüksek direnç sergileyerek OFF anahtarlama konumuna geçer. TiO_2 tabakası alt elektrotta olduğu durumda, pozitif polaritede voltaj uygulandığında üst elektrot ile TiO_2 arasında Schottky benzeri davranış sergilenir ve memristör OFF konumuna anahtarlanır. Aynı yapıya ters polaritede voltaj uygulandığında oksijen boşlukları TiO_2 tabakasına gönderilerek yük akışı sağlandığında aygıtın direnci azalır ve memristör ON konumuna anahtarlanır. Memristörün uygulanan voltajın polaritesine göre ON ve OFF anahtarlama konumları (anahtarlama polaritesi), aygıt üretiminde yüzeylerin asimetrisi ile kontrol edilir.

Memristörün kendine özgü histerisis akım-gerilim karakteristiğini incelemek için;

$$\dot{w} = \mu v \frac{R_{ON}}{D} I \quad (4.3)$$

denklemini yararlı olacaktır. Burada w yapının iç durum değişkenini, D yapının kalınlığını, μv iyonik kusurların hareketlerini temsil etmektedir. R_{ON} ve R_{OFF} ise açık (ON) ve kapalı (OFF) durumlarındaki elektriksel dirençtir.

$\dot{w}$ ifadesi aslında akım I nın tam eşitliği değildir. Bundan dolayı zamana göre türev alıp denklemde q yükünü görelim.

$$w(t) = \mu v \frac{R_{ON}}{D} q(t) \quad (4.4)$$

Memristörün sabit bir direnç gibi davranmadığına daha önce değinildi. Ancak cihaz ohm kanununa uyan bir direnç gibi gerilimle doğru, akımla ters orantılı memristöre sahiptir.

$$V(t) = M(q)I(t) \quad (4.5)$$

$$V = \left[R_{ON} \frac{w}{D} + R_{OFF} \left(1 - \frac{w}{D} \right) \right] I \quad (4.6)$$

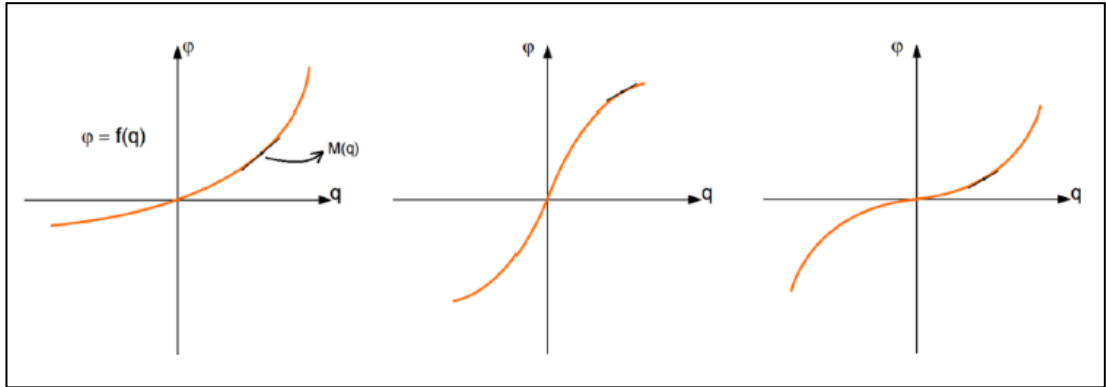
Buradan memristansı;

$$M(q) = R_{OFF} \left(1 - \frac{\mu v R_{ON}}{D^2} \right) q(t) \quad (4.7)$$

olarak çekebiliriz.

4.3. Memristörün Akı-Yük İlişkisi

Memristörün akı-yük (ϕ - q) grafiği çizildiğinde eğimin memristörün direnci olan memristansı vereceğinden daima pozitif olması gerektiği görülmektedir (Şekil 4.9). Memristans negatif değer alamaz $M(q) \geq 0$.



Şekil 4.9: Memristöre ait yük-akı karakteristiğine üç farklı örnek.

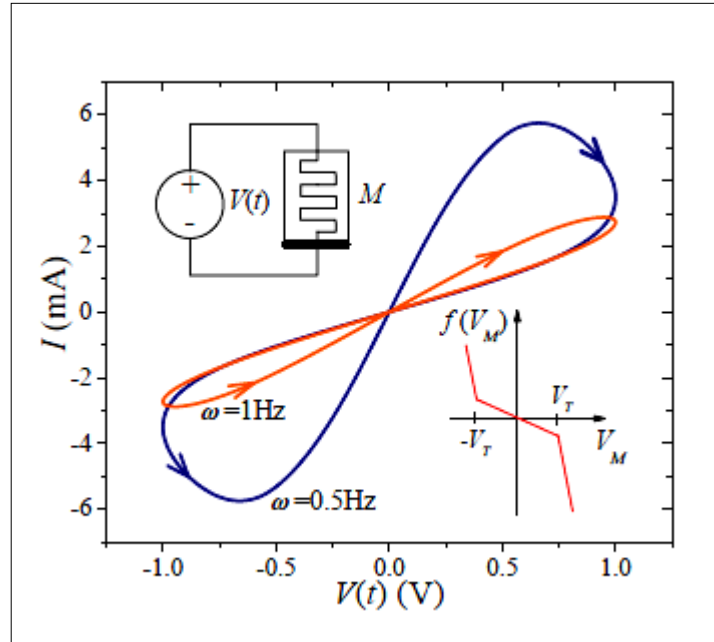
Direnç için yazdığımız güç ifadesini benzer şekilde memristör içinde yazabiliriz.

$$P(i) = M(q)I(t)^2 \quad (4.8)$$

Memristans daima pozitif olması gerektiğinden güç daima pozitif değerde olur.

4.4. Memristörün Akım-Gerilim İlişkisi

Akım-gerilim $I - V$ grafiği devre elemanının karakteristiği açısından belirleyici özelliğe sahiptir. Memristörün parmak izi [72] olarak nitelenen piched histerisis eğrisi için periyodik bir sinyal uygulanması gerekmektedir. Memristör dc sinyal ile çalışmaz. Periyodik bir sinyal tarafından uyarılan bir memristör için, memristör terminalleri arasındaki voltaj $V(t)$ sıfır olduğunda, cihazdan akan akım $I(t)$ de sıfırdır ve bunun tersi de geçerlidir, bu da bize Lissajous eğrilerini (Şekil 4.10) verir [43]. Ancak uygulanan gerilim kapatıldığında akım akışı durmasına rağmen memristör sahip olduğu son direnci hatırlar. Gerilim tekrar uygulanmaya başladığında memristör elemanının direnci en son aktif olduğundaki değerde olacaktır. Bu etki nanometre ölçeğinde, mikrometre ölçeğinde olduğundan milyon kat daha önemlidir ve esas olarak milimetre ölçeğinde ve daha büyük ölçüde gözlemlenemez durumdadır [69].



Şekil 4.10: Memristörün akım-gerilim karakteristiğinin frekansa bağıllığı.

Histerisis eğrisinin loblarının genişlemesi ve daralması ise farklı frekanslardaki sinüzoidal gerilim uygulamaları ile değişmektedir. Düşük olan frekanslarda memristör

çok fazla non-lineerlik gösterirken (genişlemekte), frekans arttıkça non-lineerli azalmaktadır (daralmaktadır). Görünen odur ki, uyarma frekansı sonsuza doğru arttığında, memristör normal, sabit bir direnç gibi davranmaktadır. Yüksek frekanslı durumda, düşük hareketliliğe sahip oksijen boşlukları, AC sinyalinin kutupları yönlerini değiştirmeden önce kayda değer bir mesafe sürüklenememektedirler. Özetle; memristörde bulunan ve iletkenliğe katkıda bulunan iyonları yüksek frekansları takip edememektedir.

4.5. Memkapasitör ve Memindüktör

Ventra, Pershin ve Chua memristöre benzeyen hafızaya sahip kapasitör ve indüktör olması gerektiği fikrini ortaya attılar ve bunları sırasıyla memkapasitör ve memindüktör olarak adlandırdılar [43]. Bunların da *beşinci* ve *altıncı temel devre elemanı* olduğunu söylemek hatalı olmayacaktır [73]. Daha sonra bu memristif elementlerin fiziksel analizleri yapılmıştır [74]. Bunlar sırasıyla şu şekilde tanımlanırlar;

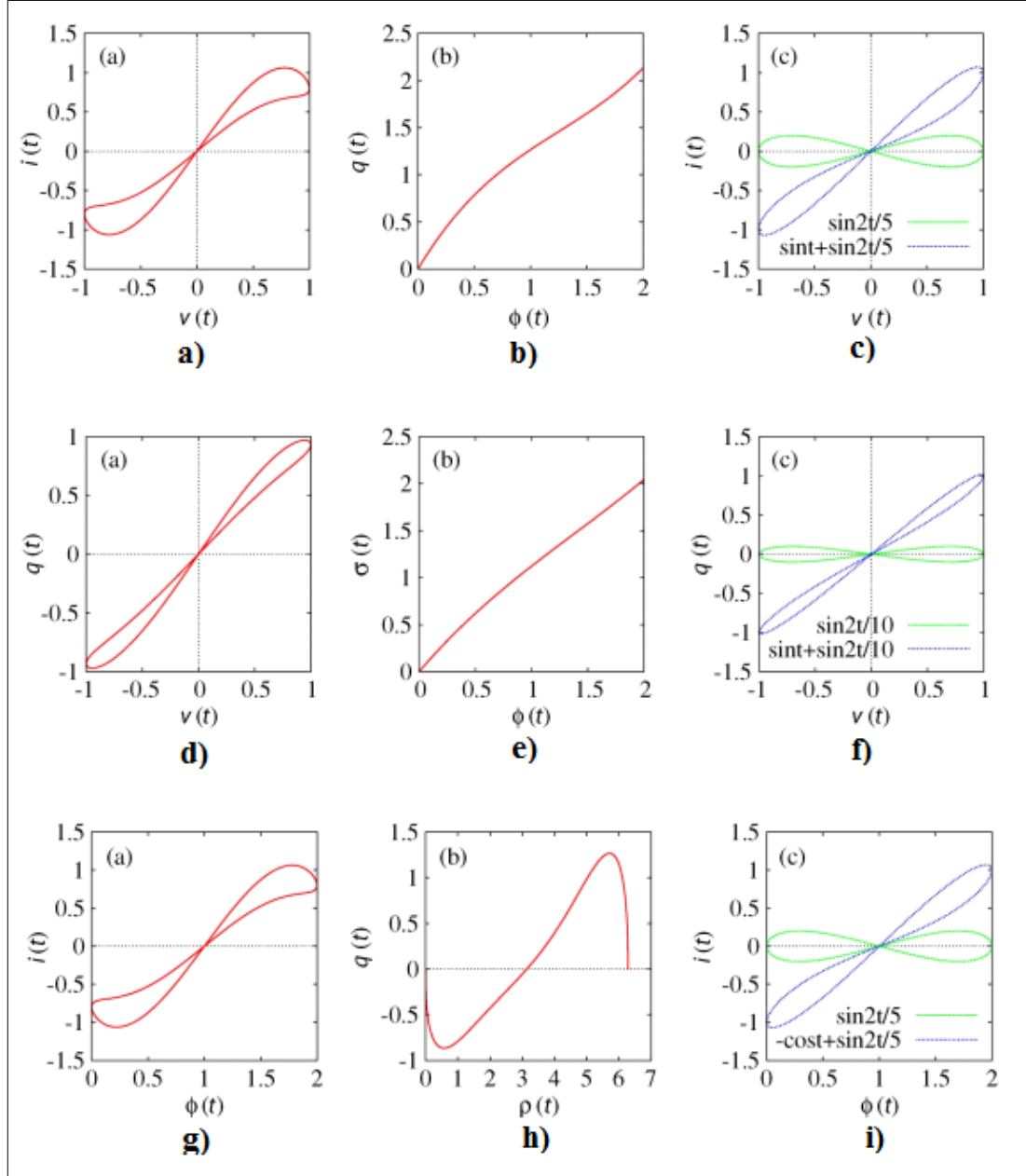
$$C(\varphi) = \frac{d\sigma(\varphi)}{d\varphi} \quad (4.9)$$

$$L(q) = \frac{d\rho(q)}{dq} \quad (4.10)$$

Burada $d\sigma$; magnetik akı φ 'nin ve $d\rho$; yük q 'nun diferansiyel fonksiyonları olup sırasıyla; $\varphi(t) = \int_{-\infty}^t \varphi(\tau) d\tau$ ve $\rho(t) = \int_{-\infty}^t q(\tau) d\tau$ şeklinde tanımlanabilirler.

Nasıl ki memristör için parmak izi olarak $I(t) - V(t)$ histerisiz eğrisini belirleyici kabul edilmekteyse, memkapasitör için $q(t) - V(t)$ grafiğinde; memindüktör için ise $I(t) - \varphi(t)$ grafiğinde histerisiz eğrisi görülmektedir, ideal memristör, memkapasitör ve memindüktör Şekil 4.11'de gösterildi [74]. Bu üç elemana uygulanan voltaj sinüzoidal olup $V(t) = A \sin wt$ şeklindedir. Buna karşılık gelen akı; $\varphi(t) = \int_0^t A \sin w\tau d\tau = \frac{A}{w} (1 - \cos wt)$ olur ve değerler 0 ile $2A/w$

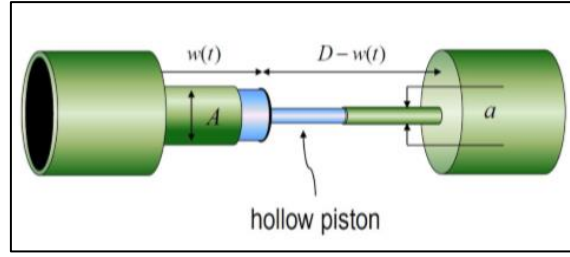
aralığında alındı. Başlangıç durumunda $q(0) = \int_{-\infty}^0 I(\tau) d\tau$ ve akı $\varphi(0) = \int_{-\infty}^0 V(\tau) d\tau$ sıfır olarak kabul edildi [74].



Şekil 4.11: a) Williams'ın tanımladığı memristör I-V eğrisi, b) $q(t)$ - $\phi(t)$ arasındaki tek değerli ilişki, c) farklı I-V altında, yeşil eğri eşitliğin sağındaki ikinci terim için, mavi eğri ise eşitliğin sağındaki ilk ve ikinci terimin toplamıdır, d) memkapasitör q - v eğrisi, e) $\sigma(t)$ - $\phi(t)$ arasında ki tek değerli ilişki, f) farklı $\sigma(t)$ ve $\phi(t)$ altında, yeşil eğri eşitliğin sağındaki ikinci terim, mavi eğri eşitliğin sağındaki ilk ve ikinci terimin toplamıdır, g) memindüktörün $I(t)$ - $\phi(t)$ eğrisi, h) Farklı $I(t)$ - $\phi(t)$ altında, yeşil eğri eşitliğin sağındaki ikinci terim, mavi eğri eşitliğin sağındaki ilk ve ikinci terim toplamıdır. Basitlik açısından bütün hesaplamalarda A ve w terimlerinin ikisinde 1 alınmıştır.

Bildiğimiz gibi R, C, L lineer elementtir diyot yahut transistör gibi bir I-V grafiğine sahip değildirler. Chua memristörün lineer I-V grafiğine sahip olmayacağını teorik olarak ispatladı çünkü memristörün I-V grafiğini Lissajous grafiklerine benzetti. Bir osiloskopun yatay plakalarına belirli bir frekanslı sinyal uygulanırsa ve dikey plakalara farklı bir sinyal uygulanırsa gördüğümüz patern Lissajous eğrileri olarak adlandırılır. Bu karakteristik şekillerin önemli özelliği, oluşan sabit şeklin düşey ve yatay doğrularla kesişme noktalarının sayısının oranı, düşey ve yatay saptırıcı levhalara uygulanan frekansların oranına eşittir. Lineer devre elemanlarından hiçbiri bu eğriyi sergileyemez; bu da memristörü temel devre elemanı yapar.

Peki Lissajous eğrilerini memristörde nasıl değerlendirmeliyiz? Yük bir devre boyunca bir yönde ilerlerse, devrenin bu bileşeninin direnci artar ve yük devre içerisindeki ters yönde akarsa, direnç düşer. Yük akışı, uygulanan voltaj durdurulursa, bileşen son direncini hatırlayacak ve yük akışı tekrar başladığında devrenin direnci en son aktif olduğu zamanki gibi olacaktır. Bir başka deyişle, memristör, kendi portunu geçen yükü tutan bir elemandır ve daha önceki durumunu hatırlama yeteneğinden dolayı Chua memristör ismini verdi. Gözümüzde daha rahat canlandırmak adına elektrik devre teorsindeki pek çok olayın anlatılması için kullanılan suyun boru sistemlerinden aktığı analogiden yararlanabiliriz. Su borusu analogisinde sıradan dirençler genellikle içinden su akan boru olarak düşünülebilir. Boru ne kadar geniş olursa, su tarafından hissedilen direnç o kadar küçük olur. Dirençle bazı benzer özellikleri olan memristör bir çeşit modifiye su borusuyla tarif edilebilir. Doğrusal direnç için borunun çapının hiç değişmediği söylenebilir ancak memristör için Şekil 4.12'deki gibi iki farklı çapta boruyu pistonlu bir sistemle birbirine bağladığımızı düşünelim ($M = R_1 + R_2$). Borunun içindeki su elektrik yükü olsun. Suyun akışının hızından, elektriksel olarak düşünersek direncin zorluğunun iki boruda farklı olacağı hemen söylenebilir. Yüksek direnç kısmı (ince boru) ve düşük dirençli parça (daha büyük boru) arasındaki sınırda bulunan piston HP modelinde sözü edilen ω parametresiyle aynı rolü oynar. Suyun memristörde hangi yöne aktığına bağlı olarak piston sağa veya sola itilir, sistemin toplam memristansı büyükten küçüğe veya tam tersi değişir.



Şekil 4.12: Memristör su borusu analogisi.

4.6. Memkapasitör ve Özellikleri

Memkapasitör elemanı, monoton olarak artan bir φ - σ eğrisine sahiptir. Bu eğrinin eğimi memkapasitans değerini verir. n . dereceden voltaj kontrollü memkapasitif sistem şöyle tanımlanır,

$$q(t) = C_M(x, V, t)V(t) \quad (4.11)$$

$$\dot{x} = f(x, V, t) \quad (4.12)$$

Burada $q(t)$ t zamanına bağlı olarak değişen yük, $V(t)$ zamana bağlı olarak değişen gerilim, $C_M(x, V, t)$ sistemin memristansıdır. Benzer şekilde n inci dereceden yük kontrollü memkapasitif sistem ise,

$$v(t) = D_M(x, v, t)I(t) \quad (4.13)$$

$$\dot{x} = f(x, v, t) \quad (4.14)$$

olarak verilebilir. Burada $D_M(x, V, t)$ kapasitansın tersidir. Gerilim kontrollü ve yük kontrollü memkapasitor cihazları, sırasıyla aşağıdaki denklemlerde olduğu gibi, birinci dereceden memkapasitif sisteminin bir alt sınıfı olarak tanımlanabilir:

$$q(t) = C_M\left(\int_0^t V(\tau)d\tau\right)V(t) \quad (4.15)$$

$$V(t) = D_M \left(\int_0^t q(\tau) d\tau \right) I(t) \quad (4.16)$$

$$\sigma(t) = \int_0^t q(\tau) d\tau \quad (4.17)$$

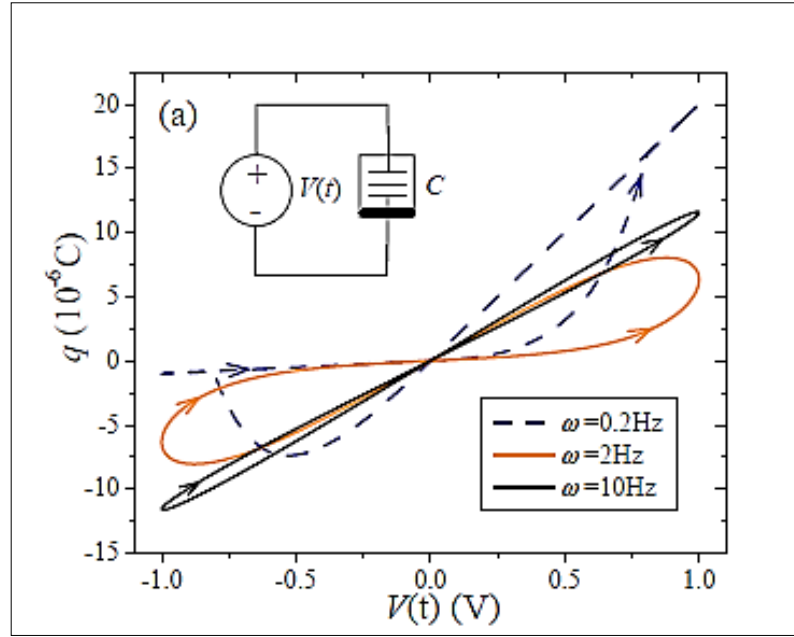
Denklem (4.16), zamanın integralinin Denklem (4.15) 'da verilen şekilde tanımlanması durumunda Denklem (4.18) şeklinde ifade edilir.

$$V(t) = D_M \sigma(t) \quad (4.18)$$

Denklem (4.13)'den görüleceği üzere $I = 0$ koşulunun $q = 0$ anlamına gelmediği açıktır. Yani akım kesildiğinde memkapasitans üzerindeki son akımla yüklü halde kalacaktır. Bu demektir ki memkapasitor elementi enerji depolayacaktır.

Nasıl ki memristansın bir parmak izi varsa memkapasitorün de vardır. Memkapasitorün parmak izi yük-gerilim grafiğinin “sıkıştırılmış histerezis döngüsü”dür.

Periyodik bir sinyal tarafından uyarılan bir memkapasitor için, $V(t)$ voltajı sıfır olduğunda, yük akışı sıfırdır. Bu nedenle hem voltaj hem de yük grafiğinin sıfır geçişine sahiptir. Memkapasitor'un bir başka imzası ise, “sıkıştırılmış histerezis döngüsünün” uyarma frekansındaki artışla daralmasıdır. Aslında, uyarma frekansı sonsuza doğru arttığında, memkapasitor normal bir kapasitör gibi davranır. Şekil 4.13 [43], memkapasitorün “sıkışmış histerezis döngüsünü” ve frekanstaki artışla birlikte büzüşen bir döngü örneğini göstermektedir.



Şekil 4.13: Memkapasitörün yük-gerilim grafiğinin frekansa bağıllığı.

4.7. Memindüktör ve Özellikleri

Memelement ailesinin son üyesi memindüktör de memkapasitif elemana benzer denklemlerle tanımlanabilir [43], n inci dereceden akım kontrollü bir memindüktans için;

$$\varphi(t) = L_M(x, I, t)I(t) \quad (4.19)$$

$$\dot{x} = f(x, ; V, t) \quad (4.20)$$

Burada $\varphi(t)$ akı, $I(t)$ t zamanına bağlı olarak memindüktörden geçen akım ve $L_M(x, I, t)$ ise cihazın memindüktansıdır. Akı için,

$$I(t) = \int_{-\infty}^t V(\tau) d\tau \quad (4.21)$$

yazılabilir. Akı kontrollü memindüktüf sistem için akım,

$$I = \Lambda_M (x, \varphi, t) \varphi(t) \quad (4.22)$$

$$\dot{x} = f(x, \varphi, t) \quad (4.23)$$

Burada, Λ_M memindüktansın tersidir. Akım kontrollü ve akı kontrollü memindüktans, n inci dereceden memindüktans sisteminin bir sınıfı olarak,

$$\varphi(t) = L_M \left(\int_0^t I(\tau) d\tau \right) I(t) \quad (4.24)$$

$$I(t) = \Lambda_M \left(\int_0^t \varphi(\tau) d\tau \right) \varphi(t) \quad (4.25)$$

olarak tanımlanır. İlk boşalma enerjisi sıfır olduğu için ilk zaman momenti sıfır olarak seçilir. Denklem (4.25), akının zamanla integralinin Denklem (4.26)'de verilen şekilde tanımlanması halinde Denklem (4.27)'ya benzer.

$$\rho(t) = \int_0^t \varphi(\tau) d\tau \quad (4.26)$$

$$I(t) = \Lambda_M \varphi(t) \quad (4.27)$$

Bir memindüktif sisteme ait önemli bir parmak izi, “sıkışmış histerezis döngüsü” akı-akım karakteristiğidir. Periyodik bir sinyal tarafından uyarılan bir memindüktans için, akım $I(t)$ sıfır olduğunda, akı sıfırdır. Dolayısıyla hem akım hem de akı aynı sıfır çaprazlamaya sahiptir. Cihazın bir başka imzası, “sıkışmış histerezis döngüsünün” uyarma frekansındaki artışla daralmasıdır. Aslında, uyarma frekans sonsuza doğru artarsa, memindüktör normal bir indüktör gibi davranır denilebilir. Memindüktörün “sıkışmış histerezis döngüsünü” ve sıklıktaki artışla birlikte büzüşen bir döngü örneğini göstermektedir.

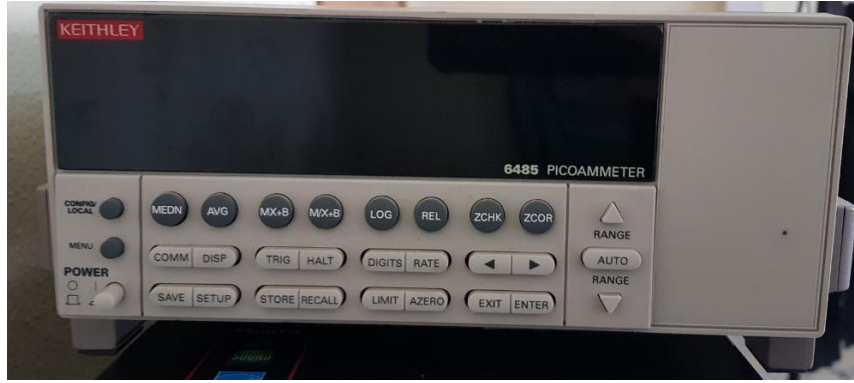
5. DENEYSEL PROSEDÜR

5.1. Kullanılan Cihazlar ve Bilgisayar Programları

Deneyde kullanılan cihazlar ve bilgisayar programları şu şekildedir.

5.1.1. Pikoampermetre (Keithley 6485 ve Keithley 487)

Hassas akım ölçüm cihazı olarak bilinir. Saniyede 1000 okuma kaydedebilir. 20 fA den 20 mA ’ e kadar ölçebilir.



Şekil 5.1: Keithley 6485 model pikoampermetre

5.1.2. Kreostat ve Vakum Pompası

Düşük sıcaklık ölçümleri için *Janis* kapalı devre helyum kreostatu kullanıldı. Vakum pompası Edwards RV8 kreostatin içindeki havayı boşaltıp, basıncı istenilen seviyede tutmaktadır. Kreostat; kristalin deney boyunca bulunduğu yerdir, kristalin dışarıyla ısıl temasını keser. Vakumlanabildiği için düşük basınç altında sıcaklık değişimlerinin uygulanabilmesi için kullanılır. Kristalin kreostatin içindeki konumu, bağlantısı ve kreostatin görünüşü Sekil 5.2’de gösterildi. Sumitomo marka (HC-4E) kapalı sistem bir helyum kompresör ile düşük sıcaklıklara inildi.



Şekil 5.2: Janis kapalı devre helyum kreostatu

5.1.3. Lakeshore

Lake Shore-340 otomatik ayarlanabilir sıcaklık kontrol cihazının DT-470 sensör diyotları numuneye yakın yerleştirilerek sıcaklığın kontrol edilmesi için kullanıldı. Labview 8.2 programı ile arayüz oluşturulup bilgisayardan kontrol edildi. ~ 0.1 K hassasiyete sahip cihaz I-V ve C-V ölçümlerinde kullanıldı



Şekil 5.3: LakeShore 340 model sıcaklık kontrol cihazı.

5.1.4. Elektrometre

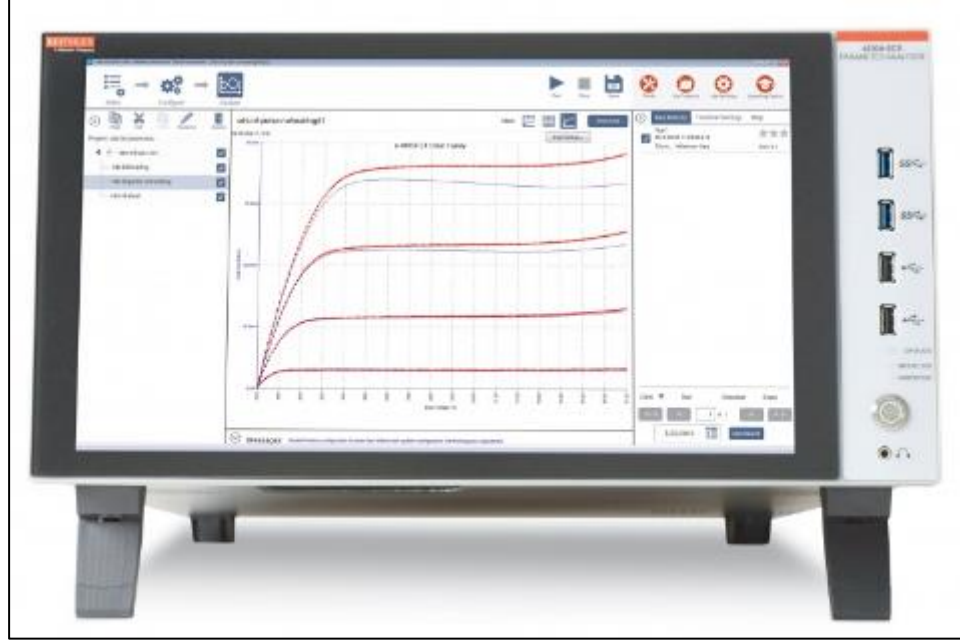
Keithley-6517A (elektrometre) cihazı alternatif akım veya doğru akım voltajını ölçmek için kullanılır.



Şekil 5.4: Keithley 6517A elektrometre cihazı.

5.1.5. Keithley 4200 SCS

Analiz ve grafiklendirme işlemlerini eş zamanlı olarak yapar. Aygıt karakterizasyonu, yarıiletken cihaz karakterizasyonu yapmak için kullanılır. Akım çözünürlüğü $0.1\text{ pA} - 100\text{ pA}$ civarındadır. Frekans kademesi $1\text{ kHz} - 10\text{ MHz}$ aralığında ayarlanabilir.



Şekil 5.5: Keithley 4200 SCS karakterizasyon sistemi.

5.1.6. Empedans Analizörü

Empedans analizörü; hassas empedans ölçümü için elektronik parça ve devrelerin analizlerinde kullanılmaktadır. HP4192A empedans analizörü 5 Hz'den 13 MHz'e değişken frekans aralığına sahiptir. Voltaj tarama ve akım tarama özelliği vardır. Pasif devre elemanlarının ve yarıiletken cihazların empedans analizini yapabilmektedir.



Şekil 5.6: HP4192A empedans analizörü

5.1.7. Güç Kaynakları

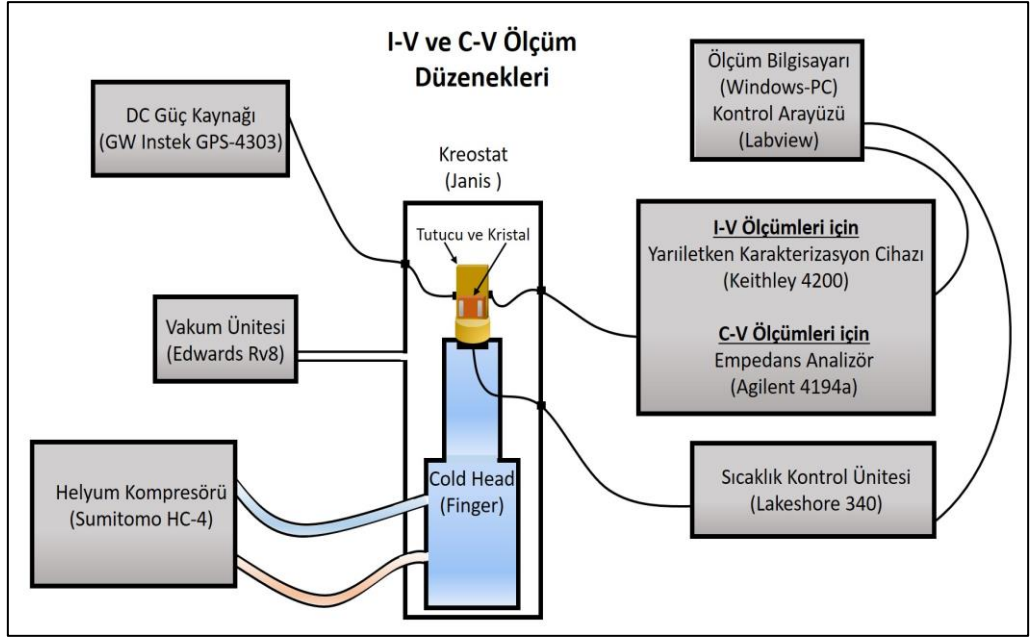
GW İnstek GPS 4303 DC güç kaynağı, Tektronix PS280 DC güç kaynağı doğru akım güç kaynağı olarak kullanılmaktadır. Elektroformig işlemleri esnasında kullanıldı.



Şekil 5.7: Güç kaynakları.

5.2. Deneysel Prosedür ve Veriler

Deneyde kullanılan düzenekler ve bağlantı şeması şu şekilde kurulmuştur. Ölçümlerde cihaza uygulanan elektroforming işlemi DC güç kaynağı ile uygulandı. Datalar ölçüm bilgisayarından toplandı.



Şekil 5.8: Deney düzenek şeması.

5.2.1. Farklı Kontaklarla Üretilen Sandviç Yapıların Akım Tarama Verileri

Metal-TlGaSe₂-Metal cihaz üretimi için, modifiye Bridgman-Stockberger yöntemi ile büyütülmüş katkısız TlGaSe₂ tek kristal örnekleri çeşitli teknik gruplardan alınmıştır. Elektriksel dirençleri $\sim 300\text{K}$ 'da karanlık olarak ölçüldü ve $\sim 10^6$ Ohm olduğu bulundu. TlGaSe₂ kristali tabakalı yapıya sahiptir ve bu tabakalar birbirinden son derece kolay şekilde ayrılmaktadır. Au, In ve Cu-metalik kontakların farklı çiftleri, numunelerin taze yarılmış yüzeylerinin her iki tarafında buharlaştırma ile hazırlandı. Metal biriktirme ve istenen kontak şekli için bir DC püskürtme sistemi ve ~ 300 μm kalınlığa sahip paslanmaz çelik bir maske kullanıldı. Bu kontaklar aynı zamanda, her iki yönde iletkenliği ölçmek için, yani, tabakaların düzlemine paralel ve dikey olarak da kullanıldı. Çökeltme odasının basıncı, $\sim 10^{-7}$ Torr'dan daha azdı. Dikdörtgen delikler ve ~ 2.5 mm kanal alanı ile ayrılmış $\sim 2 \times 2$ mm² boyutlarındaki metal maske, paralel bir konfigürasyonda elektrotları hazırlamak için kullanıldı. Kare delikli bir maske metal buhar biriktirme işlemlerinde istenilen yüzeylerin kaplanması için engel olarak kullanıldı. Bu maskeler kullanılmadan önce, aseton ile temizlendi ve daha sonra havada kurutuldu. Paralel kontak oluşturmak üzere yapılacak elektrotlar için maske, işlenmemiş kristal plakanın üst tarafına yerleştirmek suretiyle hazırlandı. Sızıntı

akımlarının örnek kenar yüzeylerinden akmasına yol açabilecek kenar etkilerini önlemek için paralel düzenlemedeki elektrotlar, numunenin dış kenarlarından ~1 mm'lik bir mesafeye sahiptir. Kontak imalat işlemi sırasında maske deliklerinden metal buharı nüfuzu, numune kenarları boyunca biraz kırılmaya neden olabilir. Kristalin her iki yüzünü de kaplayan elektrotlar ile sandviç benzeri bir yapı oluşturuldu [75].

Ölçümler, hepsi ~500 nm civarında kalınlığa sahip olan üç farklı hacim yapılı TlGaSe₂ numunesi kullanılarak gerçekleştiril Paralel yönde elektrotlar arasındaki mesafe ~2 mm idi. Numuneler şu şekilde etiketlendi; F, Y ve Kh olarak ifade edildi. Örneğin, *F Au-In paralel* dediğimizde, Au ve In kontaklarına sahip F-grubundan olan TlGaSe₂ numunesini ifade etmekteyiz (Şekil 5.8). Her iki yüzünü de kaplayan elektrotlar, sandviç benzeri bir yapılanma oluşturdu [75].

Bu çalışmada kullanılan farklı TlGaSe₂ örnekleri çeşitli teknolojik partilerden seçildi ve genellikle bir dizi doğal derinlikli tuzaklar ve sıkı defektler ile birbirinden ayrılmakta ve atom bileşenlerini oluşturmak için stokiyometreden sapma göstermektedir [76], [77]. Örneklerin stokiyometrik bileşimi, enerji dağılımlı X-ışını (EDX) cihazı ile donatılmış bir taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelendi. EDX analizi, numunelerin atomik bileşen konsantrasyonunun farklı olduğunu ve iki kategoriye ayrılabilirdiğini gösterdi. Numuneler için stokiyometrik oranlar aşağıdaki gibi ölçülmüştür: Y ve Kh tipi TlGaSe₂ örnekleri benzer atom bileşenlerine sahiptir ve şu şekildedir; Tl (% 28.87), Ga (% 26.23) ve Se (% 44.90); F-tipi TlGaSe₂ numunesi için, atom bileşenlerinin oranı; Tl (% 22.58), Ga (% 26.58) ve Se (% 50.84) 'dir. Görülebileceği gibi, ana fark Tl ve Se atomlarının konsantrasyonlarıdır [75]. F örneğine kıyasla, Y ve Kh, Tl atomlarının fazlalığına ve Se atomlarının eksikliğine sahiptir. Şuna dikkat çekmekte fayda var; biz şu aşamada stokiyometriden sapmalar nedeniyle hangi tür kusur durumlarının yaratıldığını bilmemekteyiz.

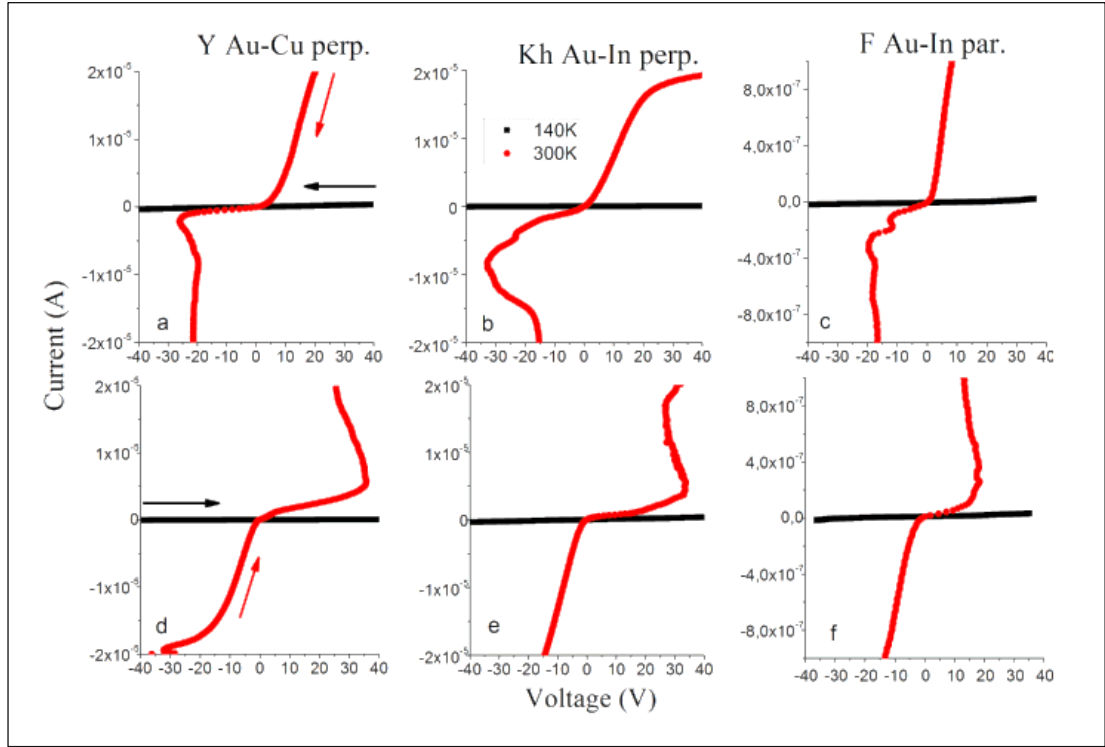
Örnekler soğuk parmak (cold head) üzerine monte edildi ve Janis kapalı devire helyum kreostatının içine yerleştirildi. Bu parmağın altına bir kontrol sensörü (diyot DT-470) ve bir dirençli kontrol ısıtıcısı monte edildi ve bunlar bir Lake Shore-340 otomatik ayarlı sıcaklık kontrol cihazına bağlanarak sıcaklığın kontrol edilmesi için kullanıldı. Böylece LabView ortamında grubumuzdaki arkadaşlar tarafından yazılan programda numunenin sıcaklığı izlenebildi ve bir dijital Oransal-İntegral-Türev (PID) kontrolörü kullanılarak ~0.1 K doğrulukta tutuldu.

Elektriksel parametreler, iki problu bir konfigürasyonda bir Keithley-4200 yarı iletken karakterizasyon sistemi kullanılarak ölçülmüştür. Yukarıda belirtilen örneklerden imal edilen üç farklı yapı üzerinde I – V ölçümleri gerçekleştirildi.

I-V özellikleri vakumda $\sim 10^{-3}$ Torr'da iki farklı sıcaklıkta (300 ve 140 K) kaydedildi. Çıkış voltajı, Au-elektrodunun polaritesi olarak kabul edilir: polarite pozitif (negatif) olduğunda voltaj pozitifdir (negatiftir). I-V grafikleri akım tarama ile elde edildi. Mevcut uygulama sıfırdan başlatılmış ve maksimum değere yükseltildi, daha sonra minimum (negatif maksimum) değerine düşürülmüş ve son olarak ~ 1 nA adımlarla sıfır olana kadar tekrar yükseltildi. Mevcut adımlama için 1 μ s, 10, 100 ms ve 1 s zaman aralığı kullanıldı. Diyot karakteristikleri; 140-300 K aralığında, -40 V ile +40 V aralığında iki yönde voltaj tarama ile sonuçlar kaydedildi.

Temel olarak, memristif cihazın dinamik özelliğinden sorumlu olan “elektroforming” adı verilen geri dönüşümsüz bir üretim süreci vardır. Elektroforming süreci boyunca, cihaz davranışı nispeten daha yüksek bir voltaj veya akım uygulanarak statik bir dirençten dinamik bir memristöre aktarılır. Büyük olasılıkla TlGaSe₂ numunesinin yüzeyindeki morfolojik değişiklikler, anahtarlama sırasında iki elektrot arasında kristal filament köprülerinin oluşumuna yol açar. Bu filamentlerin pozisyonuna bağlı olarak farklı I-V eğrileri formları bize iletim mekanizması hakkında bilgi vermektedir.

Lineer ölçekte ürettiğimiz tüm sandviç yapıların tipik I-V eğrileri Şekil 5.15'de gösterildi. Direnç karakteristiklerini incelemek için, her iki yönde de (Şekil 5.15'de oklarla gösterildi) -40 V ile +40 V arasındaki voltaj beslemesi, hem 300 K ve hem de 140 K sıcaklıklarında cihazlara uygulandı.



Şekil 5.9: 140 ve 300 K olmak üzere iki farklı sıcaklıkta akım tarama yöntemiyle ölçülen farklı etiketlenen TlGaSe₂ örneklerinin I-V karakteristikleri; Oklar, tarama yönünü göstermektedir.

Şekil 5.9’de oda sıcaklığında bir çevrim akımı taraması gerçekleştirilirken direnç anahtarlama bellek fenomeninin gözlenebildiğini görülmektedir. Uygulanan voltaj belli bir değere ulaştığında cihazın akımı aniden artar, başlangıç durumundan sabit düşük direnç durumuna (low resistance state-LRS) ilk geçişi gösterir. Örneğin negatif voltaj taramada anahtarlama LRS den HRS ye (high resistance state-HRS) gerçekleşir, ani bir akım düşüşü görünür (RESET). Daha sonra uygulanan voltaj 0 V’den arttıkça, HRS den LRS ye anahtarlama SET olur. SET ve forming (şekillendirme) işlemi bellek geçişi için uygun bir akım uyumluluğu yapılandırılmalıdır. Bu akımın önceden ayarlanmış bir değere ulaştığında ölçümle sınırlandırıldığı anlamına gelir. Genel olarak SET ve RESET voltajı aynı yönde kalırsa -örneğin negatif ve pozitif voltaj- bu durumda anahtarlamanın “tek kutuplu anahtarlama modu” olduğu düşünülebilir. Ve eğer SET ve RESET voltajı zıt yönde ise -örneğin pozitif voltaj SET, negatif voltaj buna ters olan RESET yönündeyse- direnç anahtarlama “çift kutup anahtarlama modu” olarak düşünülebilir [78]. Pozitif akım adım adım artarak ve ayarlanan değere ulaşınca kadar 300 K’da yüksek dirençli bir durum muhafaza edilir (Şek. 5.9.d-f). Akım ayarlanan değeri aşarsa, önemli ölçüde artar, bu da cihazı düşük direnç

durumunda bırakır. Düşük direnç durumu, Şekil 5.9.a-c’de gösterildiği gibi, süpürme akımının polaritesini ters çevirerek de elde edilebilir. Bir akım süpürme sırasında bellekle direnç anahtarlama etkisi, Metal-TlGaSe₂-Metal yapısında göze çarpan tek özellik değildir. Şekil 5.9’dan görüldüğü gibi, düşük sıcaklıkta (140 K) kaydedilen tüm I–V eğrileri, yüksek sıcaklıkta (300 K) ileri ve geri beslemeler sırasında yarı-omik ve yüksek asimetriktir. Oda sıcaklığındaki akım-voltaj karakteristiklerinde doğrultma, kontaklardan ve akım akış yönünden bağımsız olarak tüm örnekler için gözlemlendi. Yukarıda belirtildiği gibi, ileriye doğru besleme, Au-elektrota pozitif *dc voltajı* uygulanarak elde edildi.

Şekil 5.9.a–c, 300K’da I–V akımı pozitiften negatife (Şekil 5.9.a–c’de kırmızı oklarla gösterildiği gibi) süpürülmesiyle kaydedilen I–V karakteristikleri, ters besleme bölgesinde doğrultucu karakteristikleri ve direnç değişimi gösterir. Benzer şekilde, ters doğrultma yönü ile negatiften pozitive akım uygulanarak diyot karakteristikleri gözlemlendi. Bu durumda, Şekil 5.9.d-f’de gösterildiği gibi, ileri besleme bölgesinde direnç anahtarlama görünür.

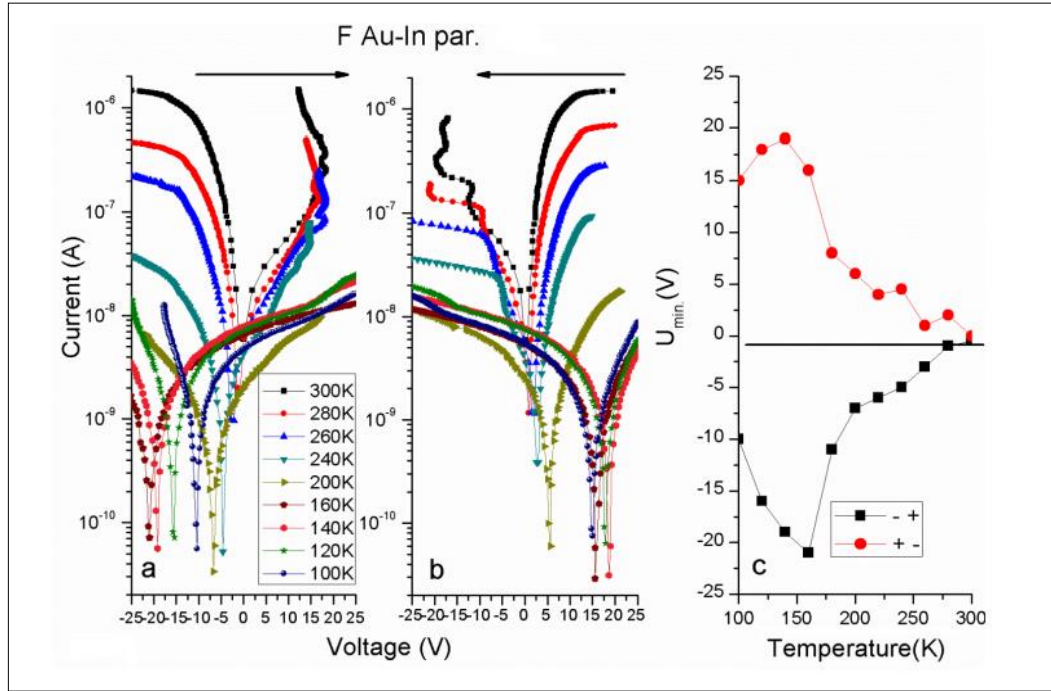
Ürettiğimiz sandviç tipi cihazlarda dirençli anahtarlama mekanizmasında gerçekleşen akım iletim türünü tanımlamak için 300 K’da ölçülen I–V eğrilerinin doğrusal olmayan kesitlerini analiz ettik. Daha önce değindiğimiz gibi, akım iletiminde, I–V grafiğinin doğrusal olmayan bölümleri genellikle birkaç mekanizma ile karakterize edilir: uzay yükü sınır akımı, Schottky ve Poole-Frenkel emisyonu. Schottky emisyonu, termal olarak uyarılan elektronların enerji bariyerinden zıplayıp (aşıp) yarı iletken iletim bandına atlaması ile açıklanabilir. Poole–Frenkel mekanizması, elektronların, tuzak seviyesinden veya seviyelerinden yüksek elektrik alanının içindeki iletim bandına atlamasından kaynaklanmaktadır. Schottky emisyon mekanizması, tuzak seviyelerinin olmaması haricinde Poole-Frenkel emisyonuna benzer. Poole-Frenkel emisyon bariyerinde yükseklik, tuzak seviyesi veya seviyeleri ile değişir. Farklı taşıyıcı taşıma mekanizmalarının tanımları ve ilgili değişkenler aşağıdaki formüllerle verilir:

$$\text{uzay yük sınırı akım: } I \propto \varepsilon_r \varepsilon_0 \mu V^2 \text{ ya da } I \sim V^2 \quad (6.1)$$

$$\text{Poole – Frenkel emisyonu akım: } \ln I \propto \frac{\sqrt{eV/4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r d}}{kT} \text{ ya da } \ln I \sim \sqrt{V} \quad (6.2)$$

$$\text{Schottky emisyonu akımı: } \frac{\ln I}{V} \propto \frac{e}{kT\sqrt{eV/4\pi\epsilon_0\epsilon_r d}} \text{ ya da } \frac{\ln I}{V} \sim \sqrt{V} \quad (6.3)$$

Bu ifadelerde, akım I , V voltaj, k Boltzmann sabitini, d aktif katman kalınlığını ifade eder, T Kelvin ölçeğinde sıcaklığı belirtir, ϵ_0 boş alanın geçirgenliği, ϵ_r bağl dielektrik sabiti ve e elektronik yüküdür. Cihazların baskın taşıyıcı taşıma mekanizmasını tanımlamak için I-V eğrilerinin lineer olmayan kesitlerini çift logaritmik bir ölçekte yeniden çizdik. Her bir cihaz için lineer fit değerleri çizildi ve hesaplandı. Fit çizgisinin eğimleri de hesaplandı. Schottky emisyon mekanizması için bir doğrusallık derecesi Poole-Frenkel emisyon mekanizmasına ve uzay yükü sınır akımları mekanizmalarına göre en yüksek olarak bulundu. Bu, I-V eğrilerinin doğrusal olmayan bölgesinde iletim mekanizmasının Schottky emisyonu tarafından baskın olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.10: a) ve b) F-tipi TlGaSe₂ örneğinin I-V karakteristikleri, tabakaların paralelinde kristalin üst yüzeyinde biriken Au-In metalik elektrotları ile mevcut tarama yönteminde gerçekleştirildi. I-V karakteristikleri logaritmik ölçekte görüntülendi ve farklı sıcaklıklara karşılık gelir. Oklar, taramanın yönünü gösterir; c) Şekil 5.9 (a-b)'deki farklı süpürme yönü için “gaga” pozisyonunun sıcaklık bağımlılıkları.

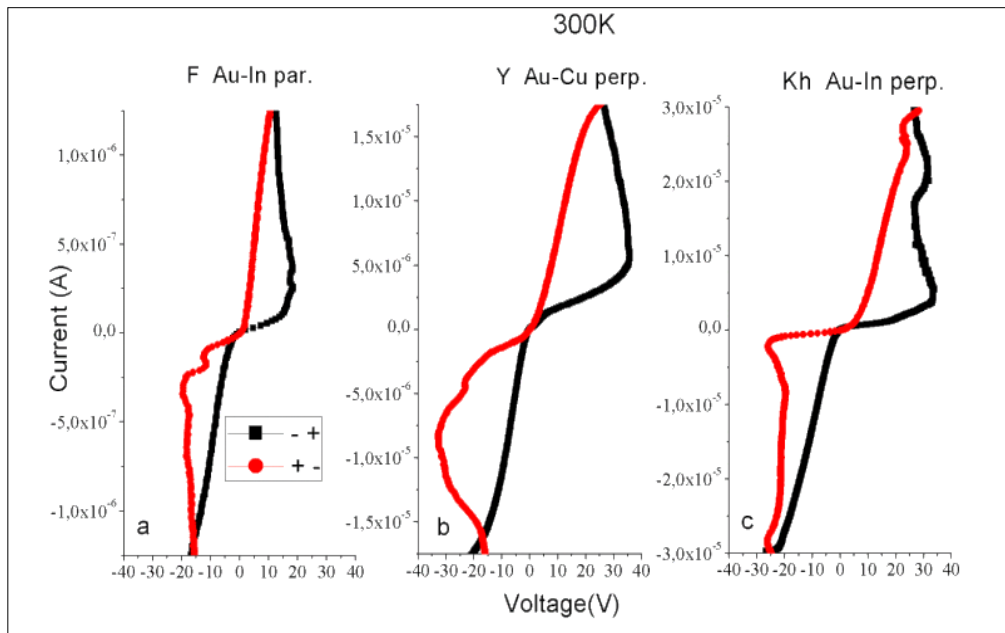
Şekil 5.10’de gösterilen eğriler, F Au-In paralel cihazının elektronik özelliklerini araştırmak için farklı sıcaklıklarda elde edilen Şekil 5.9’daki verilen grafiklerin yarı logaritmik ölçekte çizimi bulunmaktadır. Şekil 5.10’dan görülebileceği gibi, yukarıda tarif edilen etkiler, özellikle düşük sıcaklıklarda, atık gerilim davranışı ile ilişkilidir. Bu (arda kalan) rezidüel voltajın yanı sıra sıcaklık bağımlılığının değeri ve işareti, akımın işaretini değiştirdiği voltaja karşılık gelen bir “beak” (gaga) pozisyonu ile açık bir şekilde izlenebilir. Bu voltajın işareti, Şekil 5.10.c’de gösterilen “gaga”nın doğrultma işareti ve sıcaklık bağımlılığı ile ilişkilidir ve monoton olmayan davranışlar da dahil olmak üzere düşük sıcaklık aralığında TlGaSe₂ kristallerinin iletkenliğinin ısı bağımlılığını andırır.

Anlatılan sonuçlar, üretilen cihazlarının mevcut süpürme yönünü veya diğer bir deyişle sistemin geliştiği geçmiş durumları hatırladığını açıkça göstermektedir. Bu davranış, memristif sistemlere özgüdür.

Bu, yük birikimlerindeki ara yüzey polarizasyonunun, metal-yarı iletken ara yüzünün yakınındaki TlGaSe₂’nin ince yüzey yalıtkan tabakası içinde gerçekleştiği

sonucuna varmakta ki, bu da dahili elektrik alanının oluşumuyla sonuçlanır. Bu dahili elektrik polarizasyonu, TlGaSe₂ cihazları aracılığıyla akım aktarımını düzenleyebilir.

Bu durumda, TlGaSe₂ kristali, yüksek dielektrik özelliklerine sahip bir yüzey üzerinde doğal ince yalıtkan bir tabakaya sahip sandviç malzeme olarak düşünülebilir. Başka bir deyişle, TlGaSe₂ cihazları, bir kapasitör ve bir direnç paralel olarak bağlanan basit bir eşdeğer devre ile modellenenebilir. Bu sandviç TlGaSe₂ numunesindeki son akım iki kısma ayrılabilir: I_c iletim akımı ve I_d yer değiştirme akımı. I_c , ya Schottky emisyon mekanizmasına (kontaklı düzeltmek için) ya da Ohm yasasına uyarak yarı iletkenlerden geçer. I_d , kondansatörden, daha doğru olarak, C ince izolatör tabakası kapasitansı olan ve V'nin uygulanan gerilimi ifade ettiği, $I_d = CdV/dt$ formülünü karşılayan TlGaSe₂ yarı iletken-metal elektrot ara yüzlerindeki iç polarize alan yüklerinden kaynaklanır. I_d akımı I_c 'ye eklendiği için; I_c I-V karakteristiğinde voltaj sıfırdan geçtiğinde I_c sıfır değerine eşit değildir, Şekil 5.10.a-b gösterildiği gibi. Ayrıca, TlGaSe₂ cihazları ile toplam akımın sıfır değeri, orijinden farklıdır ve mevcut süpürmenin yönüne bağlı olarak yukarı/aşağı doğru kaymaktadır.



Şekil 5.11: Farklı TlGaSe₂ kristalleri için 300 K'de akım tarama metoduyla elde edilen sıkıştırılmış histerisiz eğrileri.

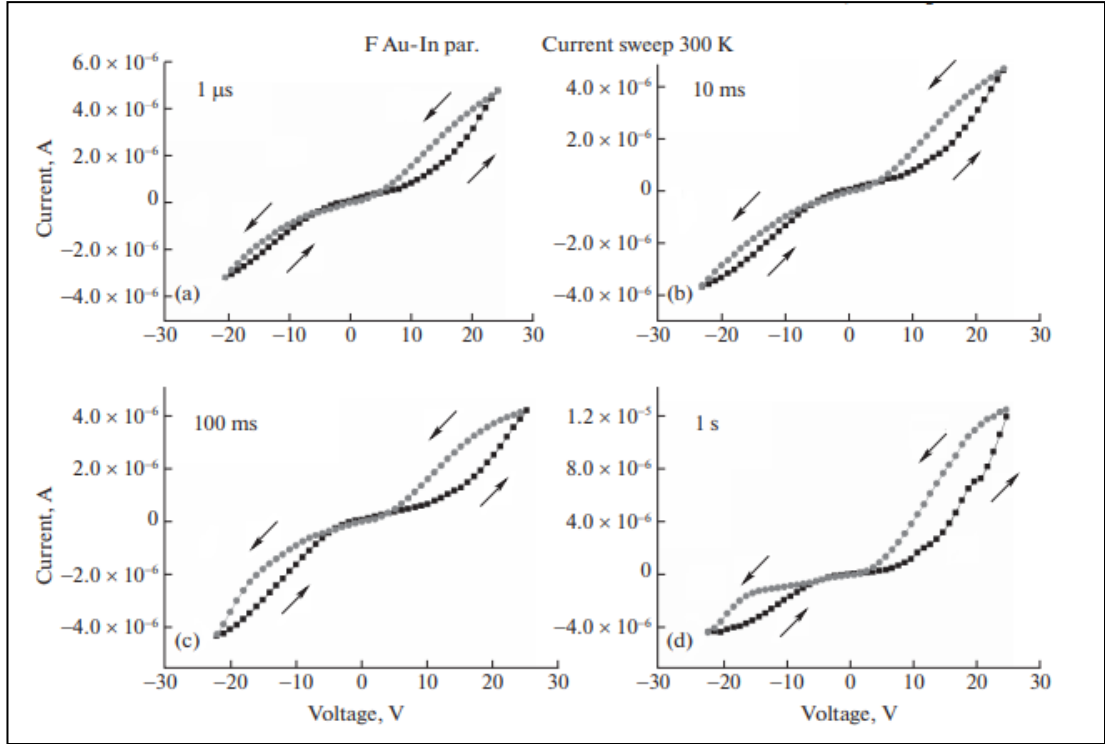
Genellikle, direnç anahtarı olarak kullanıldığında, memristörün iki durumu vardır: ON (SET)-durumu veya düşük direnç durumu ve OFF (RESET)-durumu veya yüksek

direnç durumu. Sıkışmış histerezis döngüsünün, memristif davranışların bir parmak izi olduğu da iyi bilinmektedir [17], [79] . Bu davranış, Şek. 5.11.a-c, farklı kontaklara sahip üç farklı numune için oda sıcaklığında ve tabakaların düzlemine paralel ve dik olan farklı akım yönleri için gösterildi.

Şekil 5.11’de görüldüğü gibi, 30 V’dan başlayarak 0 V’a kadar, nispeten yüksek bir akım gözlemlenir (ON-durumu); ancak, uygulanan voltajın polaritesi değiştiğinde durum büyük ölçüde değişir: direnç esasen artar (OFF-durumu) ve ardından cihaz tekrar ON-durumuna geçer. ON durumundan geri dönersek, akım benzer davranışı gösterir: Artık OFF-durumu ve daha sonraki anahtarlama pozitif voltajlarda gözlemlenir. Böylece döngü kilitlenir. İncelenen tüm TlGaSe₂’de gözlenen elektriksel anahtarlamanın tekrarlanabilir olduğu gözlemlendi. Cihaz direnç durumunu düşükten yüksek direnç durumuna değiştirdiğinde, akım aniden 10²’den fazla bir katla artar. Tip olarak OFF durumundaki direnç, ~300K’de yaklaşık onlarca MOhm’un üzerindedir.

Memristif cihazının bir diğer önemli özelliği, uygulanan akım veya gerilimlerin frekansına göre I–V histeresis halkası (loop) şeklindeki değişikliklerdir. Uygulamada, AC I–V karakteristik ölçümleri yerine, farklı tarama hızlarına sahip I–V ölçümleri akım taraması sıklıkla kullanılır.

Farklı zamansal adımlarla (1 µs, 10, 100 ms, 1 s) akımın uygulanmasıyla elde edilen 300 K’da F-ışaretleli Au-In paralel cihazının I–V karakteristikleri, Şekil 5.12.a-d’da gösterildi. I–V histerezis döngülerinin evrimi ile mevcut süpürme hızının azalması arasındaki bir karşılaştırma, ilginç özellikler ortaya çıkarmaktadır. Ölçüm süresinin bir diğer deyişle periyodunun kısaltılması, eğrilerde doğrusallığa neden olur ve son olarak, Şekil 5.12.b–d’de gösterildiği gibi, tipik olarak memristif aygıtlara özgü bir histerezis döngüsü ile eğriye ulaşır. Buda cihazın düşük frekanslarda çalışması demektir.



Şekil 5.12: F işaretli Au-In TlGaSe₂ örnekleri 300 K’de farklı zamansal adımlarla (1 μ s, 10, 100 ms, 1 s) akımın uygulanmasıyla elde edilen I–V karakteristikleri.

Metal-TlGaSe₂-Metal yapılarında tespit edilen sıkışmış histerezis I-V’nin çoğunun “kendi üzerinden geçmemesi” veya tip II olduğu belirtilmelidir. Bu gözlemler, cihazlardan akan toplam akımın elektronik ve iyonik bileşenlere sahip olduğu sonucuna varmamıza neden olmuştur. Öte yandan, TlGaSe₂ cihazlarının harici elektrik alanı ile başlangıç işlemlerine tabi tutulması sonucu “kendi üzerinden geçmeyen” (not-self crossing) tipte sıkışmış histerezis I–V döngülerini “kendi üzerinden geçen” (self crossing) türüne dönüştürebilir.

Yukarıda açıklanan bulgulardan sonra aşağıdaki sorular ortaya çıkar:

- Neden gözlemlenen I–V grafiği düşük sıcaklıklarda omik, yüksek sıcaklıklarda diyot tipi?
- Cihazın doğrultma mekanizması nedir?
- Neden doğrultma yönü, akım taramasının yönüne bağlıdır?
- Akım taraması sırasında gözlenen rezidüel (arda kalan) voltajın niteliği nedir?
- TlGaSe₂ kristallerinde anahtarlamanın fiziksel mekanizması nedir?

Tartışmamıza ilk sorudan, yani düşük (140 K) ve yüksek (300 K) sıcaklıklardaki I-V karakteristiği arasındaki farklardan başlayalım. Bu soruların cevaplarını bulmak için, düşük sıcaklıkta neredeyse omik davranış ve yüksek sıcaklıkta diyot tipi davranış açıklanmalıdır. Aşağıda, düşük ve yüksek sıcaklıktaki farklı I-V karakteristiklerinin, yüksek seri dirence sahip diyot modeline dayanarak açıklanabileceğini göstereceğiz. Üretilen yapıların akım-gerilim karakteristikleri Lambert W-fonksiyonu kullanılarak modellenmiştir. Lambert W-fonksiyonu $W(x)$, aşağıdaki soyut denklemin çözümü olarak tanımlanmaktadır:

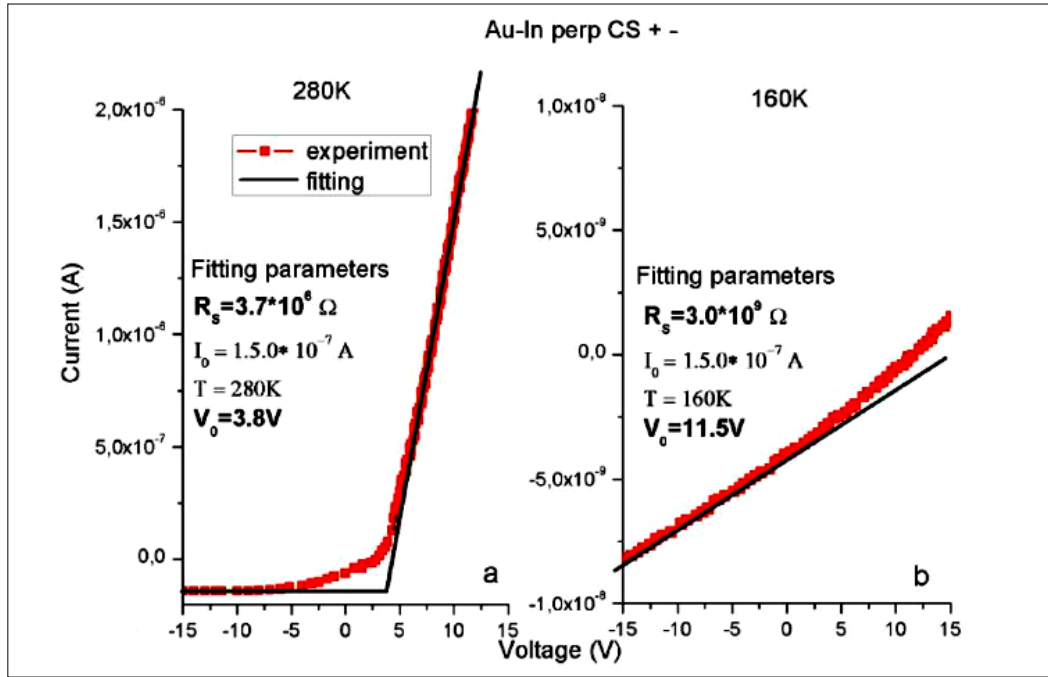
$$y \exp(y) = x \quad (6.4)$$

Bu tezde, ilk defa Lambert W-fonksiyonuna dayanan TlGaSe₂-diyot devre modeli için analitik bir çözüm sunulmaktadır. Bu modele göre, üretilen cihazların I – V karakteristikleri aşağıdaki denklemle tanımlanabilir:

$$I = \left(\frac{qI_0R_s}{kT} \right) W \left[\left(\frac{qI_0R_s}{kT} \right) \exp \left(\frac{q(V + I_0R_s)}{kT} \right) \right] \quad (6.5)$$

burada, $W(x)$ Lambert W-fonksiyonu, sırasıyla k Boltzmann sabiti, q elektronun yükü ve T sıcaklıktır. R_s seri direnç, V voltaj ve I_0 diyot ters akımdır. Uygun parametreler olarak I_0 ve R_s alınarak, üretilen cihazların I-V bağımlılıkları hesaplandı. Sonuçlar Şekil 5.13'te gösterilmektedir. Hesaplamalar 140 K'da omik davranışı ve 300 K'da rektifiye diyot tipi davranışı vermektedir.

Bu etkinin fiziksel açıklamasını şu şekilde yapabiliriz. TlGaSe₂ kristali, yarı iletken-metal arayüzlerinde ince veya ultra ince yalıtım katmanları bulunan bir yarı iletken malzeme olarak kabul edilir. Kural olarak, yarı iletkenin aktif direncinin değeri her zaman metal-yarı iletken kontaklarının elektrik direnciyle seridir. Dahası yarı iletken elektrik direnci, sıcaklık, dış basınç veya radyasyon Emilimi gibi belirli koşullar altında önemli ölçüde değişebilir. Düşük sıcaklıklarda, seri direnç çok yüksek olduğundan ($>10^8$ Ohm), seri direncin yaklaşık olarak tüm voltajları metal düşer, bu da omik bir özelliğe yol açar. Yüksek sıcaklıklarda, seri direnç olduğundan metal ve yarıiletken düşen voltaj yaklaşık olarak aynıdır, bundan dolayı neredeyse tüm voltaj yarı iletken-metal arayüz bariyeri düşer ve diyot tip I-V karakteristiği kaydedilir.



Şekil 5.13: a) K-tipi TlGaSe₂ örneğinin, katmanlara dik kristalin üst ve alt yüzeylerinde biriken Au-In metal elektrotları ile deneysel I-V özellikleri. Ölçümler akım tarama yönteminde gerçekleştirildi. I-V özellikleri iki farklı sıcaklıkta doğrusal ölçekte gösterilir; 160 ve 300 K. Tarama yönü negatiften pozitif değerlere kadardır; b) Seri dirençli diyot modeline göre montaj sonuçları. Hesaplamalar Denklem (6.5) kullanılarak yapıldı. Fiting parametreleri şekilde gösterildi.

Buradan da görülmektedir ki, metal-TlGaSe₂-metal yapısında seri direnç görevi gören TlGaSe₂ yarı iletkeninin rolü büyük önem taşımaktadır.

Bu cihazlarda diyot tipi rektifikasyon mekanizması nedir? Bir dereceye kadar, doğrultma yönü uygulanan voltajın polaritesine bağlı olduğundan ve metal elektrot malzemesinden bağımsız olduğundan, gerçekten garip bir diyottur. Örneğin, TlGaSe₂'nin p-tipi iletkenliği göz önüne alındığında, bir I-V ölçümü başladıktan sonra, Au kontağına negatif voltaj uygulanırsa, bu kontak engelleyici kontak olarak görev yapar. Diğer yandan, I-V ölçümüne başladıktan sonra aynı kontağı pozitif voltaj uygulanırsa, omik bir kontak olarak işlev görür (Şekil 5.9. ve 5.10). Bu nedenle, bu diyotun polaritesini kontrol etmek için elektriksel bir eğitim süreci kullanılabilir. Bu ayrıca, dış yanlılığın kutuplanma yönünü değiştirerek, bir ileri ve geri diyotlar arasında taşıma özelliklerini değiştirebildiğini göstermektedir [75].

Metal-p-yarı iletken birleşme noktasının engel karakteri, metal ve yarı iletken arasındaki elektron değişimi nedeniyle, tükenme bölgesinin metal yarı iletkene doğru

yönlendirilen elektriksel alanla metal-yarı iletken sınırının yakınında meydana geldiği anlamına gelir. Bu nedenle, başka bir temas omik bir kontak gibi davranmalıdır. Son zamanlarda TlGaSe_2 örnekleri üzerinde yapılan bazı çalışmalarda, metalik kontak uygulanan voltajdan dolayı yüzeye yakın bir iç elektrik alan oluşturduğu gösterildi [80], [81]. Bu alanın yönü, uygulanan elektrik alanının yönüne her zaman karşı olduğundan, uygulanan gerilimin polaritesine bağlıdır. Başka bir deyişle, kontak malzemesinden bağımsız olarak, engelleyici veya omik kontak olarak davranabilir. Bu etkiyi açıklamak için, TlGaSe_2 kristalinin yüzeyinde doğal ince yalıtkan tabakası modelini önerdik [80]- [82]. Kontak yakınında oluşturulan elektrik alanı, doğal yalıtım katmanının kristalin yüzeyindeki polarizasyonundan kaynaklanmaktadır. Bu tür polarizasyonun mekanizmasından bağımsız olarak, bir TlGaSe_2 yarıiletkenindeki akım akışını göz önüne alarak, bir p-tipi yarı iletkeninde sisteme harici bir voltaj uygulanırken hem boşlukların hem de bazı yüklü varlıkların aynı anda hareket etmeye zorlandığı sonucuna varılabilir. Bu, $\text{Pt-TiO}_2\text{-Pt}$ sisteminde ilk memristif davranışın gerçekleşmesini tanımlayan tartışmaya benzer. Bizim bahsettiğimiz durumun aksine, [6], [39], [73], [83]'de yukarıda belirtilen yüklü varlıkların, her şeyden önce katkılayıcı (dopant) olarak hareket eden yüklü oksijen boşlukları olduğu belirlendi. Dahası TiO_{2-x} 'deki kimyasal durumların elektrik kontrolü nedeniyle (TiO_{2-x} katmanı ve elektrotlar arasındaki arayüzlerde oksijen boşluğu konsantrasyonu gibi) [84] $\text{Pt/TiO}_2\text{/Pt}$ sisteminin kontrol edilebilir bir doğrultucu görevi gördüğü gösterildi. Şu anda, oksitler [85], [86]'de bilinen elektrik alanı içindeki yüklü iyonların göç mekanizmasının TlGaSe_2 kristalinin yüzeyinde önerilen doğal ince yalıtım katmanına uygulanabilir olup olmadığını iddia edemeyiz. Ancak, metal- TlGaSe_2 -metal yapısında gözlenen hafıza davranışının, uygulanan elektrik alanın altındaki bazı mobil yüklü oksijen boşluklarının göçüyle ilgili olduğunu kesinlikle söyleyebiliriz. Böyle bir modelin araştırılması üretilen sandviç yapıların hafıza davranışını göz önünde bulundurmak, anahtarlama fenomenini de oldukça anlaşılır kılmaktadır. Chua'nın çalışmasında şu kısmın altını çizmektedir [17]: Direnç anahtarlama dayanan iki terminalli geçici olmayan bellek cihazının, materyali ve çalışma mekanizması ne olursa olsun direnç anahtarlama özelliğindedir. Görünüşe göre, zıt önerme de gerçek oldu [85], çünkü son on yılda, bellek mekanizmasından bağımsız olarak memristif tip davranışına dayanan dirençli anahtarlama mekanizmalarının anlaşılmasında önemli ilerleme kaydedildi.

Bu çalışmanın sonucu olarak metal- TlGaSe_2 -metal yapısı için aşağıdaki modeli önerdik: Doğal ince yalıtım katmanı, oksit malzemelerindeki iyonlar gibi bazı yüklü

varlıkların göçü nedeniyle harici bir elektrik alanı uygulanarak polarize edilebilen yarı iletken yüzeyin yakınında bulunur. Bu katman, bu yapılara yönelik memristif davranışını sağlar. Bu tür polarizasyonun genel yapı üzerindeki etkisi büyük ölçüde sıcaklığa bağlı olarak değişen numunenin direncine bağlı olacaktır; böylece yalıtım filmi ve yarı iletken arasındaki voltaj düşüşü dağılımını değiştirecektir. Düşük sıcaklıklarda, yarı iletken direnci yeterince yüksek olduğunda, $>10^8$ Ohm, sistem uygulananın üzerine ek bir voltaj eklenmiş omik bir direnç görevi görür (Şekil 5.10). 300 K'ya yakın yüksek sıcaklıklarda yarı iletkenin direnci büyük ölçüde düşer, 10^6 Ohm, ve neredeyse tüm uygulanan voltaj yalıtım katmanını üzerinde düşer, böylece sistem kontrol edilebilir doğrultucu yönünde diyot davranışını gösterir.

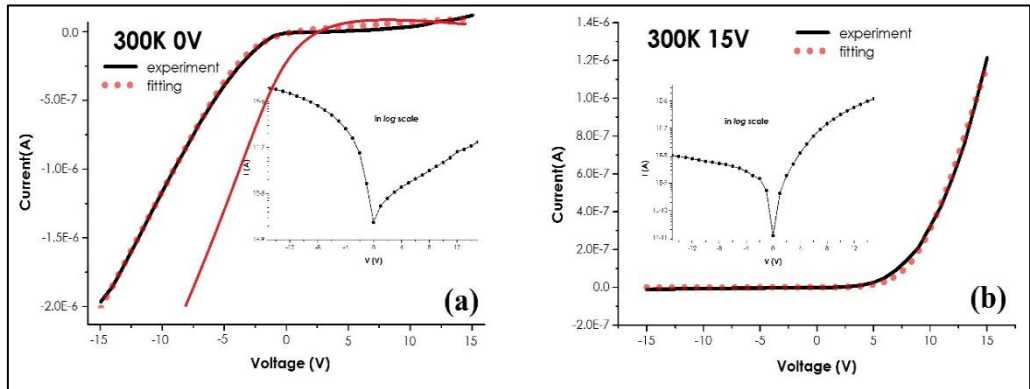
Ayrıca bu çalışmada, uygulanan akım taramasının farklı zamansal adım hızları altında Metal-TlGaSe₂-Metal yapılarının akım-voltaj özelliklerini inceledik. Daha yüksek zamansal adım oranlı taramada pratik olarak elde edilen doğrusal I-V özelliklerinin, herhangi bir memristif cihazın temel bir özelliği olan düşük zamansal adım oranı taramasında, “not-self crossing” histerezis döngüsüne sahip olanlara dönüştürüldüğü gösterildi.

5.2.2. In/TlGaSe₂/Au Cihazın I-V-T Karakteristiği

In/TlGaSe₂/Au cihazın akım-gerilim ve voltaj-gerilim karakteristiği ölçülmek üzere Janis kreostatın soğuk parmak olarak isimlendirilen numune yerleştirme yerine mika plakanın üzerine gümüş iletken macun kullanılarak monte edildi. Akım-gerilim ölçümleri bilgisayar kontrollü olarak yapıldı ve kontrol arayüzü olarak Labview yardımıyla hazırlanan program kullanıldı. Ölçümde ise Keithley-487 (akım ölçümü), Keithley 6517A (gerilim kaynağı) cihazları kullanıldı. Tüm ölçümler Janis model bir kreostat içerisinde gerçekleştirildi. Ölçümlerden önce kreostat 10^{-3} Torr'dan daha düşük basınca vakumlandı. Numune sıcaklığı DT-470 diyotları ile ~ 0.1 K'den daha hassas LakeShore 340 model otomatik sıcaklık ayar kontrolörü ile bilgisayar programı üzerinden ayarlandı. Ölçümler 10 K adımlarla ~ 80 -300K sıcaklık aralığında yapıldı. Voltaj beslemesinin negatiften pozitif değişimi doğrudan voltaj taraması olarak adlandırılır ve voltaj beslemesinin pozitiften negatif değerlere değiştirilmesi ters voltaj taraması denir. In/TlGaSe₂/Au sandviç yapının akım-voltaj karakteristiği -15 V den +15 V aralığında voltaj tarama yöntemiyle ölçülmüştür. Ölçümler hem ileri yönlü hem

de geri yönlü besleme şeklinde $0 \rightarrow +15 \rightarrow 0 \rightarrow -15 \rightarrow 0$ süpürme döngüsünde yapıldı. Ölçümlerdeki voltaj beslemesinin değişim oranı 200 mV/s kadar düşüktü. Şekil 5.14.a'da görüleceği gibi In/TlGaSe₂/Au kontakların I-V karakteristikleri asimetriktr. İleri besleme dediğimiz durum In-alt elektrota negatif voltaj uyguladığımız durumdur. Negatif beslemede In elektrotundan p-tipi kristale elektronlar aktarılmaktadır. Pozitif besleme ise Au-üst elektrotundan In-alt elektrotuna akım akışı anlamına gelir.

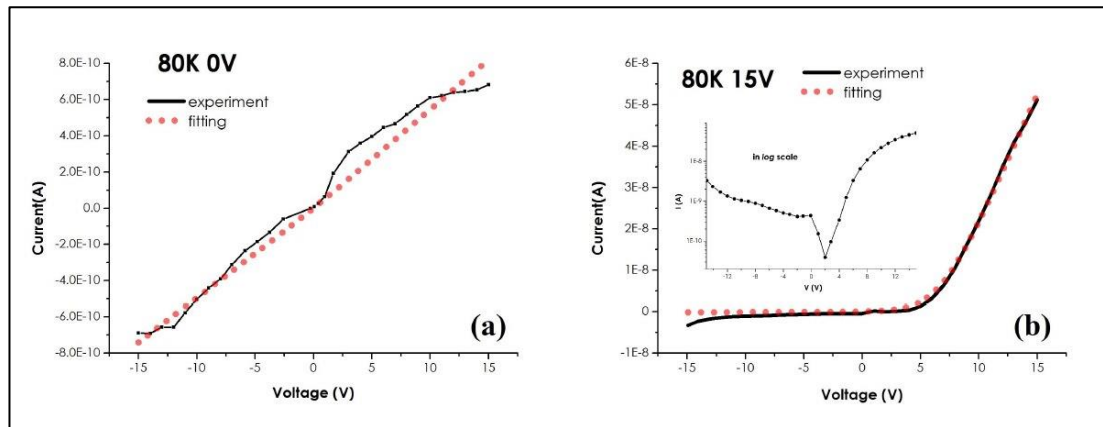
Grafiklerden görüleceği gibi $\sim -2.5V$ ile $-3V$ 'den daha büyük ileri beslemede, I-V karakteristikleri lineer olmaya başlar. Lineer olan kısmın $\sim -3 V$ den $-15 V$ aralığına denk gelen yüksek besleme bölgesindeki I-V eğrisi izdüşümü, voltaj eksenini açık devre voltajı hakkında bilgi verebilir. Açık devre voltajı (sıfır eğiminde difüzyon voltajı veya bant bükülmesi) Şekil 5.14.a'da ki verilerde elde edildiği gibi $\sim -2.55 V$ 'ye eşittir. Şekil 5.14.b'de elektroforming işleminden sonra elde edilen In/TlGaSe₂/Au sandviç cihazın akım-voltaj karakteristiği gösterilmektedir.



Şekil 5.14: 300 K sıcaklığında In/TlGaSe₂/Au Mott bariyer diyot. Au-In üst ve In-Au alt metal elektrot. Deneyisel (siyah çizgi), Schottky (kırmızı düz çizgi) ve fit (kırmızı noktalı çizgi) akım-voltaj karakteristiği, a) elektroforming işleminden önce, b) elektroforming işleminden sonra.

Bu çalışma metal- p-tipi TlGaSe₂ yarıiletken eklemine başka bir fenomenini daha sunmaktadır. Elektroforming işlemi, ölçümlere başlanmadan önce In/TlGaSe₂/Au cihazının Au-üst elektroduna $+15V$ pozitif besleme uygulanarak gerçekleştirildi. In/TlGaSe₂/Au yapısının elektroforming işlemine bağlı olarak bellek özelliği gösterdiği ilk defa gözlemlendi. Bu çalışma ile metal ile p-tipi TlGaSe₂ yarıiletken kristal sandviç yapının memristif özellikleri gösterildi. Elektroforming işlemi sırasında

In/TlGaSe₂/Au yapısının Au-In-üst ve In-Au-alt elektrot kontağına uygulanan bir besleme voltajı polaritesi, cihazın doğrultucu polaritesini tersine çevirebilir. Bu etkiye dayanarak, In/TlGaSe₂/Au yapısının elektroforming işlemine bağlı olarak transport deneylerinde bellek özelliği sergilediğini öngörmekteyiz. Metal elektrot ile p-tipi yarıiletken arasında bulunan ince bir yalıtkan tabakanın içinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyon, arayüzdeki bariyer yüksekliğini etkileyebilir. Bu da eklem noktasındaki elektron akışının bu arayüz tabakasıyla kontrol edilebileceği anlamına gelmektedir. TlGaSe₂ p-tipi yarıiletkeninin iki metal elektrot arasında sandviç yapı olarak üretilen cihazın I-V ölçüm sonuçlarından doğal olarak oluşan arayüzey yalıtkan tabakasının varlığı belirlendi. In/TlGaSe₂/Au sandviç yapısının kontakları ~80-300 K sıcaklık aralığında ileri ve geri besleme yapılarak araştırıldı. Seçilen sıcaklıklarda I-V grafikleri kaydedildi. Şekil 5.15.a, ~80 K sıcaklığında henüz elektroforming işlemi uygulanmadan kaydedilen I-V grafiği gösterilmiştir. I-V eğrilerinden görüleceği üzere cihaz neredeyse omik diyebileceğimiz şekildedir ve simetri gözden kaçmamaktadır. Şekil 5.15.a'ya göre eklemde geçen akım değeri son derece küçüktür $\sim 10^{-10}$ A. Görüldüğü gibi In/TlGaSe₂/Au yapısı sıfır eklem bariyerine sahiptir. Şekil 5.15.b, ~80 K sıcaklığında elektroforming gerilimi uygulandıktan sonra In/TlGaSe₂/Au cihazının ileri ve geri beslemede ölçülen I-V grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 5.15: In/TlGaSe₂/Au kristalinin 80 K'de I-V eğrisi. a) elektroforming öncesi, b) elektro-şekillendirme sonrası, logaritmik I-V grafiği.

Bu şekilden görüleceği gibi elektroforming işleminden sonra ~80 K sıcaklığında kaydedilen I-V grafiğinde belirgin bir doğrultma davranışı ortaya çıktığı gözlemlendi.

Şekil 5.15 b)'de Au-alt elektrot omik ve In-üst elektrot doğrultucu kontak karakteri göstermiş olup Au kontakta In kontağa In/TlGaSe₂/Au cihazı üzerinden akan elektrik akımı polaritesi pozitif olarak tanımlandı. Bu nedenle, daha önce In elektroduna elektroforming işlemi için negatif gerilim verildiğinde bu cihazdan geçen ileri akım Şekil 5.14.b'de sunulan bulguya göre doğrultucu polaritenin tersi rejimine karşılık gelir. Doğrultucu özellikleri ortadan kaldırabilmesi, In/TlGaSe₂/Au cihazının metal/yarıiletken ekleminden değil elektroforming işleminden kaynaklanmaktadır. Bu da demektir ki In/TlGaSe₂/Au diyot elektroforming işleminde çok hassas hafıza özellikleri göstermektedir. Elektroforming işlemi uygulanmasından sonra ~80 K'da In/TlGaSe₂/Au diyotun çalışma parametreleri şunlardır: doğrultma oranının (ileri besleme akımı/geri besleme akımı $\pm 15 V$) bu örnek için 17 olduğu belirlendi; sıfır beslemedeki açık devre voltajı (veya difüzyon voltajı) ise Şekil 5.15.b'da sunulan verilerden tahmin edildiği üzere ~4.5 V'ye eşittir. Bu değer, Şekil 5.14.a'da sunulan verilerden tahmin edilenden daha büyük ve Şekil 5.14.b'de sunulan değerlerden daha küçüktür ~9 V.

Deney sonuçlarını analiz etmek için In/TlGaSe₂/Au cihazının ölçülen I-V sonuçlarını Schottky diyot modeliyle simüle etmeyi denedik. Bunun için ileri besleme I-V grafiklerini klasik termiyonik emisyon teorisi çerçevesinde analiz ettik [50]. Şekil 5.14.a gösterildiği gibi; deneysel sonuçlarımızın teorik fitleri, Richardson denkleminin (mavi) ileri akımın uygulanan voltaja bağımlılığı, potansiyel bariyer yüksekliği Φ_B üzerindeki yüklü taşıyıcıların termiyonik emisyonundan kaynaklanmaktadır. Yine bu şekillerden görüleceği gibi, uygulanan tüm harici voltaj aralığında In/TlGaSe₂/Au cihazın ileri besleme I-V karakteristikleri Richardson eğimi için bilinen $\ln(I_0/T^2)$ nin $1/T$ 'ye karşı çizilen grafik yasaya uymamaktadır. Bu uyumsuzluk ara yüzey halleri [87] yahut ara yüzey katmanı [88], [89] varlığı akla getirmektedir. Mott ve Schottky'nin savundukları gibi akım, yarı iletkende sürüklenme ve difüzyondan ziyade, elektronların metale emisyon süreci ile belirlenmektedir. Bundan dolayı metal/yarıiletken eklemi Schottky bariyer yerine Mott bariyer diyot teorisi [47] ile fit etmeyi denedik. Şekil 5.14 ve 5.15'de kırmızı olarak gösterilen bu fit eğrisi (3.41) denklemi kullanılarak elde edildi. Şekil 5.14 ve 5.15'e görüleceği gibi In/TlGaSe₂/Au cihazının deneysel elde edilen I-V eğrileri; mesafe olarak metal elektrottan yüzeye kendiliğinden tükenme tabakası olan bir yarıiletken dönüşükçe, bariyer yüksekliğinin lineer olarak azaldığı yarıiletken yüzeyinde ince bir yalıtkan katman

varsayarak Mott kontak teorik modeli ile teorik olarak hesaplanan I-V grafikleri ile mükemmel şekilde uyduruldu.

TlGaSe₂ p-tipi tabakalı yarı iletken ile farklı metalik elektrot kontaklar çeşitli kombinasyonlarla denendi [56], MISIM cihaz olarak yeni bir tür memristif yapı önerdik. Bu çalışmada TlGaSe₂ tabanlı MISIM cihazlarda memristif özelliklerin ortaya çıkmasındaki temel rolün yarıiletken malzemenin yüzeyinde kendiliğinden oluşan doğal ince yalıtkan bir tabakanın olduğu gösterildi. Yüzeydeki bu doğal ince tabaka filmi tüm sıcaklıklarda yalıtkan kalmaya devam ederken, TlGaSe₂ hacim yapısının direnci ise normal bir yarıiletken gibidir yani sıcaklığın artmasıyla iletkenliği azalır. Çünkü serbest taşıyıcılar termal enerji nedeniyle alıcı bölgelerden iyonize olmuştur.

~140 K'nın biraz üzerindeki sıcaklıklarda voltaj kontrollü elektroforming işlemi sırasında, uygulanan elektriksel alan potansiyeli doğal ince yalıtım tabakasında yoğunlaşır. Bu yalıtkanın içindeki elektrostatik alanın TlGaSe₂ yarıiletken yapıdan çok daha yüksek olduğu anlamına gelir. Böylece metal elektrot ile yarıiletken arasındaki yalıtkan tabaka kutuplaşacaktır. Elektroforming prosedürü ile yalıtkan yüzey ile TlGaSe₂ yarıiletken arasında oluşan potansiyel fark (negatif veya pozitif) oluşturulan TlGaSe₂ tabanlı sandviç memristif yapının hafıza fenomenini ve I-V karakteristiklerini önemli ölçüde etkileyebilir. Bu arayüz elektrostatik potansiyeli, metal elektrot iş fonksiyonundan bağımsız olacaktır. Ayrıca elektroformingin polaritesi değiştiğinde zıt işarete dönebilir. I-V doğrultma yönünün de bu şekilde kontrol edilebilir olduğu oraya çıkarıldı [56].

~140 K'nın altındaki sıcaklıklarda ise, TlGaSe₂ yarı iletkenin direnci farkedilir ölçüde artar ($> 10^8 \Omega$). Bu ise; metal elektrot ile TlGaSe₂ yarı iletkeni arasındaki arayüzde “ölü” ince yalıtım yüzey tabakası üzerinde açıklanan elektroform voltaj düşüşü mekanizmasının gerçekleşmeyeceği anlamına gelir. TlGaSe₂ yarıiletkenin yeterince yüksek direnç oluşturduğu bu durum MISIM kapasitör yapının memristif özelliklerinin gözlemlendiği sıcaklık sınırını belirler.

Bu çalışmadaki bulguların yorumlanması için; metal-TlGaSe₂ katmanlı yarı iletken ara yüzünde kendiliğinden oluşan ince yalıtım katmanını önerildi. Üretilen sandviç yapının Mott bariyer diyot davranışı metal elektrot ile TlGaSe₂ p-tipi yarı iletkeni arayüzeyinde elektiksel bir alan tarafından indüklenen yüklerin birikmesine ve tükenmesine dayanarak açıklanabilir.

Metal/yarıiletken eklemlerin oluşum mekanizmaları ile ilgili çok sayıda araştırma olmasına rağmen, açıklanmayı bekleyen önemli problemler vardır. Örneğin; yarıiletken yüzeye yapılan metal biriktirme işlemlerinde kullanılan metotlar ve buna metalin etkisi, yarıiletken yüzeyinin bu işlemten önceki temizleme süreçleri ve diyot parametrelerini belirlemek için kullanılan ölçüm yöntemlerinde ortaya çıkan sonuçlardaki farklılıklar ve üretilen devre elemanının teknolojik uygulamalar esnasında boyutları ile ilgili mevcut problemleri olmasıdır.

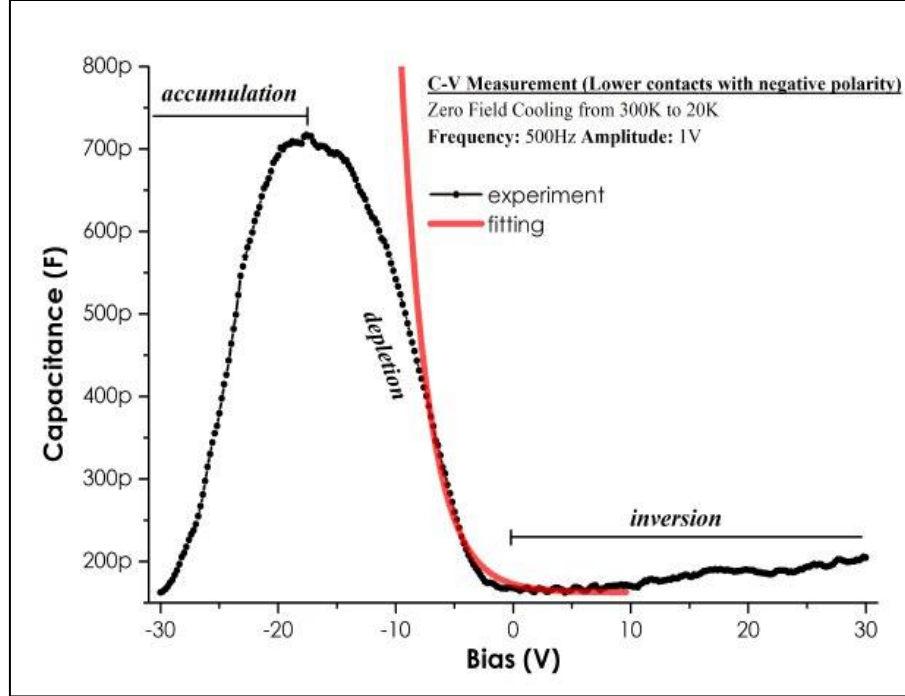
Ayrıca bu çalışmada elektroforming uygulanmış In/TlGaSe₂/Au sandviç yapılı Mott bariyer diyotun akım-voltaj ve kapasitans-voltaj ölçüm karakteristiklerindeki hafıza fenomeni nano ölçekli memristif sistemlerin elektriksel iletim mekanizmasına benzerdir. TlGaSe₂ yarıiletken tabanlı Mott enerji bariyerinin memristif davranışı, daha önce incelenmiş nano ölçekli memristif yapılardan [6], [83], [90], [91] farklı olarak hacim yapıda bulundu. Bu çalışma ile TlGaSe₂ tabakalı kristalin gösterilen elektriksel özellikleri; yarı iletken bileşiğin optoelektronik cihazlarda [92] çeşitli uygulamalar için umut vaat edici olduğunu bir kez daha göstermektedir.

5.2.3. In/TlGaSe₂/Au Cihazın C-V-T Karakteristiği

Kapasitans-voltaj ölçümleri yine Janes kreostat kullanılarak gerçekleştirildi. Ölçümler sırasında Au-In alt metal kontaklar topraklanırken, In-Au üst metal kontaklar pozitif besleme voltajı uygulandı. Bu ölçümler için HP4192A empedans analizörü kullanılarak 1 V genlikli AC sinyali ile 500 Hz' de gerçekleştirildi. C-V ölçümleri ~60-300 K sıcaklık aralığında gerçekleştirildi. Gerilim süpürmesi ise -30 V ve +30 V aralığında yapıldı. C-V karakteristiği ölçümlerinden önce In/TlGaSe₂/Au cihazına elektroforming prosedürü uygulandı. Voltaj kontrollü elektroforming bir DC güç kaynağından Au-In üst metal elektroda pozitif potansiyel ve In-Au alt elektroda da negatif gerilim uygulanmasıyla gerçekleştirildi. Daha sonra; uygulanan elektroforming potansiyeli altında In/TlGaSe₂/Au karanlıkta oda sıcaklığından ~20 K'ya soğutuldu. Elektroforming işleminden sonra In/TlGaSe₂/Au cihazı ~20 K'dan oda sıcaklığına ısıtıldı ve 300 K'da C-V karakteristiği ölçümü kaydedildi.

In/TlGaSe₂/Au cihazının 0.5 KHz'deki besleme geriliminin bir fonksiyonu olarak farklı sıcaklıklarda elde edilen C-V-T kapasitans-voltaj karakteristikleri kaydedilip, Şekil 5.16-18'de gösterildi. In/TlGaSe₂/Au sandviç yapısının C-V eğrileri; $\pm 30 V$

aralığında voltaj taraması ile elde edildi. C-V-T karakteristikleri karanlıkta ~60-300 K sıcaklık aralığında ölçülmüştür. Ölçümler esnasında In-Au alt elektrodu topraklanırken, Au-In üst elektroduna pozitif besleme voltajı uygulandı.



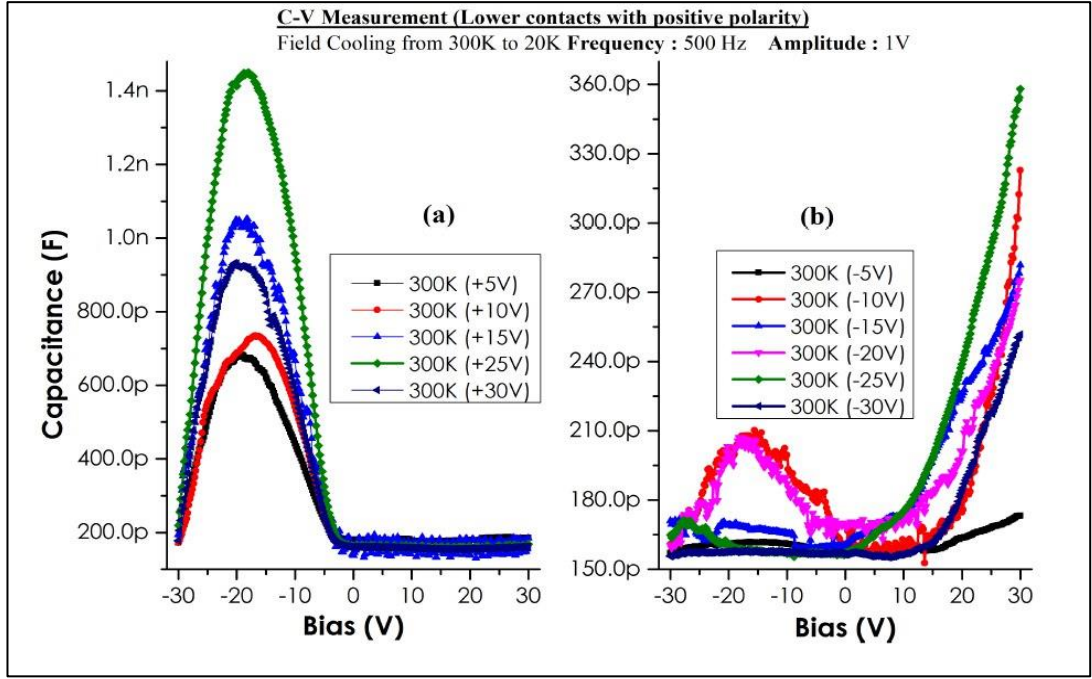
Şekil 5.16: Oda sıcaklığında In/TlGaSe₂/Au cihazın ölçülen (siyah) sonuçları ve Mott bariyer diyot teorisine göre fitting eğrisi (kırmızı) [36]. 500 Hz’de ölçüldü. Yüklenme, boşalma ve tersinin bölgeleri.

Elektroforming işlemi uygulanmadan oda sıcaklığında ölçülen In/TlGaSe₂/Au diyotun C-V karakteristiği Şekil 5.16’da gösterilmiştir. Görüldüğü gibi düşük frekanslı ölçümler için C-V grafikleri birikim ve tükenme ve tersinim bölgelerine karşılık gelen üç ayrı parçaya ayrılabilir. Bu grafik In/TlGaSe₂/Au cihazının, metal elektrot yüzey ile TlGaSe₂ yarıiletken kristal yüzeyi arasında doğal ince bir yalıtım katmanına sahip bir yüzey olduğunu doğrular. Bu durumda incelenen yapı metal-yarıiletken kontak (MS) olmaktan ziyade metal-yalıtkan-yarıiletken kontak (MIS) kapasitör olarak araştırılmaya devam edilmiştir. In-metal elektrotundan TlGaSe₂ p-tipi yarıiletkenine enjekte edilebilen holler baskın yük taşıyıcılarıdır. Dolayısıyla enjekte holler ince yalıtkan filmi arayüzeyünde biriktiğinde, doğal arayüzey yalıtım katmanı kapasitansa eşit yüksek kapasitans değerleri negatif besleme voltajlarında ölçülür. Pozitif besleme voltajlarında ise, holler TlGaSe₂ kristaline enjekte edilemeyeceği için holler doğal arayüzey yalıtım katmanından uzaklaşmaya zorlanır. Bu nedenle, In/TlGaSe₂/Au

cihazın kapasitansının pozitif besleme gerilimlerinde düşüş gözlemlendi. Buna bağlı olarak, düşük sıcaklıklarda elektroforming prosedürü uygulamaları olmadan In/TlGaSe₂/Au diyotunun kapasitans-voltaj karakteristikleri gözlemlendi.

C-V karakteristikleri ölçülmeden önce In/TlGaSe₂/Au cihazına elektroforming prosedürü uygulanarak; uygulanan elektroform voltajının polaritesi ve büyüklüğü hakkında kayda değer kapasitans değişiklikleri Şekil 5.16.a-b’de gösterildiği gibi kaydedildi. Voltaj kontrollü elektroforming, DC gerilim güç kaynağından In-Au üst metal elektoda farklı bir pozitif potansiyel uygulanarak ve Au-In alt elektrodun topraklanmasıyla aşamalar halinde gerçekleştirildi. Daha sonra uygulanan elektroforming potansiyeli altında In/TlGaSe₂/Au karanlıkta oda sıcaklığında ~20 K’ya soğutuldu. Elektroforming işleminden sonra In/TlGaSe₂/Au yapısının sıcaklığı ~20 K’dan oda sıcaklığına çıkarıldı. 300 K’da C-V karakteristiği ölçümü kaydedildi. Potansiyel gerilim oluşturma aralıkları, Şekil 5.17.a-b’de gösterildiği gibi $\pm 5 V - \pm 30 V$ arasında değiştirildi. Şekil 5.17.a’da görüleceği gibi, In/TlGaSe₂/Au sandviç yapısının kapasitansı, elektroforming potansiyelinin genliğinin artmasıyla önemli ölçüde azalır. Kapasitansın azalmasının TlGaSe₂ p-tipi yarı iletken yüzeyi üzerinde bulunan doğal ince yalıtım tabakasının direncinin ölçülen kapasitans değeri üzerindeki etkisinden kaynaklandığı açıktır. Belirtmek gerekir ki doğal yalıtım filmlerinin iletkenliği azaldığında, bu tabakanın kapasitansındaki azalma daha belirgin hale gelmektedir. In/TlGaSe₂/Au yapısının kapasitansındaki azalma, elektroforming potansiyelinin büyüklüğünün artmasıyla tersine çevrilir.

Tam tersi şekilde, In/TlGaSe₂/Au cihazın oda sıcaklığında kaydedilen C-V grafiklerine bakıldığında Şekil 5.17.b’de gösterildiği gibi alt metal elektrotlarına uygulanan elektroforming geriliminin polaritesine göre C-V karakteristiklerinde dikkate değer bir tersine çevrilebilir (geri dönüşümlü) değişiklik sergiler.



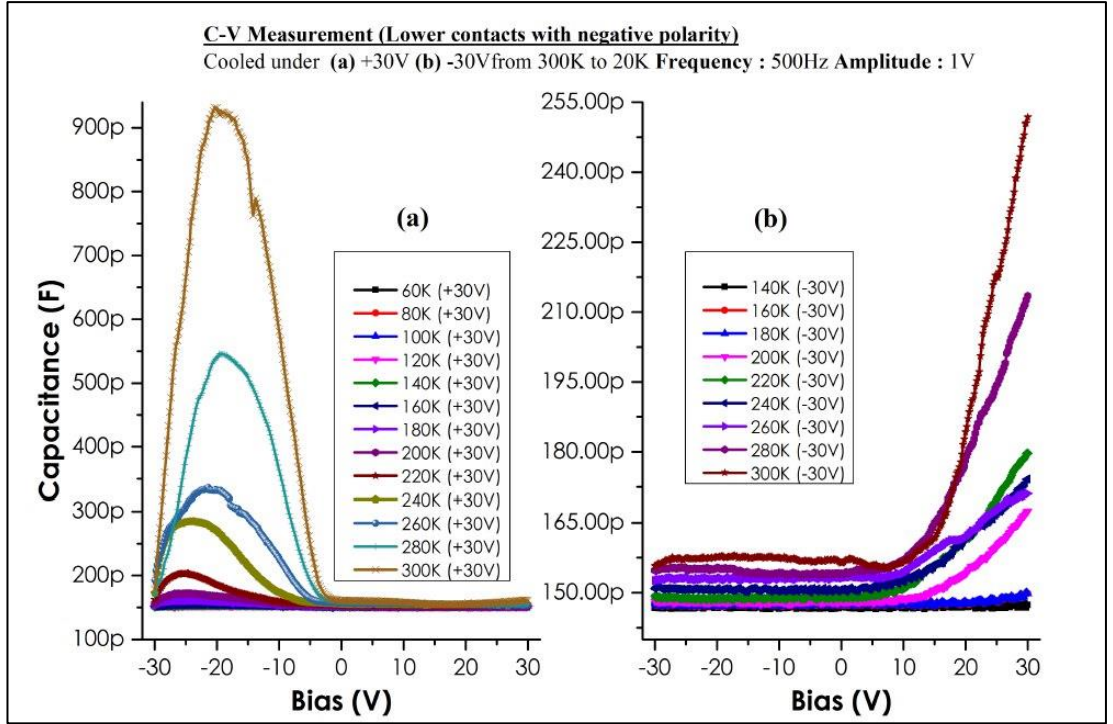
Şekil 5.17: In/TlGaSe₂/Au cihazının farklı elektroforming voltajlarından sonra deneysel C-V karakteristiği. Veriler 500 Hz frekansta 300 K’da kaydedildi. Elektroform süreci boyunca, a) pozitif forming voltajı Au-In üst elektrota uygulandı, b) negatif forming potansiyeli Au-In üst metal elektrota uygulandı. Au-In üst metal elektroduna uygulanan forming potansiyelinin işaretine bağlı olarak C-V eğrileri üzerinde ters voltaj besleme bölgesinden ileri doğru bariyer diyot kapasitansındaki değişiklikler.

Şekil 5.17.b’den görüldüğü gibi, elektroforming prosedüründe Au-In üst metal kontağına negatif besleme uygulandığında, C-V karakteristikerinin şekli elektroformasyon potansiyelinin artmasıyla büyük ölçüde değişir. Birikim ve tükenme kapasitansları C-V grafiğinde negatif besleme geriliminden pozitif besleme bölgesine değişmektedir. Birikim kapasitansı, In/TlGaSe₂/Au cihazına negatif elektroformasyon gerilimi uygulandığında tersine çevirilebilir şekilde azalırken, tükenme kapasitansı ise In-Au alt metal kontağına tekrar tekrar negatif elektroformasyon gerilimi uygulandığında kademeli olarak arttı. In/TlGaSe₂/Au cihazının C-V karakteristikleri geri dönüşümlü değişimin bu elektroformasyon voltajının polaritesine bağlılığı Şekil 5.17.b’de gösterildiği gibi I-V eğrilerinde gözlenenlere benzediği görülmektedir.

Yük taşıyıcıların In/TlGaSe₂/Au kapasitörünün arayüzeylerindeki dağılımını araştırmak için, ölçümlerin sıcaklığa bağımlılığı ~60-300 K sıcaklık aralığında yapıldı. TlGaSe₂ numunesi daha önce alt In-Au elektrotu topraklanırken Au-In üst metal kontağı sırasıyla pozitif veya negatif bir elektroformasyon potansiyeli ± 30 V

uygulanarak sıcaklık ilişkisi değerlendirilmek üzere Şekil 5.17.a-b’de C-V grafikleri verildi. Bu şekillerden görülebileceği gibi C-V grafiklerinin şimdi sıralayacağımız özellikleri sergilediği görülebilir.

İlk olarak In/TlGaSe₂/Au yapısının kapasitans durumu, bu cihazın geçmişine tekrarlanabilir hafıza etkisi gösterir. Sunulan verilerden anlaşılabileceği gibi, In/TlGaSe₂/Au sandviç yapısının kapasitif durumunun değişimi, elektroformasyon prosedürü sırasında Au-In üst metal elektroduna uygulanan elektroformasyon potansiyelinin polaritesi ile yapılabilir. Elektroformasyon sırasında Au-In üst metal elektroduna uygulanan elektroformasyon potansiyelinin negatif işareti kapasitans-voltaj grafiklerinde negatif geçiş voltaj değerleri bölgesinde bir kapasitans oluşturduğu görülmektedir. Yine farklı sıcaklıklarda gerçekleştirdiğimiz C-V ölçümleri Şekil 5.18’de gösterildiği gibi benzer sonuçlar içermektedir. Genel fark sıcaklık azalmasıyla In/TlGaSe₂/Au yapısının kapasitans büyüklüğünde belirgin düşüşler olmasıdır. Uygulanan elektroforming potansiyelinin işareti değiştirilerek aynı elektroforming prosedürü gerçekleştirildiğinde C-V eğrilerinin tamamen farklı davranış sergilediği gözlemlendi. Pozitif işaretli 30 V besleme elektroforming potansiyeli uygulandığında gözlenen In/TlGaSe₂/Au cihazının kapasitans özellikleri Şekil 5.18.b’de sunulmuştur. Bu elektroformasyon işlemine tabi tutulmuş In/TlGaSe₂/Au yapısının kapasitif durumları, farklı sıcaklıklarda ölçülmüş C-V karakteristiklerinin pozitif geçit (gate) voltaj değerlerinde bulunduğu dikkat çekmektedir. Daha sonra, bu elektroformasyon ile indüklenen farklı kapasitif In/TlGaSe₂/Au yapısını memkapasitif etki olarak nitelendirdik.



Şekil 5.18: In/TlGaSe₂/Au sandviç yapısının 60-300 K sıcaklık aralığında 500 Hz frekansta C-V grafikleri. Sıcaklık artışı 20 K olarak ayarlanmıştır. Elektroforming işlemi Şekil 5.7 deki gibi uygulandı. a) Au-In üst metal elektrot +30 V sabit gerilimde tutulmuştur, b) Au-In üst metal elektrot sabit -30 V negatif voltaj uygulandı.

İkinci olarak In/TlGaSe₂/Au sandviç yapısının sıcaklığı oda sıcaklığından ~200 K'ya düşürüldüğünde, yalıtkanın kapasitans değeri azalmıştır. Şekil 5.18'de gösterildiği gibi, özellikle birikme ve tükenme bölgelerindeki C-V karakteristikleri sıcaklık azalması ile gözle görülür bir azalma gösterir.

Son olarak değinmek gereken bir başka önemli gözlem ise ~200 K'nın altındaki sıcaklıklarda elektroformasyon prosedürü ile ilgili olarak: In/TlGaSe₂/Au cihazında ölçülebilir bir kapasitans neredeyse sabittir ve değeri sıfır beslemede 160-180 pF'dır.

Şekil 5.16-18'de sunulan In/TlGaSe₂/Au cihazındaki elektroform voltajının polaritesine bağlı C-V ölçümlerinden elde edilen kapasitans değişimleri, bir başlangıç elektroformasyon rejimi tarafından kontrol edilen bu eklemenin I-V karakteristiklerindeki doğrultucu polarite değişikliklerine tamamen uyduğuna dikkat çekmek gerekmektedir.

6. SONUÇLAR

İlk olarak farklı kontaklarla üretilen TlGaSe_2 sandviç yapı akım tarama ölçüm sonuçlarını değerlendirelim. TlGaSe_2 kristali, yarı iletken-metal arayüzlerinde ince veya çok ince izolasyonlu tabakalar bulunan yüksek omik yarı iletken malzeme olarak bilinir. Yarıiletkenin aktif direncinin değeri daima metal-yarı iletken kontakların elektrik direnci ile seri haldedir. Dış beslemenin polarizasyon yönü değiştirilerek, ileri ve geri diyotlar arasında taşıma karakteristiğini değiştirdik.

Metal-Yalıtkan- TlGaSe_2 -Yalıtkan-Metal yapısı için aşağıdaki modeli önerdik: doğal ince yalıtım katmanı, oksit malzemelerdeki iyonlar gibi bazı yüklü varlıkların göçünden dolayı harici bir elektrik alanı (elektroforming) uygulanarak polarize edilebilen yarı iletken yüzeyin yakınında bulunur. Memristif etki, elektrik alan uygulanırken yükün yer değiştirmesinden kaynaklanmaktadır. Bu katman, yapılarda memristif davranışa sebep oldur. Akım pnolarizasyonun genel yapı üzerindeki etkisi numunenin sıcaklığa bağlı olarak değişebilen direncine bağlı olacaktır; bundan dolayı yalıtım filmi ve yarı iletken arasındaki voltaj düşüşünün dağılımını değiştirir. Düşük sıcaklıklarda, yarıiletken direnci yeterince yüksek olduğunda ($>10^8$ Ohm), sistem omik bir direnç olarak davranmaktadır. 300 K'ya yakın daha yüksek sıcaklıklarda, yarı iletkenin direnci önemli ölçüde azalır, 10^6 Ohm, ve uygulanan voltajın neredeyse tamamı yalıtım katmanında düşer, böylece kontrol edilebilir doğrultma yönü ile sisteme diyot davranışı sağlar.

Metal- TlGaSe_2 -Metal yapısındaki seri direncin rolü görünüşte yarı iletken direci gibidir; gariplik diyotun yapısından kaynaklanmaktadır. Gerçekten “garip” bir diyot çünkü doğrultma yönü kontağın yapısına bağlı olarak uygulanan voltajın polaritesine bağlıdır. Örneğin, Au kontağa negatif voltaj uygulanarak I-V ölçümlerini başlanırsa, Au teması engelleyici kontak gibi davranır, TlGaSe_2 'nin p-tipi iletkenliği hesaba katılır. Aynı kontağa pozitif voltaj uygulanarak I-V ölçümlerine başlanırsa omik kontak gibi davranır. Bu nedenle, diyot polaritesini kontrol etmek için bir elektriksel eğitim talim süreci kullandık.

Metal- TlGaSe_2 -Metal yapıların akım-gerilim özelliklerinin, uygulanan akım tarama işleminin farklı zamansal adım hızları altında evrimini de inceledik. Daha yüksek zamansal adım hızı taramasında elde edilen I-V grafiklerinin, herhangi bir memristör temel bir özelliği olan daha düşük zamansal adım hızı taramasında sıkışmış

bir “kendi üzerinden geçmeyen” tip histerezis döngüsüne dönüştüğü gösterilmiştir. Memristör cihazların yüksek frekanslarda hızlı cevap verememesinin ve I-V grafiklerinin lineerliğe kayışı sanki sıradan bir direnç gibi davrandığı bilinmektedir.

In/TlGaSe₂/Au sandviç yapı, iki terminalli elektronik cihazın akım-voltaj karakteristikleri ~80 K’dan 300 K’ya voltaj tarama yöntemiyle ölçülmüştür. In/TlGaSe₂/Au cihazı oda sıcaklığında diyot benzeri doğrultma davranışı sergiler. Sonuçlarımız In/TlGaSe₂/Au’nun ileri ve geri besleme I-V karakteristiklerinin Schottky bariyer yerine Mott bariyer diyot modeli kullanılarak mükemmel bir şekilde fit edilebildiğini göstermektedir. Mott bariyer diyot modeli kullanılarak memristif özelliği analiz etmek daha önce yapılmamış bir öneridir.

Bu araştırmanın başka bir ilginç bulgusu ise, ölçümlerden önce Au üst metal elektroduna uygulanan elektroforming potansiyelinin işaret tipine bağlı olarak In/TlGaSe₂/Au’nin I-V karakteristiklerindeki polarite doğrultmanın tekrarlanabilir ve kararlı değişiklikler olmasıdır. Bu çalışmada In/TlGaSe₂/Au’nin I-V karakteristikleri ~80 K’da ölçüldü. I-V eğrilerinin ileri ve geri yönlerdeki omik doğrusal karakteri tespit edildi. Ancak, elektroformingden sonra aynı besleme voltaj aralığı için ~80 K’da net doğrultma davranışı tespit edildi. Bu doğrultma polaritesi işareti elektroforming işleminin detaylarına bağlı olduğu görüldü. In/TlGaSe₂/Au’nin I-V karakteristikleri, uygulanan elektroforming voltajının geçmişine güçlü bir bağımlılık gösterdiği görüldü. Elektroforming işlemi ile indüklenen akım-gerilim karakteristiklerinin doğrultma polaritesindeki değişiklikler memristif malzemelerin temel bir özelliğidir. Bilindiği gibi, memristif sistemler, elektriksel kutuplama işleminin geçmişini görmek için uygulanan elektroforming gerilimi ve akımı ile indüklenen (neden olduğu) ilk direnç durumunu hatırlayabilir.

In/TlGaSe₂/Au sandviç yapısındaki kapasitans-gerilim ölçümleri 500 Hz frekansı için farklı sıcaklıklarda incelendi. C-V eğrisinde birikim, tükenme ve tersdönme (inversion) bölgesi doğrulandı. C-V ölçümleri; TlGaSe₂ yüzey tabakası ve metal kontaklar arasında oluşturulması gereken çok ince bir doğal ara yüzey yalıtım katmanı nedeniyle In/TlGaSe₂/Au iki terminalli yapısının tipik bir MISIM tipi davranışı gösterdiğini doğruladı. Elektroforming prosedürünün ayrıntılarına bağlı olarak, C-V eğrileri üzerinde ileri ve geri voltaj beslemesine göre bir tükenme kapasitans pozisyonunda tekrarlanabilir ve geri dönüşümlü değişiklikler tespit edildi. DeneySEL sonuçlar, metal-TlGaSe₂ katmanlı yarı iletken arayüzün kapasitansının, elektroformasyon prosedürünün geçmişini hatırladığını açıkça göstermektedir. Bu

memkapasitans özellikleri In/TlGaSe₂/Au Mott bariyeri ilk kez kuruldu. Bu tezin bir başka önemli sonucudur.

Arayüzey tabakanın oluşmasında kontak türüne doğrudan bir bağlantı olmadığını gösterdik. Doğal ince yalıtım tabakasının doğasını anlamak için TlGaSe₂ yarı iletkenlerinin elektronik yapılarının çalışması yapılmıştır. Se-boşluklarının TlGaSe₂ tabakalı kristalinin yüzeyinde ince yalıtım filminin oluşması için olası bir yol olduğunu öngörmekteyiz.

Son olarak, cihazların In/TlGaSe₂/Au Mott bariyer diyotunun özelliklerini çalıştırdığı sonucuna vardık. Ve bu yapının direnç durumunun, yarı iletkenlerin yüzeyindeki elektroformasyon işlemine güçlü bir şekilde bağlı olan yüzeysel doğal yalıtım katmanını tarafından kontrol edildiğini önerdik.

TlGaSe₂ yüzeyinin üzerindeki doğal ince yalıtım katmanının varlığını ön görsek de oluşabilecek bileşen atomları için doğru kimyasal formül mevcut değildir. Bu ince yalıtım tabakanın mekanizmasının yüzeye yakın elektronik durumlara ve iyonik serbestlik derecesine neden olabileceği söylenebilir. Örnek olarak; ince yüzey tabakasında ayrılan boşluk kusurlarından rasgele dağıtılmış kümelerin varlığı veya yüzeyden kristal kütlesine elektrokimyasal olarak taşınan boşluk göç mekanizması gösterilebilir. Bu yüzey katmanının fiziksel ve kimyasal kökeni ve voltaj kontrollü elektroforming işlemleri süresince içinde meydana gelen elektronik fenomenler hakkında çeşitli hipotezler önerilebilir. Genellikle tabakalı kristallerin katmanlar arası bölgelerinin doğal nokta kusurları ve kafes boşluğu konsantrasyonu içerdiği varsayılmaktadır. Dolayısıyla tabakaları yeni ayrılmış bir numunenin doğal bölünmüş yüzey düzlemleri; genellikle mekanik yarıma işlemi ile külçe kristalden hazırlandıkları için farklı tipte büyütme kusurları yahut başka kusurlar içerebilir. Tabakaları henüz ayrılmış kristal yüzey için bitişik tabakalar arası zengin kusurların ve boşlukların varlığı önerilebilir; tabakalar arası zayıf bağlanan Van der Waals kimyasal bağının bulunmasından dolayı tabaka ayırma işleminin kolaylığı unutulmamalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Chua L., (1971), “Memristor-The Missing Circuit Element”, IEEE Transactions On Circuit Theory, 507-519.
- [2] Kavehei O., Iqbal A., Kim Y. S., Eshraghian K., Al-Sarawi S. F., Abbott D., (2010), “The Fourth Element: Characteristics, Modelling, and Electromagnetic Theory of the Memristor”, Royal Society of London Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences, 466 (2120): 2175-2202.
- [3] Lehtonen E., Laiho M., (2009), “Stateful implication logic with memristors”, IEEE/ACM International Symposium on Nanoscale Architectures, 33-36.
- [4] Chua L., Kang S. M., (1976), “Memristive devices and system”, Proceedings of the IEEE, 64(2), 209-223.
- [5] Thakoor S., Moopenn A., Daud T., Thakoor A. P., (1990),” Solid-state thinfilm memistor for electronic neural networks”, Journal of Applied Physics, 3132-3135.
- [6] Strukov D., Snider G., Stewart D., Willams R., (2008), “The missing memristor found”, Nature, 80-83.
- [7] Web 1, (2015), <https://www.hpcwire.com/2015/06/11/hp-removesmemristors-from-its-machine-roadmap-until-further-notice/>, (Erişim Tarihi: 14/06/2019).
- [8] Singh T., (2015), “Nanoscale Memristor”, 1st edition, Elsevier.
- [9] Hrubos Z., Gotthans T., (2014), “Analysis And Synthesis Of Chaotic Circuits Using Memristor Properties”, Journal of Electrical Engineering, 129–136.
- [10] Sun W., Li C., Yu J., (2009), “A simple memristor based chaotic oscillator, Circuits and Systems”, ICCAS, 952-954, USA/San Jose, July.
- [11] Li C., Wei M., Yu J., (2009),” Chaos generator based on a PWL memristor”, Circuits and Systems, ICCAS, 944-947.
- [12] Driscoll T., Pershin Y. V., Basov D. N., Ventra M. D, (2011), “Chaotic memristor”, Applied Physics A, 885–889.
- [13] Volkov A., Carrell H., Adesina T., Markin V., Javanov E., (2008), “Plant Electrical Memory”, Plant Signaling & Behavior, 490-492.
- [14] Volkov A. G., Reedus J., Volkova M. I., Markin V. S., Chua L., (2014), “Memristors in Plants”, Plant Signal Behavior, 9, 28152.
- [15] Markin V. S., Volkov A. G., Chua L., (2014), “An analytical model of memristors in plants”, Plant Signal Behaviour, 9(10), 972887.

- [16] Jo S. H., Chang T., Ebong I., Bhadviya B. B., Mazumder P., Lu W., (2010), "Nanoscale Memristor Device as Synapse in Neuromorphic Systems", *Nano Lett.*, 10, 1297-1301.
- [17] Chua L., (2011), "Resistance switching memories are memristors", *Applied Physics A: Material Science and Processing*, 765-783.
- [18] Yuana F., Li Y., (2019), "A chaotic circuit constructed by a memristor, a memcapacitor and a meminductor", *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 29, 101101
- [19] Song H., Kim Y. S., Park J., Kim K. M., (2019), "Neuromorphic Computing: Designed Memristor Circuit for Self-Limited Analog Switching and its Application to a Memristive Neural Network", *Advanced Electronic Materials*, 5, 6, 1970032.
- [20] Yanguas-Gil A., (2019), "Memristor design rules for dynamic learning and edge processing applications", *APL Materials*, 7, 091102.
- [21] Wang F. Z., Li L., Shi L., Wu H., Chua L., (2019), " Φ memristor: Real memristor found", *Journal of Applied Physics*, 125, 054504.
- [22] Guseinov G., Ramazanzade A., Kerimova E., (1967), "About a Group of Three-Component Compounds being Analogous to Binary Semiconductors of the AIII BVI Type", *Phys. Status Solidi*, 22, 117.
- [23] Henkel W. L., Carlone C., Hochheimer H. D., Werner A., (1982), "Highpressure Raman study of the ternary chalcogenides TlGaS_2 , TlGaSe_2 , TlInS_2 , and TlInSe_2 ", *Physical Review B*, 26, 6, 15.
- [24] Gasanly N. M., Gulfaz A., Özkan H., Ellialtıoğlu Ş., (1994), "Lattice parameters of $\text{TlGa}_{1-x}\text{In}_x\text{S}_2$ and $\text{TlGa}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$ layer mixed crystals", *Crystal Research and Technology*, 29, 3, 51-53.
- [25] Galiy P., Nenchuk T. M., Stakhira J. M., (2001), "Study of interface formation on the cleavage surfaces of $\text{A}_3\{\text{B}\}_6$ layered semiconductors", *Journal of Applied Physics*, 18–24.
- [26] Mustafaeva S. N., Aliev V. A., Asadov M. M., (1998), "Anisotropy of the hopping conductivity in TlGaSe_2 single crystals", *Springer*, 40, 48-51.
- [27] Qasrawi A. F., Gasanly N., (2006), "Electron-phonon short-range interactions, mobility and p-to n-type conversion in TlGaS_2 crystals", *Cryst. Res. Technol.*, 41, 2, 174-179.
- [28] Isaacs T., (1973), "Crystal data for thallium gallium diselenide, TlGaSe_2 ", *Journal of Applied Crystallography*, 6, 5, 413-414.

- [29] Kashida S., (1998), “Neutron scattering study of the structural phase transitions in TlGaSe₂”, Journal-Korean Physical Society, 32, 40-43.
- [30] Lalena J. N., Cleary D. A., Carpenter E., Dean N. F., (2008), “Inorganic Materials Synthesis and Fabrication”, 1st edition, Wiley-Interscience.
- [31] Bakış Y., (2011), “A3b3c62 Yarıiletken Ferroelektriklerin Dielektrik Spektroskopi Yöntemi ile İncelenmesi”, Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- [32] Gasanly N. M., (2010), “Coexistence of Indirect and Direct Optical Transitions, Refractive Indices, and Oscillator Parameters in TlGaS₂, TlGaSe₂, and TlInS₂ Layered Single Crystals”, Journal of the Korean Physical Society, 1, 57, 164-168.
- [33] Billing G. D., (2000), “Dynamics of Molecule Surface Interface”, 1st edition, New York: John Willey & Sons.
- [34] Prem A., Kresin V. V., (2012), “Photoionization profiles of metal clusters and the Fowler formula”, Physical Review A, 025201, 85.
- [35] Sze S. M., (1991), “Semiconductor Devices: Pioneering Papers”, 1st edition, Singapore: World Scientific Publishing Company.
- [36] Shashkin V. I., Murel A. V., (2008), “Properties of Mott contacts with an ultralow metal-semiconductor barrier”, Physics of The Solid State, 50 (10), 1964-1969.
- [37] Şahin Y., (2012), Doktora Tezi, “TlGaSe₂ Yarıiletken-Ferroelektrik Kristalinin Oransız Fazındaki (Inc) Yeni Polarize Durumlar ve Hafıza Etkisi”, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- [38] Bube R. H., (1987), “Electrons in Solids: an Introductory Survey”, 2nd edition., United States of America: Academic Press, Inc. Harcourt Brace Jovanovich.
- [39] Radwan A. G., Fouda M. E., (2015), “On the Mathematical Modeling of Memristor, Memcapacitor, and Meminductor”, Volume 26, London: Springer.
- [40] Chua L., (1971), “Memristor-The Missing Circuit Element, IEEE Transactions on Circuit Theory”, 18, 507-519.
- [41] Kumar M. J., (2009), “Memristor–Why Do We Have to Know About It?”, IEEE Technical Review, 26: 1, 3-6.
- [42] Johnsen G. K., (2012), “An introduction to memristor-a valuable circuit element in bioelectricity and bioimpedance”, Journal of Electrical Bioimpedance, 3, 20-28.

- [43] Ventra M. D., Pershin Y. V., Chua L. O., (2009), "Circuit Elements With Memory: Memristors, Memcapacitors, Meminductors", Proceedings of the IEEE, 27, 10, 1717-1724.
- [44] Braun K., (1874), "On the current conduction in metal sulphides", Annual Review of Physical. Chemistry, 153-556.
- [45] Bose J. C., (1904), "Bose's Wireless Dedector", Letters, U.S. Patent, 775840.
- [46] Wilson A. H., (1931), "The theory of electronic semi-conductors", Proceedings of the royal society, 133, 458-491.
- [47] Mott N., (1938), "Note on the contact between a metal and an insulator or semiconductor", Proc. Camb. Phil. Soc., 34, 568-570.
- [48] Rhoderich E. H., Williams R. H., (1988), "Metal-Semiconductor Contacts", 2nd edition, Oxford: Clarendon Press.
- [49] Schottky W., (1938), "Halbleitertheorie der Sperrschicht", Die Naturwissenschaften, 26, 52, 843-843.
- [50] Sze S., Kwok K. N., (2006), "Physics of Semiconductor Devices", 3rd edition, USA: Willey-Interscience.
- [51] Henisch H. K., (1984), "Semiconductor Contacts", 1st edition, New York: Celerondon Press.
- [52] Bardeen J., (1947), "Surface States and Rectification at a Metal SemiConductor Contact", American Physical Society Physics Review, 71, 717727.
- [53] Cowley A. M., Sze S. M., (1965), "Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems", Journal of Applied Physics, 36, 10, 32123220.
- [54] Marton C., (1982), "Advances in Electronics and Electron Physics", New York; London: Academic Press, 54,241-298.
- [55] Ligenza J. R., Spitzer W. G., (1960), "The mechanisms for silicon oxidation in steam and oxygen", Journal of Physics and Chemistry of Solids, 14, 131136.
- [56] Bilgen B., (2010), "Au/TlGaSe₂/Ag Schottky Diyotlarının Yapılması ve Elektriksel Özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- [57] Crowell C. R., Sze S. M., (1966), "Current Transport in Metal-Semiconductor Barriers", Solid Dtate Electron, 9, 1035.
- [58] Moll J. L., Tarui Y., (1963), "A New Solid State Memory Resistor", IEE Trans. Electron Devices, 10. 338-341.
- [59] Tan S. O., (2018), "Schottky Yapılar Üzerine İnceleme ve Analiz Çalışması", Politeknik Dergisi, 21, 4, 997-989.

- [60] Chiu F. C., (2014), "A Review on Conduction Mechanisms in Dielectric Films", Hindawi Publishing Corporation Advances in Materials Science and Engineering, 578168, 1-18.
- [61] Simmons J. G., (1965), "Richardson-Schottky Effect in Solids", Physical Review Letters, 15, 25, 967-968.
- [62] Adhikari S. S., (2013), "Three Fingerprints of Memristor", IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 60, 11, 3008-3021.
- [63] Biolek D., Biolek Z., Biolková V., Kolka Z., (2013), "Some fingerprints of ideal memristors", IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS2013), 201–204.
- [64] Davy H., (1801), "Additional experiments on Galvanic electricity in a letter to Mr. Nicholson", (Nicholson's) J. Natural Philosoph. Chem. Arts, IV, 326328.
- [65] Lin D., Chua L., Hui S.Y., (2015), "The First Man-Made Memristor: Circa", Proceedings of the IEEE, 103: 131-136.
- [66] Prodromakis T., Toumazou C., Chua L., (2012), "Two centuries of memristors", Nature Materials, 22; 11(6), 478-481.
- [67] Pershin Y. V., Ventra M. D., (2011), "Memory effects in complex materials and nanoscale systems", Advances in Physics, 145-227,60.
- [68] Xu C., Dong X., Jouppi N. P., Xie Y., (2011), "Design implications of memristor-based RRAM cross-point structures", IEEE explore, 11975158, France, 14-18 March 2011.
- [69] Mazumder P., Kang S. M., Waser R., (2012), "Memristors: Devices, Models, and Applications", Proceedings of the IEEE, 100, 6.
- [70] Williams R., (2008), "How we found the missing memristor", 1st edition., IEEE Spectrum, 45, 12, 28-35.
- [71] Kurinec S. K., Iniewski K., (2017), "Nonvolatile Memory Devices: Resistive Random Access Memory. Nano Semiconductor: Devices and Technology", 1st edition U.S.A., CRC Press.
- [72] Do Y. H., Kwak J. S., Bae Y. C., Jung K., Im H., Hong J. P., (2009), "Hysteretic bipolar resistive switching characteristics in TiO₂/TiO_{2-x} multilayer homojunctions", Applied Physics Letters, 95-093507.
- [73] Chua L., (2014), "If it's pinched it's a memristor, Semiconductor Science and Technology", 29(10):104001.
- [74] Yin Z. Y., Tian H., Chen C. L., (2015), "What are Memrsitor, Memcapacitor, and Meminductor?", IEEE Transactions on circuits and systems, 62, 4.

- [75] Seyidov M. Y., Suleymanov R. Şale Y., Bilgen B., (2018), “Diode Polarization and Resistive Switching in Metal/TlGaSe₂ Semiconductor/Metal Devices”, *Semiconductors*, 52 (16), 2005-2015.
- [76] Seyidov M. Y., Suleymanov R. A., Şale Y., (2016), “Defects Forming the Optical Absorbption Edge in TlGaSe₂ Layered Crystal”, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 17, 96-97.
- [77] Seyidov M. Y., Mikailzade F. A., Uzun T., Odrinsky A. P., Yakar E., Aliyeva V. B., Babayec S. S., Mammadov T. G., (2016), “Identification of intrinsic Deep Level Defects Responsible for Electret Behavior in TlGaSe₂ Layered Semiconductor”, *Physica B.: Condensed Matter*, 58 (4), 82-89.
- [78] Zhou P., Chen L., Lv H., Wan H., Sun Q., (2011), “Nonvolatile Memory Device: Resistive Random Access Memory”, *Nanoscale Semiconductor Memories*, U.S.A, CRC Press., 247-276.
- [79] Hyongsuk K, Maheshwar S, Adhikari S. P., (2012), “Pinched Hysteresis Loops is the Fingerprint of Memristive Devices”, *Division of Electronics Engineering*, 1-5.
- [80] Seyidov M. Y., Suleymanov R. A., Balaban E., Şale Y., (2014), “Field Induced Rectification and Memristive Behavior of TlGaSe₂ Layered Semiconductor”, *Applied Physics Letters*, 105, 16.
- [81] Seyidov M. Y., Suleymanov R. A., Şale Y., Balaban E., (2014), “Enhanced Excitonic Photoconductivity due to Built-in Internal Electric Field in TlGaSe₂ Layered Semiconductor”, *Journal of Applied Physics*, 116, 213702.
- [82] Adamatzky A., Chua L., (2014), “Memristor Network”, 1st edition, Springer.
- [83] Shima H., Zhong N., Akinaga H., (2009), “Switchable Rectifier Built with Pt/TiO₂/Pt Trilayer”, *Applied Physics Letters*, 94, 082905.
- [84] Yang Y., Lu W., (2013), “Nanoscale resistive switching devices: mechanisms and modeling”, *Nanoscale*, 5, 10076-10092.
- [85] Waser R., Aono M., (2007), “Nanoionics-based resistive swiching memories”, *Nature Materials*, 6, 833-840.
- [86] Levine J. D., (1971), “Schottky-Barrier Anomalies And Interface States”, *Journal of Applied Physics*, 42, 3991.
- [87] Wu C. Y., (1980), “Interfacial Layer Theory of The Schottky-Barrier Diodes”, *Journal of Applied Physics*, 51 (7), 3786-3789.
- [88] Chattopadhyay P., (1994), “Effect of Localized States on the Current-Voltage Characteristics of Metal-Semiconductor Contacts With Thin Interfacial Layer”, *Solid-State Electronics*, 37 (10), 1759-1762.

- [89] Vourkas I., Sirakoulis G., (2016), “Memristor-Based Nanoelectronic Computing Circuits and Architectures”, 1st edition, ECC: Springer.
- [90] Manem H., Rose G. S., He X., Wang W., (2010), “Design considerations for variation tolerant multilevel CMOS/Nano memristor memory, Proceedings of the 20th symposium on Great lakes symposium on VLSI”, 282-297, NewYork, United States, May.
- [91] Owens A., (2019), “Semiconductor Radiation Detectors”, 1st edition, CRC Press.
- [92] Widrow B., Hoff M. E., (1960), “Adaptive switching circuits”, Proc. Of Wescon Conv. Rec., 4, 96-140.

ÖZGEÇMİŞ

1983 Mudurnu doğumludur. 2004’de lisans eğitimini tamamladıktan sonra çeşitli dersanelerde fizik öğretmenliği yapmıştır. 2007 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsünde yüksek lisansa başlayıp 2010’da tamamlamıştır. 2011’den beri Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde doktora programında çalışmalarına devam etmektedir. Kocaeli Büyükşehir Belediyesi’nde çalışmaktadır, evlidir.

EKLER

Ek: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Seyidov M. Y, Suleymanov R, Şale Y., Bilgen B., (2018), “Diode Polarization and Resistive Switching in Metal/TlGaSe₂ Semiconductor/Metal Devices”, Semiconductors, 52 (16), 2005-2015.