

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

METAL-YALITKAN-METAL YAPISINDAKİ METAL OKSİT
TABANLI MEMRİSTİF YAPILARIN DİRENÇ-ANAHTARLAMA
ÖZELLİKLERİNİN AYDINLATILMASI

GÖKHAN EKİNCİ

DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: DOÇ. DR. SİNAN KAZAN

TEMMUZ 2024

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜST EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

METAL-YALITKAN-METAL YAPISINDAKİ METAL OKSİT
TABANLI MEMRİSTİF YAPILARIN DİRENÇ- ANAHTARLAMA
ÖZELLİKLERİNİN AYDINLATILMASI

GÖKHAN EKİNCİ

DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: DOÇ. DR. SİNAN KAZAN

TEMMUZ 2024

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

**INVESTIGATION OF THE RESISTIVE SWITCHING
PROPERTIES OF METAL OXIDE BASED MEMRISTIVE
STRUCTURES IN METAL- INSULATOR-METAL STRUCTURE**

GÖKHAN EKİNCİ

**A THESIS OF DOCTORATE
DEPARTMENT OF PHYSICS**

ADVISOR: DOÇ.DR. SİNAN KAZAN

JULY 2024

DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 01/07/2024 tarih ve 2024/33 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 03/07/2024 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Gökhan Ekinci'in tez çalışması Fizik Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) :Doç. Dr. Sinan KAZAN

ÜYE

:Prof. Dr. Bulat RAMİ

ÜYE

:Prof. Dr. Faik MİKAİLZADE

ÜYE

:Dr. Öğr. Üyesi Ömer CEYLAN

ÜYE

:Prof. Dr. Sait Eren SAN

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu tez çalışmasında iki metal elektrot arasında tek ve iki metal oksit katmanının olduğu, ince film yığın yapıdan oluşan tek hücreli memristör cihazların üretimi gerçekleştirilerek direnç-anahtarlama davranışları ayrıntılı bir şekilde incelendi. PLD (Pulsed Laser Deposition) ve Magnetron Sputter ince film üretim tekniği kullanılarak, önce farklı kalınlıktaki VO_x metal oksit katmanlardan meydana gelen tek oksit katmanlı memristör cihazlar üretildi ve oksit katmanının kalınlığının fonksiyonuna göre direnç-anahtarlama davranışları incelendi. Ayrıca VO_x/TiO_y formundaki iki katmanlı metal oksit yapıdan oluşan memristör cihaz üretimi gerçekleştirilerek direnç-anahtarlama özellikleri araştırıldı. Başarılı bir cihaz üretimi için önceden cihaz üretiminde kullanılacak VO_x ve TiO_y oksit katmanların üretimi gerçekleştirilip onların yapısal özellikleri ayrıntılı bir şekilde XRD (X-ışını Kırınımı), XRR (X-ışını Yansıtıcılığı) ve XPS (X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi) teknikleri ile karakterize edildi. Yapısal karakterizasyonlar ayrıca Raman Spektroskopisi, FTIR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi) Spektroskopisi ve PL (Fotoluminesans) Spektroskopisi yöntemleriyle de incelenerek yapıların geniş kapsamlı yapısal özellikleri araştırıldı. Daha sonra metal oksit tabanlı memristör cihazların üretimi gerçekleştirilerek direnç-anahtarlama özellikleri DC ve AC elektriksel karakterizasyon teknikleri ile ayrıntılı bir şekilde incelendi. Üretilen cihazların direnç-anahtarlama davranışları memristif ve sinaptik davranışlar temelinde de kapsamlı olarak aydınlatıldı.

Anahtar Kelimeler: Direnç-anahtarlama, Memristör, VO_x , TiO_y .

ABSTRACT

In this thesis study, single-cell memristor devices consisting of a thin-film stack structure with a single or two metal oxide layers between two metal electrodes were produced and their resistance-switching behaviors were examined in detail. Using PLD (Pulsed Laser Deposition) and Magnetron Sputter thin film production techniques, single oxide layer memristor devices consisting of VO_x metal oxide layers of different thicknesses were first produced and their resistance-switching behaviors were examined according to the function of the thickness of the oxide layer. Additionally, a memristor device consisting of a two-layer metal oxide structure in VO_x/TiO_y was produced and its resistance-switching properties were investigated. To satisfy a successful device fabrication, the VO_x and TiO_y oxide layers to be used in device production were previously produced and their structural properties were characterized in detail by XRD (X-ray Diffraction), XRR (X-ray Reflectivity) and XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) techniques. Structural characterizations were also examined using Raman Spectroscopy, FTIR (Fourier Transform Infrared) Spectroscopy, and PL (Photoluminescence) Spectroscopy methods to investigate the comprehensive structural properties of the structures. Then, metal oxide-based memristor devices were produced and their resistance-switching properties were examined in detail using DC and AC electrical characterization techniques. The resistance-switching behaviors of the produced devices were also comprehensively elucidated based on memristive and synaptic behaviors.

Keywords: Resistive-switching, Memristor, VO_x , TiO_y .

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim süresince her zaman bilgi ve önerilerini esirgemeyen ve çalışmalarımızda her zaman bizi motive eden danışman hocam Sayın Doç. Dr. Sinan Kazana' a teşekkür ederim. Ayrıca Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü ve Nanoteknoloji Enstitüsündeki tüm hocalarıma ve arkadaşlarıma ve özellikle sayın Erdem Demirci, Hasan Pişkin, Mehmet Emre Aköz, Bünyamin Özkal ve Nora Ali. A. S. Al-jawfi' ye de teşekkür ederim.

Doktora eğitimim süresince çalıştığım Piri Reis Üniversitesindeki tüm hocalarıma ve çalışma arkadaşlarıma samimi dostlukları ve çalışma hayatında göstermiş oldukları yardım ve kolaylıklar için ve özellikle de çalışmalarım beni her zaman destekleyen, motive eden ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen Fen Edebiyat Fakültesi Dekanımız Sayın Prof. Dr. Zehra Akdeniz hocamada sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aldığım tüm kararlarda ve hayatımın her aşamasında beni destekleyen sevgili aileme de sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 121F390 numaralı proje ile desteklenmiştir. Projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı	4
2. MEMRİSTÖR VE MEMRİSTİF CİHAZLAR	6
2.1. Memristörün TemelleriKapsamında Değerlendirilmesi	6
2.1.1. Memristörün Tanımı ve Fiziksel Keşfi	6
2.1.2. Memristörün Özellikleri ve Temelleri	8
2.1.3. HP Memristör	13
2.1.4. Memristörün Uygulamaları	14
2.2. Memristör Modelleri	15
2.2.1. Doğrusal Sürüklenme Modeli	15
2.2.2. Doğrusal Olmayan Sürüklenme Modeli	16
2.2.3. Simmons Tünel Bariyer Modeli	16
2.2.4. Eşik Uygulamalı Memristör Modeli	17
2.2.5. Genelleştirilmiş Memristör Modeli	17
2.3. Gelişen Kalıcı Hafıza Teknolojileri	18
2.3.1. Faz Değişim Hafızası	19
2.3.2. Manyetik RAM	19
2.3.3. Dirençli RAM	19
2.3.4. Hafıza Teknolojilerinin Gelişimi	20
2.4. Memristör Temelli Nöromorfik Bilgi İşlem	20
2.4.1. Nöromorfik Bilgi İşlem	21
2.4.2. Yapay Sinaps Olarak Memristör	23
2.4.3. Yapay Nöral Ağlarda Memristör	27
3. MALZEME VE METOT	29
3.1. Materyaller	29
3.1.1. VO ₂	29
3.1.2. TiO ₂	33
3.2. Metal Oksit Yapılarda Direnç Anahtarlama	36
3.2.1. VO ₂ Direnç Anahtarlama Özelliği	38
3.2.2. TiO ₂ Direnç Anahtarlama Özelliği	38
3.3. Memristör Cihaz Üretiminde Kullanılan Yöntemler	39
3.3.1. Darbeli Lazer Biriktirme	39
3.3.2. Magnetron Püskürtme Yöntemi	40
3.4. Yapısal Karakterizasyonda Kullanılan Teknikler	40
3.4.1. X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS)	40

3.4.2. X-Işını Kırınımı (XRD)	41
3.4.3. X- Işını Yansıtıcılığı (XRR)	42
3.4.4. Fotolüminesans (PL) Spektroskopisi	42
3.4.5. Raman Spektroskopisi	43
3.4.6. Fourier Dönüşümü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi	44
3.4.7. Tarayıcı Elektron Mikroskobu (SEM)	45
3.5. Elektriksel Karakterizasyonda Kullanılan Teknikler	46
3.5.1. Van Der Pauw Yöntemi	46
3.5.2. DC Elektriksel Ölçüm	49
3.5.3. AC Elektriksel Ölçüm	50
4. VO _x VE TiO _y İNCE FİMLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONLARI	54
4.1. VO _x İnce Fimlerin Üretimi ve Yapısal Karakterizasyonu	54
4.2. VO _x İnce Fimlerin Termal İşleme Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi	61
4.3. TiO _x İnce Fimlerin Üretimi ve Yapısal Karakterizasyonu	66
4.4. TiO _x İnce Fimlerin Termal İşlemeYapısal Özelliklerinin İncelenmesi	69
4.5. VO _x ve TiO _y İnce Fimlerin Elektriksel Özellikleri	73
5. VO _x VE VO _x /TiO _y TEK HÜCRELİ MEMRİSTÖR CİHAZLARIN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU	76
5.1. VO _x Tek Hücreli Memristör Cihazların Üretilmesi ve Karakterizasyonu	76
5.2. VO _x Tek Hücreli Memristör Cihazların DC Elektriksel Karakterizasyonu	80
5.3. VO _x Tek Hücreli Memristör Cihazların AC Elektriksel Karakterizasyonu	83
5.4. VO _x /TiO _y Tek Hücreli Memristör Cihazların Üretilmesi ve Karakterizasyonu	91
5.5. VO _x /TiO _y Tek Hücreli Memristör Cihazların DC Elektriksel Karakterizasyonu	95
5.6. VO _x /TiO _y Tek Hücreli Memristör Cihazların AC Elektriksel Karakterizasyonu	97
6. SONUÇLAR VE YORUMLAR	101
KAYNAKLAR	104
ÖZGEÇMİŞ	117
TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR	118

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Pt	: Platin
Cu	: Bakır
TiN	: Titanyum Nitrit
Ar	: Argon
R _{ON}	: Düşük Direnç Durumu
R _{OFF}	: Yüksek Direnç Durumu
$g(V(t))$	: Durum Değişkeni
$f(x(t))$	: Durum Değişkeni Fonksiyonu
V(p,n)	: Durum Değişken Hareketi İçin Eşik Voltajı
W	: Sinaptik Ağırlık
W	: Watt
eV	: Elektron Volt
I	: Akım
E	: Enerji
ms	: Milisaniye
mm ²	: Mili metrekare
μj	: Mikro joule
P	: Güç
V	: Gerilim
q	: Yük
φ	: Manyetik Akı
A	: Amper
mA	: Mili Amper
nm	: Nanometre
μm	: Mikrometre
IR	: Kızılötesi Spektroskopisi
°C	: Santigrat Derece
VO	: Vanadyum Oksit
NiO	: Nikel Oksit
MgO	: Magnezyum Oksit
V ₂ O ₅	: Vanadyum Pentoksit
XPS	: X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi
XRD	: X-ışınları Kırınımı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
IR	: Kızılötesi Spektroskopisi
XRR	: X-ışını Yansıtıcılığı
VO ₂	: Vanadyum Dioksit
VO _x	: Oksijen Kusurlu Vanadyum Oksit
TiO ₂	: Titanyum Dioksit
TiO _x	: Oksijen Kusurlu Titanyum Oksit
DC	: Doğru Akım
AC	: Alternatif Akım
CMOS	: Tamamlayıcı-Metal-Oksit-Yarıiletken
PLD	: Darbeli Lazer Biriktirme (DLB)
HP	: Hewlett Packard
MIM	: Metal-Yalıtkan-Metal

LTP	: Uzun Dönem Güçlendirme
LTD	: Uzun Dönem Çöküntü
SDTP	: Spike- Zaman- Bağımlı -Esneklik
RAM	: Rasgele Erişimli Hafıza
SRAM	: Durağan Rasgele Erişimli Hafıza
DRAM	: Dinamik Rasgele Erişimli Hafıza

ŞEKİLLER DİZİNİ

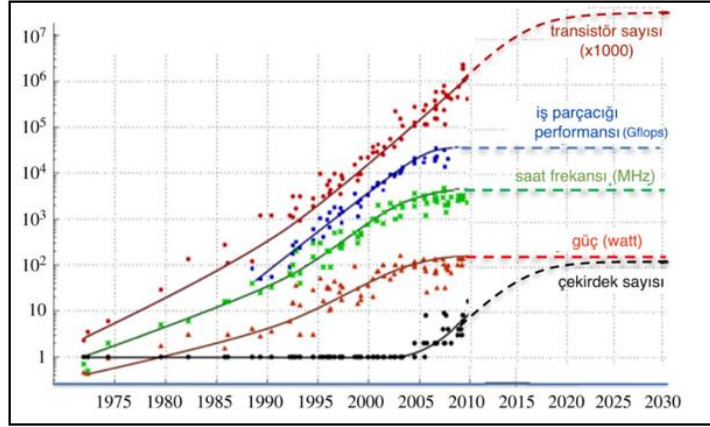
	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: Yıllara göre Moore yasası ve mikroişlemci bileşenlerindeki değişim.	2
Şekil 1.2: Von-Neumann ve nöromorfik mimarinin karşılaştırılması.	2
Şekil 1.3: Memristör cihazının kademeli iletkenlik değişimi.	4
Şekil 2.1: Temel devre değişkenleri ve onları birbirine bağlayan devre elemanları arasındaki ilişki.	7
Şekil 2.2: Memristör cihaz.	7
Şekil 2.3: Memristörün değişen direnç durumlarındaki akım değişimi.	9
Şekil 2.4: Memristör cihaza voltaj uygulanmasıyla TiO_2 katman içerisindeki elektronların ve oksijen boşluklarının hareketi.	11
Şekil 2.5: Kısık histerisis eğrisi şeklinde memristör cihazının akım-voltaj eğrisi.	12
Şekil 2.6: HP memristör ve onun eşdeğer devre modeli.	14
Şekil 2.7: Biyolojik sinir sistemindeki nöronların bağlantısı.	21
Şekil 2.8: Sinaps yoluyla iki nöronun bağlanması.	22
Şekil 2.9: Sinaptik bağlantı gücünün değişmesi.	22
Şekil 2.10: Birden fazla nöronun bağlantılı olduğu çapraz çubuk mimarisi.	23
Şekil 2.11: İyon göçü yoluyla memristör cihazın sinaptik esnekliği taklit etmesi.	25
Şekil 2.12: Oksijen boşluklarının filament oluşturmaları yoluyla memristör cihazın sinaptik esnekliği taklit etmesi.	26
Şekil 2.13: Elektrik uyarımlarına memristör cihazının sinaptik esnekliği taklit ederek yanıt vermesi.	27
Şekil 2.14: Memristör çapraz çubuk dizisi mimarisiyle gerçekleştirilmiş yapay nöral ağ uygulaması.	28
Şekil 3.1: VO_2 'nin sıcaklık ile faz değişim mekanizması.	30
Şekil 3.2: VO_2 'nin farklı kristal faz yapıları.	31
Şekil 3.3: Literatürde yapılmış iyi kimyasal orana sahip VO_2 ince filmin XPS örneği.	32
Şekil 3.4: TiO_2 kristal yapıdaki kusur çeşitleri.	34
Şekil 3.5: TiO_2 'nin farklı kristal fazları.	34
Şekil 3.6: Sıcaklığın fonksiyonu olarak TiO_2 nin kristal yapısındaki faz değişimi.	35
Şekil 3.7: Direnç anahtarlama davranışı gösteren oksit temelli memristör cihazında oksijen boşluklarının göçü.	37
Şekil 3.8: TiO_2 oksit bileşiğindeki oksijen boşluklarının iletken filament yapılar oluşturmaları yoluyla direnç-anahtarlama davranışının temsili resmi.	38
Şekil 3.9: Darbeli lazer biriktirme yönteminin şeması.	39
Şekil 3.10: Magnetron püskürtme işleminin şeması.	40
Şekil 3.11: X-ışını kırınımının sistematik görüntüsü.	41
Şekil 3.12: Fotoluminesans spektroskopisinin çalışma prensibi.	43
Şekil 3.13: Raman spektroskopisinin çalışma prensibi.	44
Şekil 3.14: FTIR spektrometresindeki temel bileşeni.	45
Şekil 3.15: SEM cihazının genel fiziki ve sistematik görüntüsü.	46
Şekil 3.16: Özdirenç hesaplamak için voltaj ve akım ölçüm geometrisi.	47
Şekil 3.17: Hall katsayısı hesabı için voltaj ve akım ölçüm geometrisi.	49
Şekil 3.18: DC elektriksel ölçüm düzeneğinin arayüzü.	50
Şekil 3.19: AC elektriksel ölçüm düzeneği.	51
Şekil 3.20: Sinaptik esneklik ölçümleri için ilgili program ara yüzeyi ve çalışma mekanizması.	52

Şekil 3.21: PPF indeksi ölçüm düzeneğinin çalışma mekanizması.	52
Şekil 3.22: SDTP ölçümleri mekanizması ve ölçüm düzeneğinin ara yüzü.	53
Şekil 4.1: VO ₂ ince film O 1s XPS spektrumu.	55
Şekil 4.2: VO ₂ ince film V 2p XPS spektrumu.	55
Şekil 4.3: 100 nm kalınlığındaki VO ₂ ince filmin XRR ölçüm grafiği.	56
Şekil 4.4: VO ₂ ince filmlerin soldan sağa artan film kalınlığına göre SEM görüntüleri.	57
Şekil 4.5: VO ₂ ince filmlerin soldan sağa artan alttaş sıcaklığına göre SEM görüntüleri.	57
Şekil 4.6: VO ₂ ince filmlerin a,b,c sırasıyla artan film kalınlığına göre PL spektrumları.	58
Şekil 4.7: VO ₂ ince filmlerin değişen alttaş sıcaklığına göre PL spektrumları.	59
Şekil 4.8: VO ₂ ince filmlerin a,b,c sırasıyla artan film kalınlığına göre FTIR spektrumları.	60
Şekil 4.9: VO ₂ ince filmlerin alttaş sıcaklığına göre FTIR spektrumları	61
Şekil 4.10: Isıl işlem görmüş VO ₂ filmlerin XRD spektrumu.	62
Şekil 4.11: Isıl işlem görmüş VO ₂ filmlerin Raman spektrumu.	63
Şekil 4.12: Isıl işlem görmüş VO ₂ filmlerin SEM görüntüsü.	64
Şekil 4.13: Isıl işlem görmüş VO ₂ filmlerin PL spektrumu.	65
Şekil 4.14: Isıl işlem görmüş VO ₂ filmlerin FTIR spektrumu.	66
Şekil 4.15: 40 nm kalınlığındaki TiO ₂ ince filmin XRR ölçüm grafiği.	67
Şekil 4.16: TiO ₂ ince film O 1s XPS spektrumu.	68
Şekil 4.17: TiO ₂ ince film Ti 2p XPS spektrumu.	68
Şekil 4.18: Farklı kalınlıklara göre TiO ₂ ince filmlerin SEM görüntüleri.	69
Şekil 4.19: Isıl işlem görmüş TiO ₂ filmlerin XRD spektrumu.	69
Şekil 4.20: Isıl işlem görmüş VO ₂ filmlerin Raman spektrumu.	70
Şekil 4.21: Yüksek sıcaklık ısıtıl işlem görmüş TiO ₂ filmlerin XRD spektrumu.	70
Şekil 4.22: Isıl işlem görmüş TiO ₂ filmlerin SEM görüntüsü.	71
Şekil 4.23: Isıl işlem görmüş TiO ₂ filmlerin PL spektrumu.	72
Şekil 4.24: Isıl işlem görmüş TiO ₂ filmlerin FTIR spektrumu.	73
Şekil 4.25: Van Der Pauw yöntemi ile VO _x filmlerin elektriksel karakterizasyon sonuçları.	74
Şekil 4.26: Van Der Pauw yöntemi ile VO _x /TiO _y filmlerin elektriksel karakterizasyon sonuçları.	74
Şekil 4.27: Van Der Pauw yöntemi ile ince filmlerin elektriksel karakterizasyonu.	75
Şekil 5.1: Tek hücreli memristör cihazların sistematik şekli.	77
Şekil 5.2: Memristör cihaz bileşenindeki oksit katmanın O 1s ve V 2p ortamının deneysel yüksek çözünürlüklü XPS spektrumu ve deneysel verilerin simülasyon sonuçları.	78
Şekil 5.3: Memristör cihaz bileşenindeki oksit katmanın PL spektrumu.	79
Şekil 5.4: Memristör cihazın fiziki yapısı ve elektriksel ölçüm düzeneği.	80
Şekil 5.5: 25 nm VO _x kalınlıklı memristör cihazın direnç-anahtarlama davranışı.	82
Şekil 5.6: 13 nm VO _x kalınlıklı memristör cihazın direnç-anahtarlama davranışı.	82
Şekil 5.7: 8 nm VO _x kalınlıklı memristör cihazın direnç-anahtarlama davranışı	83
Şekil 5.8: 25 nm VO _x kalınlıklı memristör cihazın uygulanan ardışık atımlara karşı kademeli akım değişimleri.	85
Şekil 5.9: 13 nm VO _x kalınlıklı memristör cihazın uygulanan ardışık atımlara karşı kademeli akım değişimleri.	85
Şekil 5.10: 3 nm VO _x kalınlıklı memristör cihazın uygulanan ardışık atımlara karşı kademeli akım değişimleri.	86

Şekil 5.11: 25, 13 ve 3 nm VO _x oksit kalınlığına sahip memristör cihazlarının PPF göstergeleri.	88
Şekil 5.12: 25 nm VO _x oksit kalınlığına sahip memristör cihazının sinaptik ağırlık değişimi.	90
Şekil 5.13: 13 nm VO _x oksit kalınlığına sahip memristör cihazının sinaptik ağırlık değişimi.	90
Şekil 5.14: 3 nm VO _x oksit kalınlığına sahip memristör cihazının sinaptik ağırlık değişimi.	91
Şekil 5.15: TiN/VO _x /TiO _y /Cu Memristör cihazın fiziki yapısı.	92
Şekil 5.16: TiN/VO _x /TiO _y /Cu Memristör cihazın fiziki yapısı.	93
Şekil 5.17: VO _x /TiO _y Memristör cihaz bileşenindeki VO _x oksit katmanının V 2p ortamının deneysel yüksek çözünürlüklü XPS spektrumu ve deneysel verilerin simülasyon sonuçları.	94
Şekil 5.18: VO _x /TiO _y Memristör cihaz bileşenindeki TiO _y oksit katmanının O 1s ortamının deneysel yüksek çözünürlüklü XPS spektrumu ve deneysel verilerin simülasyon sonuçları.	94
Şekil 5.19: VO _x /TiO _y Memristör cihaz bileşenindeki VO _x oksit katmanının Ti 2p ortamının deneysel yüksek çözünürlüklü XPS spektrumu ve deneysel verilerin simülasyon sonuçları.	95
Şekil 5.20: TiN/VO _x /TiO _y /Cu memristör cihazın DC elektriksel ölçüm düzeneği.	96
Şekil 5.21: TiN/VO _x /TiO _y /Cu memristörün dirençli anahtarlama davranışı.	97
Şekil 5.22: TiN/VO _x /TiO _y /Cu memristör cihazın AC elektriksel ölçüm düzeneği.	98
Şekil 5.23: TiN/VO _x /TiO _y /Cu memristör cihazının uygulanan ardışık atımlara karşı kademeli akım değişimleri.	99
Şekil 5.24: TiN/VO _x /TiO _y /Cu memristör cihazının sinaptik ağırlık değişimi.	100

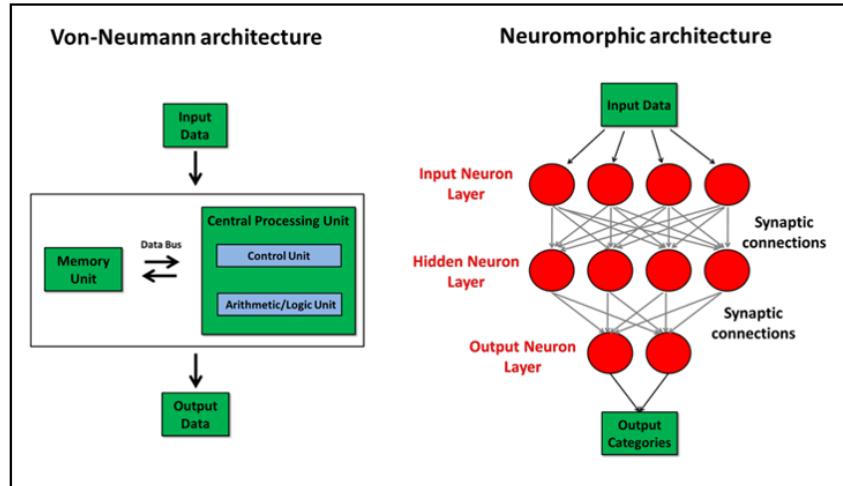
1. GİRİŞ

Diğer yaşayan canlıların aksine insanoğlunun refah ve huzuruna en büyük katkı onun sahip olduğu fiziksel güçlerinden değil sahip olduğu yüksek zekasından gelir. İnsan oğlu düşünebilen canlılar arasında zekanın en yüksek derecesine sahiptir ve bu durum onun canlılar arasındaki en karmaşık beyne sahip olmasının bir sonucudur. Bu yüzden insan beyninin ve zekasının tam olarak anlaşılması için araştırmacılar bu konu üzerinde yoğun bir şekilde çalışmışlardır. Yapılan araştırmalar beynin bilişsel gücünün kesin dijital hesaplamalardan kaynaklanmadığını aksine yavaş, kesin ve güvenilir olmayan analog bileşenlerin büyük miktarını içeren bilgi işlemenin toplu formundan kaynaklandığını göstermiştir. Bu duruma en güzel örnek insan beyninin model tanımadaki başarısı ve bu alandaki enerji verimliliği verilebilir. Çünkü dijital bilgisayarlar için bir kaplandan kedinin ayırımını yapmak çok üst düzey bir görev oluyorken bu ayırım küçük bir çocuk için oldukça normal bir görev olmaktadır [1], [2]. Yaşadığımız çağ gelişmiş bir bilgi çağıdır ve kolayca kilometrelerce uzaktaki veri tabanlarına bağlanabilir, süper bilgisayarlarla işlem yapabiliriz. Geçen yüz yıl boyunca sürekli gelişim gösteren bu teknolojik devrimin başarısı iki temele dayanır. Bu temellerden biri donanım teknolojisi diğeri ise yazılım teknolojisidir. Donanım teknolojisi bünyesinde transistörleri, mikro işlemcileri ve hafızalarıda içeren elektronik cihaz teknolojisindeki gelişmelerden daima destek görmüştür. Benzer şekilde yazılım teknolojileride bu desteği programlama dilleri, iletişim protokolleri ve kriptolojideki gelişmelerle sağlamıştır. Teknolojik ilerlemenin bu iki temelleri bizim şu an kullandığımız ve geliştirmek için sürekli emek harcadığımız bilgi çağını ortaya çıkardı. Şekil 1.1’ de gösterildiği gibi bu bilgi çağına en büyük katkılardan bir tanesi her iki yılda bir bütünleşmiş devrelerdeki transistörlerin sayısının yaklaşık iki kat artacağını belirten Moore yasasıdır [3]. Bu yasa günlük yaşamdaki veri kullanımına ve onun manipülasyonuna büyük katkı sağlamıştır. Teknolojideki gelişmelere rağmen bu yasanın yakın zamanda bir krize gireceği ve bilgi işlem gücündeki sürekli gelişme ve maliyetlerdeki azalışın son bulacağı artık herkes tarafından kabul edilmektedir [4], [5].



Şekil 1.1: Yıllara göre Moore yasası ve mikroişlemci bileşenlerindeki değişim [6].

Bugünün ticari bilgisayarlarının neredeyse tamamı von Neumann tarafından tanımlanmış von Neumann mimarisi modelini takip etmektedir [7]. Bu mimari, veri ve programlama talimatlarını yaygın bir depolama alanında tutan ve sıklıkla veri taşınımına dayanan mimari olarak bilinir. Bu mimarinin ana bileşenleri merkezi işlemci birimi ve giriş-çıkış cihazları yoluyla dışarıyla bağlantılı hafıza birimidir. Merkezi işlemci birimi kontrol, aritmetik, mantık ve kayıt biriminden oluşmaktadır. Merkezi işlemci birimi veriyi ve programlama talimatlarını hafıza biriminden alıp getirir. Bu talimatlar ve veri kontrol birimi tarafından harekete geçirilerek daha sonra aritmetik ve mantık birimi tarafından ilgili operasyonlar gerçekleştirilir [2], [8].

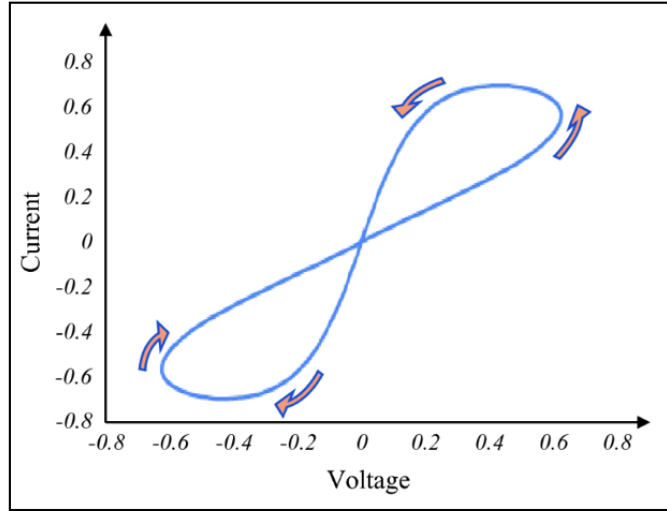


Şekil 1.2: Von-Neumann ve nöromorfik mimarinin karşılaştırılması [2].

Yapay zekâ geleneksel bilgisayarların hesaplama gücünü kullanarak nöromorfik kavramlardan esinlenilmiş nöral ağlar gibi işlemleri gerçekleştirmektedir. Bu gelişen

yapay zekâ teknolojileri en iyi santraç ustasını yenmekten ve bir kalabalıkta oyuncuların yüzlerini tanımaya kadar olağan üstü başarıları gerçekleştirebiliyor. Fakat yapay zekâ temelinde yapay nöral ağları çalıştırabilmek için donanım gereksinimleri, enerji ve ölçeklendirebilme imkanları oldukça yüksektir. Bu açıdan nöromorfik kavramlardan esinlenilmiş yeni bir bilgi işlem mimarisi enerji verimli makinelere ve küresel güç tüketiminde gelişmelere imkân tanıyabilir. Bilgi işlem performansı ve kitlesel data artışıındaki ilerlemeler temelinde gelişen ve derin öğrenmeye dayalı yapay zekâ algoritmaları başta model tanıma problemleri olmak üzere son zamanlarda üstün performanslar sergiledi. Buna rağmen pek çok sayıda servis cihazları ve sensörler tarafından üretilen büyük data miktarları, geleneksel tamamlayıcı metal-oksit yarıiletken (CMOS) temelli bilgi işlem sistemlerinde başlıca bir zorluk olan daha küçük, daha hızlı ve düşük enerji tüketen bilgi işlem cihazlarını gerektirmektedir. Ayrıca enerji ve hızdan dolayı von Neumann mimarisi von Neumann tıkanıklığı olarak da bilinen bir problemi ortaya koymaktadır. Tüm bu yaşanan olumsuzluklara hitap etmek için araştırmacılar odak noktalarını tekrardan insan beynine odakladılar ve insan beyninin çalışma mekanizmasından esinlenilmiş donanım ve mimari temelli nöromorfik bilgi işlemi önerdiler. İnsan beyninin öğrenme mekanizmaları tam olarak anlaşılamamasına rağmen, nörobiyolojinin sürekli gelişimi beyin, nöron ve sinapsların çalışma mekanizmalarını açıklamıştır. Bir nöronakledici yoluyla, sinapslar nöronlar arasındaki bağlanmanın derecesine bağlı olarak önceki ve sonraki sinaptik nöronlar arasındaki bağlantıyı güçlendirme ya da zayıflatma yoluyla bilgiyi depolayabilir ve işleyebilirler. Tek biriminde sadece bir tane Boolean data tipini (0 ya da 1) kaydeden geleneksel CMOS temelli bilgi işlem ile karşılaştırıldığında, beyindeki nöral ağlar sinaptik esneklik olarak bilinen sinaptik ağırlığı ayarlayarak tek bir sinapsta çoklu durumları kaydedebilmektedirler. Yeni bilgi işlem sistemlerine tam olarak nöromorfik özellikleri uygulamak için, hafıza hücresi kademeli olarak bilgiyi değiştirmeye gerek duyar. Chua [9], [10] ve HP [11], [12] araştırmacıları tarafından önerilen memristör teknolojisi nöromorfik bilgi işlem sistemlerini gerçekleştirmek için ortaya çıkan bir teknoloji olarak düşünülmektedir ve şekil 1.2' de karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Geleneksel CMOS ile karşılaştırıldığında, memristör biyolojik sinaptik ağırlığa benzeyen kademeli bir şekilde iletkenlik durumlarını değiştirmek için ona imkan tanıyan şekil 1.3' deki gibi akım-voltaj(I-V) eğrisi sergilemektedir. Memristör aynı zamanda geçici direnç durumlarının yerine, kalıcı direnç durumlarını okuyabilen kalıcı hafıza teknolojisidir [13]. Ayrıca bu cihazlar büyük ölçekli çapraz çubuk mimarilerinin

inşasına olanak tanımaktadırlar. Bu mimariler ile memristör teknolojisi insan beyninden esinlenilmiş ve paralel bilgi işlemeye olanak tanıyan nörmorfik bilgi işlemin neredeyse tüm donanım gereksinimlerini karşılayabilmektedir [8], [14], [15], [16].



Şekil 1.3: Memristör cihazının kademeli iletkenlik değişimi [17].

1.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında metal-yalıtkan-metal yapısında metal oksit tabanlı tek hücreli memristör cihazlar üretilip, üretilen cihazların direnç anahtarlama özellikleri araştırıldı. PLD ve Sputter ince film üretim sistemleri kullanılarak tek oksit katmanlı Pt/VO_x/Pt ve iki oksit katmanlı TiN/VO_x/TiO_y/Cu ince film yığın yapısından oluşan iki farklı yapıda memristör cihazlar üretildi. Cihazların oksit katmanlarının farklı kalınlıkları üretilerek oksit katmanların kalınlığına göre cihazların direnç anahtarlama davranışları incelendi. Tek oksit katmanlı cihazda VO_x katmanının kalınlıkları 3,13 ve 25 nm olarak belirlenirken, çift oksit katmanlı cihazda VO_x/TiO_x kalınlıkları ise 15/15 nm olarak belirlenmiştir. Cihaz üretiminde kontak yapıların üretiminde Pt ve Cu kontaklar magnetron püskürtme yöntemi kullanılarak üretilmiştir. TiN kontak üretiminde ise darbeli lazer biriktirme (PLD) yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca VO_x ve TiO_y katmanların üretiminde sadece PLD yöntemi kullanılmıştır. Tüm cihaz üretimleri yüksek vakum koşulları altında gerçekleştirildi. Elektriksel ölçümlerdeki uygun kontak bağlantılarını sağlayabilmek için üretim süresince maske teknolojisinden

yararlanıldı. Cihaz üretimine geçmeden önce öncelikle memristör cihazların çalışma mekanizmasında önemli rol oynayan oksit katmanların üretilmesi ve karakterizasyonları gerçekleştirildi. Bu amaç doğrultusunda VO_x ve TiO_y oksit katmanların yapısal ve elektriksel karakterizasyonları ayrıntılı bir şekilde gerçekleştirildi. Oksit katmanların ince film üretim sistemleri ve karakterizasyon yöntemleri kullanılarak başarılı bir şekilde üretim ve karakterizasyonları yapıldıktan sonra memristör cihaz üretimine geçildi. Üretilen memristör cihazların direnç-anahtarlama davranışlarını incelemek için DC ve AC elektriksel karakterizasyonlar gerçekleştirildi. DC elektriksel ölçüm tekniği kullanılarak üretilen memristör cihazların akım-voltaj davranışları ayrıntılı bir şekilde incelendi. Ayrıca AC ölçümler ile üretilen memristör cihazların direnç-anahtarlama davranışının bir başka çeşidi olan sinaptik performansları ve cihazların çalışma performansını gösteren dayanıklılık özellikleri ayrıntılı bir şekilde karakterize edildi.

2. MEMRİSTÖR VE MEMRİSTİF CİHAZLAR

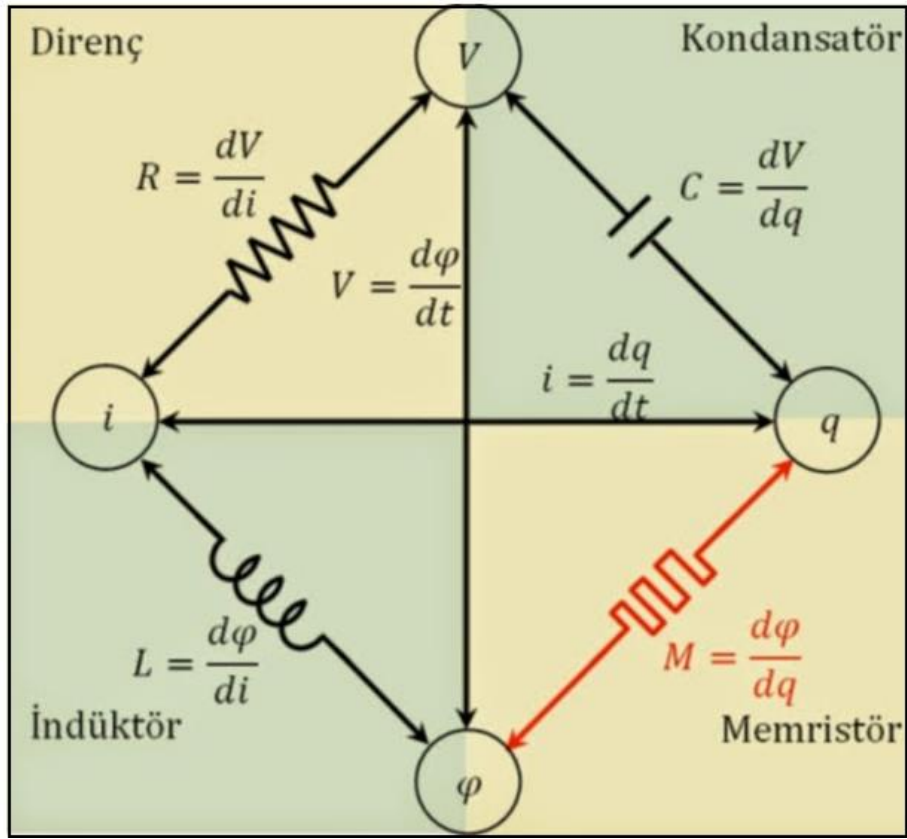
Memristör ve memristif cihazlar geniş bir uygulama alanına sahiptirler . İlk memristör cihazın fiziki üretimi yapıldığından beri araştırmacılar memristör ve onun uygulamaları üzerine pek çok araştırmalar gerçekleştirmiş ve yeni teknolojik fikirler sunmuşlardır.

2.1. Memristörün Temelleri

Memristör teorisi ilk olarak Chua tarafından formülize edilmiş ve isimlendirilmiştir. Chua aynı zamanda memristör kavramını ve onun doğrusal olmayan elektriksel davranışını da ayrıntılı bir şekilde sunmuştur. O memristör kavramında, dört temel değişken arasındaki ilişkiyi tanımlayan ve eksik olan bir katı hal cihazının var olabileceğini öngörmüştü. Ondan ancak yaklaşık kırk yıl sonra 2008 yılında, HP laboratuvarlarındaki bir ekip TiO_2 ince film yapısına dayanan ve direnç-anahtarlama davranışı gösteren bir memristörün geliştirildiğini duyurdu [11].

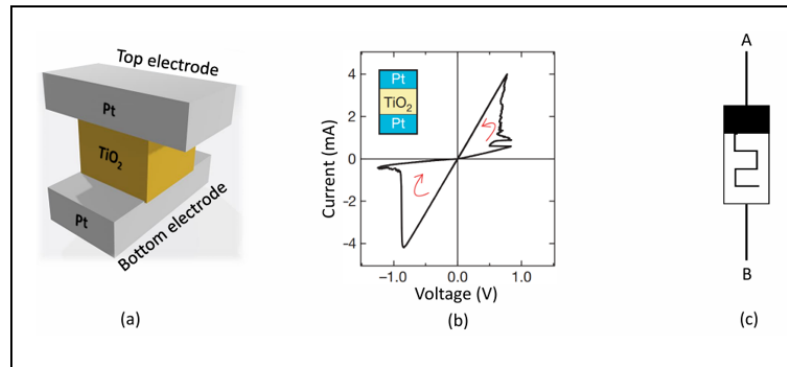
2.1.1. Memristörün Tanımı ve Fiziksel Keşfi

1971’ de Leon Chua temel pasif devre diyagramının akım I , gerilim V , yük q ve manyetik akı Φ olan dört temel değişken üzerine kurulu olduğunu ileri sürdü. Bunlar arasındaki ilişkilerden üçü olan; gerilim ile akım arasındaki direnç, yük ile gerilim arasındaki kapasitör ve manyetik akı ile akım arasındaki indüktör uzunca bir süredir bilinmektedir. Fakat Chua manyetik akı ile yük arasında bir boşluğun olduğunu ve dolayısıyla bunu dolduracak bir cihazın mevcut olması gerektiğini öne sürdü [11], [18], [19]. Şekil 2.1 temel fiziksel değişkenleri, onlar arasındaki bağlantıları ve bu bağlantılardan ortaya çıkan devre elemanlarını göstermektedir.



Şekil 2.1: Temel devre değişkenleri ve onları birbirine bağlayan devre elemanları arasındaki ilişki [10].

Chua, dördüncü pasif cihaz olarak memristörün var olması gerektiğini ve bu cihazın manyetik akı ile yük arasındaki ilişkiyi kuracağını öne sürdü. Memristör cihazının ilk üretimi Williams' ın grubu tarafından Hewlett-Packard (HP) laboratuvarlarında gerçekleştirildi. Üretilen bu cihazın yapısı, Şekil 2.2' de gösterildiği gibi iki platin elektrot arasına yerleştirilmiş stokiometrik TiO_2 ve oksijenden yoksun TiO_{2-x} katmanlardan oluşur [11], [20], [21].



Şekil 2.2: Memristör cihaz a) cihazın yapısı, b) histeris eğirisi, c) sembolü [22].

Elde edilen iki terminalli nano ölçekli bu cihaz, cihazın içinden akan akımın integrali tarafından belirlenen dinamik bir direnç sergiler. Bir memristörün direnci sırasıyla R_{on} ve R_{off} durumlarına denk gelen düşük direnç durumu ve yüksek direnç durumu arasında değiştirilebilir. R_{on} ve R_{off} durumları logic mantık sistemindeki "0" ve "1" değerlerini temsil eder. Bir memristör, üzerine uygulanan güç kaynağı kaldırıldıktan sonra direnç değerini koruma özelliğine sahiptir. Böyle bir durumda en son ulaşılan direnç, herhangi durum yenileme kaynağının yardımı olmadan doğal olarak hafızaya alınır. Böyle bir durum hiç şüpheyle memristör cihazını gelecek nesil kalıcı hafızalar için iyi bir aday haline getiriyor. Williams ve Chua hafızalı tüm dirençli cihazların, cihazın malzemesi ve fiziksel çalışma mekanizmaları ne olursa olsun onların memristör cihaz olarak sınıflandırılabilceğini öne sürdüler. Bu yüzden memristörlerin teorisi, memristör sistemlere genelleştirilmiştir. Bu yüzden tüm memristör cihazlar şekil 2.2' de gösterildiği gibi memristör cihazların parmak izi olarak kabul edilen bir sıkışmış histerisis eğrisi sergiliyorlar. Bu cihazlar şekildeki gibi onları tanımlayıcı bir sembolle gösterilirler. Sahip oldukları çok yönlü tabiatları nedeniyle memristif cihazlar hafıza birimi, mantık tasarımı gibi bilgi işlem fonksiyonlarını ve ara bağlantı düzeyinde birçok görevleri gerçekleştirme kabiliyetine sahiptirler [23], [24], [25].

2.1.2. Memristörün Özellikleri ve Temelleri

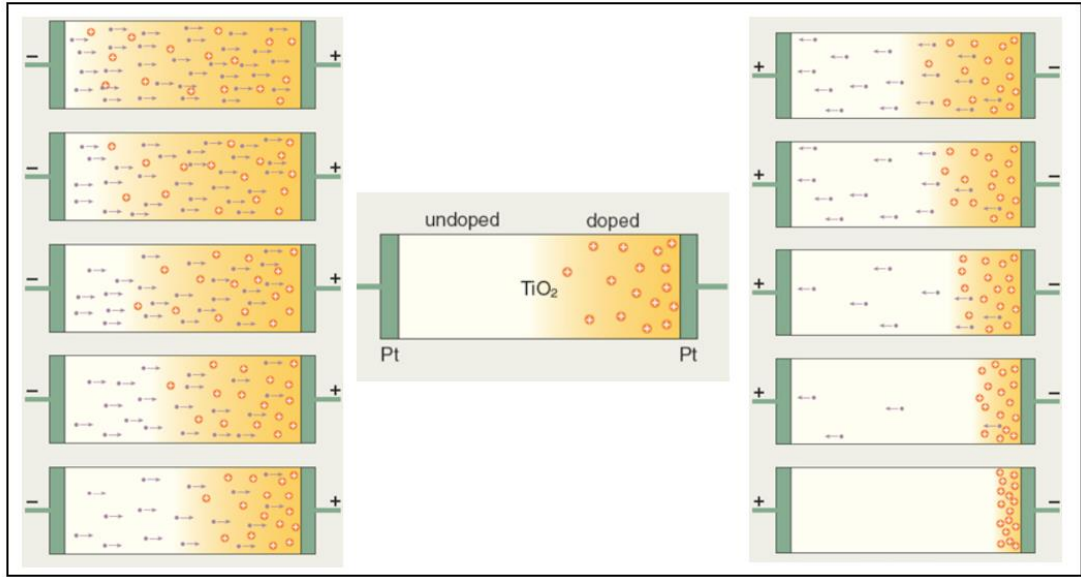
Memristör üzerine uygulanan uyarıcı etkisiyle direnç durumunu yüksek direnç ve düşük direnç durumları arasında değiştirebilen nano ölçekli bir cihazdır. Büyük bir voltaj veya akım sapması uyarıcı etkisi görevi görerek cihazın direncini değiştirebilir. Şekil 2.3' de gösterildiği gibi, memristörün her hangi bir kutbuna uygulanan pozitif bir voltaj uyarımı, cihazın direncini kademeli olarak HRS durumuna doğru değiştirebilir; ya da ters yöndeki bir uyarım, cihazın direncinin LRS durumuna doğru azalmasına neden olabilir. Daha büyük bir uyarım genel olarak dirençteki değişimi hızlandırır. Bu değişiklik, uyarım kaldırıldıktan sonra da korunarak cihazın direnç durumunun saklanması imkanı verir. Literatürde çeşitli hafıza araçları keşfedilmiştir. Bu cihazlar özellikleri bakımından önemli ölçüde farklılık gösterirler. Normalde yüksek anahtarlama hızına, yüksek direnç oranlarına ve yüksek anahtarlama dayanıklılığına sahip cihazlar daha çok tercih edilir [19], [26], [27], [28].



Şekil 2.3: Memristörün değişen direnç durumlarındaki akım değişimi [22].

İlk üretilen Williams memristörü, TiO_2 filmi ile ayrılmış iki metal elektrottan oluşmuştu. Doğal haliyle bu bileşik, elektrik akımının akışına karşı çok yüksek direnç gösteren bir elektriksel yalıtkandır. Memristörde, TiO_2 'nin stokiometrik kısmı bu doğal yalıtkan özelliğini korurken, ancak geri kalan kısımdaki stokiometrik olmayan TiO_{2-x} 'nin yalıtkanlık durumu mevcut oksijen miktarının kısıtlanmasıyla değiştirilebilir. Kristal kafeste ortaya çıkan oksijen boşlukları, akım taşıyabilen hareketli elektronlar sağlayarak malzemenin direncini azaltır. Böyle bir durumda oksijen miktarının az olduğu katman "**katkılı**" olarak düşünülür. Memristörden geçen bir elektrik akımının hem katkılı hem de katkısız bölgelerden geçmesi gerekir ve bu yüzden memristörün direnci iki bölgenin direnç değerlerinin toplamına eşit olur. Bu toplam direnç değeri, katmanların göreceli kalınlığına veya başka bir deyişle aralarındaki sınırın konumuna bağlıdır. Memristöre bu özel durumu veren, bu sınırın hareket edebilmesidir. Memristörün terminallerine bir voltaj uygulandığında, böylece içinden bir akım geçtiğinde, bu sınırın hareketi meydana gelmiş oluyor. Akım, çoğunlukla oksijen boşlukları tarafından serbest kalan elektronlar başta olmak üzere iletkenlik elektronları tarafından taşınır. Elektronlar negatif yüke sahiptirler ve bu nedenle negatif kutup tarafından itilir ve pozitif kutba doğru çekilirler. Elektronlar bu şekilde hareket ederken cihaz içerisinde başka bir hareket daha meydana gelmektedir. Elektrik yüküne sahip olan oksijen boşlukları negatif kutba doğru hareket eden pozitif iyonlar gibi davranırlar. Boşlukların hareketi kristal kafesin fiziksel olarak yeniden düzenlenmesini gerektirdiğinden bu nedenle elektronların akışından çok daha yavaş hareket ederler. Ve bu yüzden oksijen boşluklarının nispeten yavaş sürüklenmesi memristörden akan elektrik akımına önemli bir katkı sağlamıyor. Ama buna rağmen oksijen boşluklarının hareketi katkılı ve katkısız katmanlar arasındaki sınır çizgisini kaydırarak cihazın genel direncini değiştirebiliyor. Uygulanan voltajın kutbuna bağlı

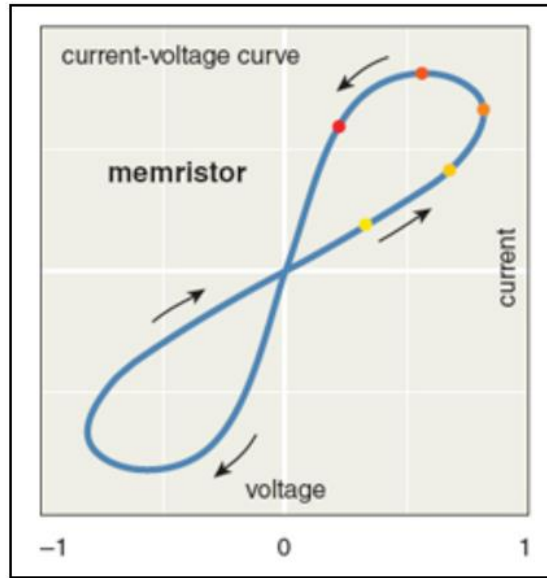
olarak direnç ya artabilir (katkılı bölge daha dar bir katmana sıkıştırılırsa) ya da azalabilir (katkılı bölge toplam kalınlığın daha fazlasını içerecek şekilde genişlerse). Harici voltaj kaldırıldığında ise sınır çizgisi yeni konumunda kalır. Memristöre hafızasını veren, katkılı ve katkısız bölgeler arasındaki sınırın değişmesidir. Basitçe düşük direnç durumunu logic mantık sisteminde "0" olarak ve yüksek direnç durumunu da "1" olarak tanımlayarak meristörün hafıza elemanı gibi çalışması sağlanır. Herhangi bir uygulamada cihazdaki hafıza hücresine bir bit yazmak istediğinizde, memristör cihaza uygun voltaj uyarımının güçlü bir voltaj darbesini uygulayarak direncin yüksek veya düşük değerlere gelmesiyle bu işlemi gerçekleştirebiliriz. Hafızanın kayıtlı durumunu okumak için ise direnci önemli ölçüde değiştirmeden ölçebilen daha düşük bir voltaj veya daha kısa bir darbe kullanarak okuma işlemini gerçekleştirebiliriz. Memristörün dikkate değer bir başka avantajıda onun çok küçük boyutlarda yapılabilmesidir. En azından sadece bir boyutunun (TiO_2 filminin kalınlığı) düşük olması bile memristör cihaz üretmeye olanak sağlamaktadır. Maksimum direncin minimum dirence oranı bu kalınlığın karesiyle ters orantılı olarak değişir. Pratik cihazlarda TiO_2 film kalınlığı 25 veya 30 atom çapı olan 10 nanometre kadar ince olabilir. Önceki kısımlarda belirttiğimiz gibi memristörün kalıcı hafıza sunması da dikkat çekicidir. Cihaz güç kapatıldığında bile hafızasını korumaktadır [29], [30], [31], [32]. Şekil 2.4 memristör cihaza voltaj uygulanmasıyla TiO_2 katman içerisindeki meydana gelen değişimlerin örnek bir temsiliyi göstermektedir. Ortadaki resim voltaj uygulanmadan önceki cihazın durumunu göstermektedir. Soldaki resim cihaza voltaj uygulandığında oksijen boşluklarının pozitif kutuptan negatif kutba ve elektronların ise pozitif kutba sürüklenişini göstermektedir. Sağdaki resim ise voltaj kutbunun değiştirilmesiyle önceki durumda hareket eden oksijen boşlukları ve elektronların ters yönlere hareket ettiklerini göstermektedir. Meydana gelen bu hareket değişimleri katkılı ve katkısız bölgeler arasındaki sınırı değiştirerek cihazın yüksek ve düşük direnç durumları arasında anahtarlanmasını sağlamaktadır.



Şekil 2.4: Memristör cihaza voltaj uygulanmasıyla TiO_2 katman içerisindeki elektronların ve oksijen boşluklarının hareketi [29].

Direnç, kapasitör, indüktör ve memristör gibi cihazları, sinyalleri yükseltebilen ve devrelere güç aktarabilen transistör gibi aktif cihazlardan ayırmak için onları pasif devre elemanları olarak tanımlarız. Ancak memristörün diğer pasif devre elemanlarından çok önemli bir farkı vardır. Memristör doğrusal olmayan bir cihazdır. İdeal bir dirençte akım ve gerilim arasındaki ilişki basit bir orantıya sahiptir ve dolayısıyla bu ilişkinin grafiğinin eğimi direnç değerine eşittir. Fakat ideal bir memristörün eş değer grafiği bir çizgi değil aksine eğimin konumdan konuma değiştiği bir eğridir. Bu yüzden memristör cihazının neden doğrusal olmadığını anlamak kolaydır. Cihaz sabit bir voltaj kaynağına bağlandığında, akım memristörden ileri yönde geçerken (iletken, katkılı katmanı genişliyor) direnç azalır ve dolayısıyla bu daha fazla akımın geçmesine izin verir sonuç olarak direnç daha da azalır. Gerilim kaynağının kutbu ters çevrildiğinde, bu durum ters türde bir davranışa yol açar ve burada artan direnç daha da fazla direnç artışına neden olur [29]. Memristör cihazında katkılı ve katkısız bölgeler arasındaki değişen sınır nedeniyle direnç sabit değildir. Akım başlangıçta voltajdan daha yavaş büyür, daha sonra hızlanır ve voltaj zirveye ulaştıktan sonra bile artmaya devam eder. Döngü orjinde tekrar kapanır. Gerilim sıfır olduğunda akım da sıfırdır. Şekil 2.5’ deki renkli noktalar sistemin akım-gerilim eğrisi boyunca yörüngenin izlenmesine yardımcı olur. Bu noktalar Sinüs dalgasının ilk yarım döngüsüne karşılık gelen beş noktayı tanımlarlar ve dizi sarıdan turuncuya ve sonra kırmızıya doğru ilerler. Cihazın doğrusal olmamasının nedeni cihazın düzgün bir

şekilde değişen voltaja verdiği yanıtın izlenmesiyle açıkça görülebilir. Eğri sıfır volt ve sıfır amperde başlar. Voltaj sürekli olarak arttıkça akım da doğrusal olmayan direnci yansıtan bir hızlanma oranında artar. Daha sonra voltaj maksimuma ulaşp tekrar düşmeye başladıktan sonra TiO_2 filminin direnci hala azalmakta olduğundan akım kısa süreliğine yükselmeye devam eder. Akım nihayet geri çekildiğinde, eğrinin azalışı onun yükseldiği yolu izlemez. Bu yüzden histerisis döngüsü adı verilen bir döngü oluşturur. İki dal orijinde kesiştiğinden memristörün eğrisi sıkışmış bir histerisis döngüsüdür. Bu memristörün bir özelliğidir; voltaj sıfır olduğunda akım da sıfırdır ve bunun tersi de geçerlidir. Bu gerçek, memristörün kısa süreliğine bile olsa enerji depolamadığını gösterir. Histerisis eğrisi dirençler ve memristörler arasında temel bir ayrım yaratır. Bir dirençte akım voltajın basit, tek değerli bir fonksiyonudur; Aynı voltaj her zaman aynı akımı ortaya çıkarır. Bir giriş sinyali tarafından çalıştırılan bir memristörün histerezis eğrisi, aynı voltajın iki farklı akım üretebileceğini ima eder. Hangi değer gözlemlendiği memristörün iç durumuna ve bu iç durumda onun geçmişine bağlıdır. Bu durum memristörün kendi geçmişine ait bir hafızayı muhafaza ettiğini söylemenin başka bir yoludur [10], [29].



Şekil 2.5: Kısık histerisis eğrisi şeklinde memristör cihazının akım-voltaj eğrisi [29].

2.1.3. HP Memristör

HP memristör modelinin memristansı denklem 2.1' deki ilgili formül kullanılarak elde edilir. Burada R_{MEM} memristörün toplam direnç değerini ifade ederken, R_{OFF} memristörün saf TiO_2 kısmının direnç değerini ve R_{ON} ise memristörün katkılanmış kısmının direnç değerini ifade eder. Katkılı TiO_2 kısmının bütün TiO_2 kısmına olan oranı "x" ile ifade edilir ve "0" ile "1" arasında değer alır. Eğer "x" değeri sıfıra eşit olursa $R_{MEM}=R_{OFF}$ olur, "x" değeri 1 olduğunda ise $R_{MEM}=R_{ON}$ olur. "x" değerinin formüsel denklem bağıntısı eşitlik 2.2' de ve memristörün akım voltaj ilişkisi ise denklem 2.3'de verilmiştir. $I(t)$ ' nin değeri memristör cihazı üzerinden geçen akıma denk gelirken $V(t)$ ise giriş kaynağında üretilen voltajı temsil etmektedir. R_{OFF} ve R_{ON} sırasıyla memristör yapısının maksimum ve minimum dirençlerini temsil etmektedir. Durum değişkeni olarak belirlenen $W(t)$ ise oksijence eksik olan TiO_2 katmanın kalınlığını temsil etmektedir. D ise tüm TiO_2 cihazın kalınlığını temsil etmektedir. Durum değişkeni $W(t)$ ' nin zamana göre belirlenebilmesi için $W(t)$ ile oksijen kusurlarının sürüklenme hızı arasında bir bağlantıya ihtiyaç duyulur bu bağlantı denklem 2.4 ile verilir. Bu denklemin integral hesaplaması yapılarak, bulunan yüke göre durum değişkeninin bağıntısı ise denklem 2.5 ile verilir. Burada bulunan yüke göre durum değişkenini yani denklem 2.5' i denklem 2.3 olan memristörün akım voltaj ilişkisinde uygun yere yerleştirirsek $R_{ON} \ll R_{OFF}$ olduğunda cihazın memristansı denklem 2.6 gibi olur [9], [10], [11], [12].

$$R_{MEM}(x) = R_{ON}x + R_{OFF}(1 - x) \quad (2.1)$$

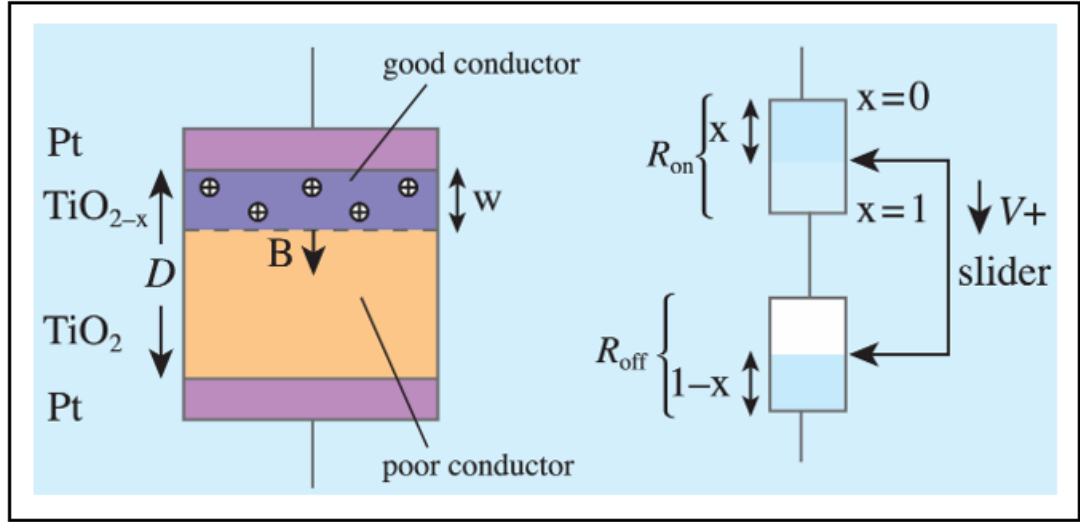
$$x = \frac{W}{D} \quad (2.2)$$

$$V(t) = \left(R_{ON} \frac{W(t)}{D} + R_{OFF} \left(1 - \frac{W(t)}{D} \right) \right) I(t) \quad (2.3)$$

$$V_D = \frac{dW(t)}{dt} = \frac{\mu_D R_{ON}}{D} I(t) \quad (2.4)$$

$$W(t) = \frac{\mu_D R_{ON}}{D} q(t) \quad (2.5)$$

$$M(q) = R_{OFF} \left(1 - \frac{\mu_D R_{ON}}{D^2} q(t) \right) \quad (2.6)$$



Şekil 2.6: HP memristör ve onun eşdeğer devre modeli [19].

2.1.4. Memristörün Uygulamaları

Memristör sinaptik esneklik olarak kullanılabilen kademeli iletkenlik değişimlerine sahiptir. Memristörün bu kademeli iletkenlik değişimleri nöromorfik hesaplama temelli bilgi işlem teknolojisinde kullanılmasını sağlayan en büyük avantajıdır. Memristör teknolojisi memristör biriminin iletkenliğinin kademeli değiştirildiği algoritmalarla matematiksel sinaptik ağırlıkları sağlayabilir. Bu durum etkili bir şekilde kıvrım ve derin nöral ağların performansını geliştirir. Sinaptik ağırlık değişimleri memristörlerdeki iletkenliğin kademeli artışı ve azalışıyla başarılabılır. Sinaptik ağırlık değişimleri aynı zamanda uzun dönem güçlendirme ve uzun dönem çöküntü olarak da bilinirler [33], [34], [35], [36]. İnsan zekâsının dikkat çeken özelliklerinden biri onun yaratıcılığıdır. İnsan bilgi öğrenme temelinde mevcut olmayan yeni nesneleri üretebilir ve aynı zamanda onlardan elde edilmiş sonuçları da öğrenebilir. Memristör tabanlı nöromorfik bilgi işlem sistemleri de, bazı öğrenme algoritmaları kullanarak yeni verileri üretebilmektedir [13], [37]. CMOS temelli yapay nöral ağlar genellikle karmaşık devre mimarileri ve pahalı çip teknolojileri ile üretilirler ve bu yüzden ölçeklenme limiti ve enerji tüketimi gibi problemlerle karşılaşılır. CMOS teknolojisinin ilerisinde teknoloji kullanan nöromorfik bilgi işlem sistemlerinin inşası klasik bilgi işlem mimarisinin zorluklarının üstesinden gelmek için bir çözüm yolu sunmaktadır. Genel olarak sinaptik memristörler ve transistörler gibi farklı cihazların nöromorfik işlevsellikleri taklit etme yeteneğine sahip oldukları

önceden bilinmekteydi. Sinaptik transistörler ile karşılaştırıldığında, memristörler yüksek yoğunluklu tümleşik devre entegrasyonu sunmaktadır ve ayrıca bellekte bilgi işlem için oldukça umut verici aday olarak öne çıkmaktadırlar [7], [38], [39], [40]. İnsan beyninin muazzam işlevselliğinden esinlenilmiş nöromorfik algoritmalar nöral veriyi hesaplamak için vektör-matriks operasyonları gerçekleştirebilir. Vektör-matriks çarpımları ve esnek ayarlanabilir iletkenliği gerçekleştirmek için üstün avantajlara sahip memristör çapraz çubuk mimarisi nöromorfik algoritmaları gerçekleştirmek için en çok ümit vaat eden cihazların başında gelmektedir. Ayrıca memristör çapraz çubuk mimarisi vektör-matriks çarpma operasyonlarını oldukça düşük enerji tüketimi ile gerçekleştirme potansiyeline sahiptir. Dahası nöromorfik bilgi işlem teknolojisini gerçekleştirmek için en kritik basamak olan vektör- matriks çarpma operasyonlarını gerçekleştirme potansiyeline sahip memristör çapraz çubuk mimarisi, uygulanan voltaj atımlarının parametreleri değiştirilerek memristörün iletkenliğinin esnek bir şekilde ayarlanabilmesi avantajıyla çevrim içi öğrenme yeteneğine sahip bilişsel sistemlerin inşası için de büyük potansiyele sahiptir [41], [42], [43], [44], [45].

2.2. Memristör Modelleri

Bir memristörün kalıcı hafıza özelliği ona nöromorfik devrelerden gelişmiş hafıza uygulamalarına kadar çeşitli alanlarda yeni yaklaşımların gerçekleştirilmesine olanak sağlar. Memristör cihazın nanometre ölçeğindeki özelliği mevcut ve geleneksel teknolojilerde bazı durumlarda gerçekleştirilmesi mümkün olmayan veya verimsiz olan uygulamaların yenilikçi devrelerde gerçekleştirilmesi için de yeni bir fırsat yaratıyor. Fakat onun iyonik taşınım ve tünelleme mekanizmasının karmaşıklığı ve memristörün nano ölçekli özelliği gelecekteki devre ve sistemlerin modellenmesi, karakterizasyonu ve simülasyonunda bazı zorluklar ortaya çıkarmaktadır.

2.2.1. Doğrusal Sürüklenme Modeli

Doğrusal sürüklenme modeli ilk fiziksel memristörün üretimini yapan HP firması tarafından geliştirilmiştir. Onların geliştirdikleri bu modelde akım ile voltaj gerilimi arasındaki ilişki katkılı ve katkısız bölgelerin durumuna göre belirlenir.

$$V(t) = R_{MEM}(x)I(t) \quad (2.7)$$

Bu denklemdeki memristör direncinin değişimini denklem 2.8 ile bulabiliriz.

$$R_{MEM}(x) = R_{ON}x + R_{OFF}(1 - x) \quad (2.8)$$

Katkılı TiO₂ kısmının bütün TiO₂ kısmına olan oranı "x" ile ifade edilir ve "0" ile "1" arasında değer alır ve denklem 2.9 ile formülize edilir.

$$x = \frac{W}{D} \quad (2.9)$$

Toplam direnci etkileyen "x" değerinin değişimi ise denklem 2.10 ile formülize edilir.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\mu_D R_{ON}}{D^2} I(t) \quad (2.10)$$

Denklemler içerisindeki I(t) memristör akımına, V(t) memristör üzerindeki gerilime, R_{ON} düşük dirence, R_{OFF} yüksek durumdaki direnci ve μ_D ise elektronların mobilitesine (hareket kabiliyetine) denk gelmektedir. Denklemler memristörün hem uygulanan sinyale hem de uygulanan sinyalin frekansına duyarlı olduğunu göstermektedir [10], [12].

2.2.2. Doğrusal Olmayan Sürüklenme Modeli

Doğrusal olmayan sürüklenme modeli doğrusal sürüklenme modeline göre daha gerçekçidir ve gerçek bir memristörün çalışmasını daha iyi açıklayan bir modeldir. Bu model gerilim ile durum değişkeni arasında lineer olmayan bir ilişkinin olduğunu söylemektedir. Modele göre akım ve gerilim arasındaki ilişki denklem 2.11 ile ve durum değişkeni ise denklem 2.12 ile verilebilir [9], [10], [12].

$$I(t) = W(t)^n \beta \sinh(\alpha V(t)) + X[\exp(YV(t)) - 1] \quad (2.11)$$

$$\frac{dW(t)}{dt} = \alpha f(W)V(t)^m \quad (2.12)$$

2.2.3. Simmons Tünel Bariyer Modeli

Simmons Tünel bariyer modeli HP firmasının ortaya koyduğu modelle benzerlik göstermektedir. Doğrusal ve simetrik olmayan Simmons Tünel bariyer modeli gerçek

fiziksel bir memristörün hareketini çok iyi açıklamaktadır. Bu modelde HP firmasının öne sürdüğü modelden farklı olarak iki ayrı direnç yerine elektronların geçişini sembolize eden bir tane direnç kullanılmıştır. Matematiksel olarak çok karmaşık olan bu model içerisinde herhangi bir pencereleme fonksiyonunu barındırmaz [46].

2.2.4. Eşik Uygulamalı Memristör Modeli

Bu model çeşitli memristif hafıza cihazlarını karakterize etmek için kullanılabilecek esnek ve kullanışlı bir modeldir. Bu model, hafızalı bir cihazın bir akım eşiği ve yüke doğrusal olmayan bir bağımlılığının yanı sıra bir durum değişkenine de bağımlılık sergilemesi gerektiğini öne sürmektedir. Bu model basit, esnek ve geneldir. Bu modelin basitliği simülasyon sürecinin verimliliğini artırır. Model Simmons Tünel bariyer modelinin durum değişkeniyle karşılaştırıldığında yalnızca %0,2' lik bir ortalama hata sergiler. Bu model, pratik memristif cihazlara daha önce önerilen modellerden daha iyi uyum sağlar. Model memristif cihaz tabanlı devre tasarımı için uygundur [46].

2.2.5. Genelleştirilmiş Memristör Modeli

Bu model memristörün üç farklı karakteristiğine göre akım-voltaj davranışını açıklamak için önerilmiştir. Üç farklı memristör karakteristikleri, metal-yalıtkan-metal eklemi, durum değişken hareketi için eşik voltajı ($V_{p,n}$), ve oksijen boşluğu veya katkı iyonları için doğrusal olmayan hız fonksiyonudur. İlk olarak Simmons tarafından önerilen metal-yalıtkan-metal (MIM) eklemlerinde kuantum tünelleme etkisine dayılı akım-voltaj ilişkisine benzer ilişki hiperbolik sinüs fonksiyonu ile ifade edilebilir. Bu ilişkide, hiperbolik sinüs fonksiyonunun doğası gereği belli bir eşik voltajı değerinde memristörün iletkenliğinin artması sonucu akımda artar. Literatürde var olan farklı memristif cihaz karakteristiklerine bakıldığında voltajın pozitif olduğu bölgede memristör cihazın iletkenliğinin voltajın negatif olduğu bölgeye oranla daha fazla olduğu görülmüştür. HP memristör modeli önerilen bütün memristör modelleri için temel olmaktadır. Oksijen boşluğunun fazlaca olduğu iletken bölge (TiO_{2-x}) ile yalıtkan bölge (TiO_2) arasındaki sınırın konumu durum değişkeni olarak isimlendirilmiştir. Uygulanan voltaj ile bu sınır bölgesi hareket eder. Hareket ettikçe memristör cihazın direnci en büyük değerinden en küçük değerine doğru azalır.

Dolayısı ile I-V eğrisinin şekli (özellikle eğimi) durum değişkeni ve dinamiğine bağlıdır. Normalize edilmiş durum değişkeni en büyük direnç değerinde 0, en küçük direnç değerinde 1 değerini alır ve direkt olarak memristör cihazın iletkenliğini belirler. Durum değişkeni $g(V(t))$ ve $f(x(t))$ şeklinde iki fonksiyona bağlıdır. $g(V(t))$ fonksiyonu tamamen bir eşik voltajının uygulanmasından ibarettir ve eşik voltaj değeri aşılmadığı müddetçe durum değişkeninde bir değişikliğin olmadığı anlamına gelir. Bu ilişki literatürde yayınlanan birçok deneysel veride açıkça görülmüştür. Gerçekte düşük iyon mobilitesine sahip memristör cihazlarda durum böyledir ve I-V eğrisinin negatif ve pozitif bölgelerinde iki farklı eşik voltajı önermek deneysel eğrinin fit edilmesinde avantaj sağlamaktadır. Memristör cihazın orta bölgelerinde durum değişkeni neredeyse doğrusal hızlanıp/yavaşlarken, sınır bölgelerinde pozitif yüklü katkı iyonlarının veya oksijen boşluklarının hareketi oldukça zordur. Çünkü sınırda birikmeye başlayan yükler uygulanan elektrik alana ters yönde elektrik alan oluşturur. Bu nedenle $f(x(t))$ fonksiyonu, durum değişkenini belli eşik değerlerin altında değişmediği ancak onun sınıra ulaşıldığında üstel olarak azalmasını sağlar. Genelleştirilmiş memristör modeli fiziksel olarak elektron tünel bariyeri, eşik voltajı ve doğrusal olmayan sürüklenme modelinin hepsini kapsayan genel bir modeldir. I-V eğrisinin şekli metal-yalıtkan-metal yapısındaki kuantum tünelleme etkisinin bir sonucu olan hiperbolik sinüs fonksiyonu ile temsil edilerek Hiperbolik Sinüs Modeli ile birleştirilmiştir. Ayrıca memristör cihazın direncinde belirli bir eşik voltajı aşılmadan hatırı sayılır bir değişikliğin olmaması ise TEAM modeli ile birleştirilmiştir. Cihaz sınırlarına yaklaşıldığında (minimum ve maksimum direnç durumu) durum değişkeni dinamiğinin sonlandırılması ise doğrusal olmayan sürüklenme modeli ile birleştirilmiştir [11], [27], [47], [48].

2.3. Gelişen Kalıcı Hafıza Teknolojileri

Hafıza ve data işleme performansı, bir teknolojinin ölçeklendirilmesinde hız belirleyici olarak değerlendirilmektedir. Kapasite, maliyet, hız, saklama süresi, okuma/yazma dayanıklılığı, aktif güç tüketimi, bekleme gücü, güvenilirlik ve sağlamlık dahil olmak üzere bir dizi performans parametreleri hafıza cihazlarının performansını karakterize eder. Faz değişimli hafıza, manyetik RAM, ferroelektrik RAM, dirençli RAM ve memristör gibi yeni ve gelişmekte olan teknolojiler SRAM ve DRAM' in yerine alternatif olarak düşünülmektedirler [49].

2.3.1. Faz Değişim Hafızası

Faz değişim hafıza (FDH) teknolojisi faz değişim elemanı adı verilen bir yapıya dayanmaktadır. Faz değişim teknolojisi CMOS ile uyumlu bir entegrasyona sahiptir ve bu durum onları ölçeklenebilir bir teknoloji haline getiriyor. Bu hafıza teknolojisi, kompakt diskler gibi yaygın olarak kullanılan optik depolama cihazlarında da bulunabilir. FDH teknolojisinin çalışma mekanizması, malzemenin bir amorf (yüksek dirençli) ve bir kristal (düşük dirençli) fazı olmak üzere iki farklı direncinin değiştirilmesine dayanmaktadır. FDH' ler manyetik RAM' lere kıyasla daha yoğun bir yapı sunar. Fakat, FDH cihazlarının dayanıklılık ve yoğunluk konusunda daha fazla iyileştirmeye ihtiyacı vardır [2].

2.3.2. Manyetik RAM

Bu teknoloji genel olarak manyetik tünelleme mekanizmasına dayanmaktadır. Böyle bir yapıda, ince bir tünelleme dielektriği, örneğin MgO, iki ferromanyetik katman arasına yerleştirilerek yığın bir yapı oluşturulur. Ferromanyetik katmanlardan birinin mıknatıslanması sabit olacak şekilde tasarlanırken, diğer katmanda mıknatıslanma ters çevrilebilir. Bu, iki katmanın mıknatıslanması paralel ise düşük dirençle, ters mıknatıslanma ise yüksek dirençle sonuçlanır. Her ne kadar bu teknoloji FDH ve RRAM' e göre çeşitli potansiyel avantajlar göstermiş olsa da karmaşık yapısı yeni nesil çiplerde ve hafıza cihazlarında potansiyel kullanımını sınırlamaktadır [1], [50].

2.3.3. Dirençli RAM

Direnç değiştirme hafızaları memristör temelli hafıza cihazları olarak kabul edilirler. Aralarında HP, Fujitsu ve Sharp' ın da bulunduğu dünya çapındaki pek çok şirket, bir veya daha fazla memristif (RRAM) malzeme türü üzerinde çalışıyor. Bu cihazların çalışma mekanizmaları basittir. İki mantıksal değer, mantık "1" ve mantık "0", sırasıyla düşük direnç durumuna ve yüksek direnç durumuna denk gelmektedir. Bu sistemde direnç, cihaza bir voltaj uygulanarak değiştirilir. Eğer cihaz iki kutuplu bir yapıya sahip ise, direnç değerinin geri dönmesini sağlamak için cihaza negatif bir voltaj uygulanmalıdır. Fakat eğer tek kutuplu bir cihaz ise iki farklı eşik vardır, dolayısıyla cihazı bir durumdan diğerine geçmeye zorlamak için bu eşiklerin aşılması gerekir. Direnç-RAM (RRAM)' lerdeki temel anahtarlama mekanizması, direnci

değiştirmek için ısı kullanan FDH' lerden farklıdır. Bu nedenle, düşük güç tüketen uygulamalar söz konusu olduğunda FDH' lerdeki güç tüketimi RRAM' lere kıyasla önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. RRAM' ler yüksek yoğunluk, mevcut flash teknolojileriyle karşılaştırıldığında bile nispeten düşük üretim maliyeti, 16 nm flash teknolojisine göre kabul edilebilir dayanıklılık, mimari esneklik, basit ve esnek çapraz çubuk dizisine olanak tanınması ve öğrenme algoritmalarının ve nöromorfik mühendisliğin uygulanmasında önemli bir potansiyele sahip olma gibi üstün avantajlara sahiptir. Ayrıca RRAM, DRAM' in anahtarlama hızı ve flash belleğin hafıza tutma süresiyle karşılaştırılabilirse, evrensel bellek aygıtı ihtiyacına güçlü bir aday olacaktır. Geçiş metal oksitlerindeki (GMO) direnç-anahtarlama, 1964 yılında ince nikel oksit (NiO) filmde keşfedildi. O zamandan beri titanyum dioksit (TiO₂), başta olmak üzere pek çok malzeme üzerinde RRAM özellikleri incelendi. Bu malzemeler tek kutuplu ve iki kutuplu olmak üzere iki tür anahtarlama mekanizması gösterebilirler [2], [32], [51].

2.3.4. Hafıza Teknolojilerinin Gelişimi

Flash bellekler kullanım olarak çok popüler olmalarına rağmen hem yavaş yazma/silme sürelerinden hem de düşük dayanıklılıktan dolayı gelecek zamanlar için bu popülerliklerini sürdürmeleri zor olarak görölmektedir. Flash bellekler ve manyetik RAM' ler oldukça zayıf bir şekilde ölçeklenebilmektedirler. Ayrıca manyetik RAM' ler ve FDH' ler yazma döngüsü sırasında büyük programlama akımlarına ihtiyaç duyarlar ve dolayısıyla bit başına daha fazla enerji tüketirler. Ve bunların voltaj ölçeklendirmesinde daha zor hale gelmektedir. Ancak memristörler, Strukov ve Williams tarafından gösterildiği gibi yazma işlemi süresince voltaj ölçeklendirmesi açısından umut verici sonuçlar gösterdiler [10], [11], [12], [52]. Ve ayrıca memristör çapraz çubuk tabanlı mimarisi yüksek oranda ölçeklenebilmekte ve ultra yüksek yoğunluklu bellekler için umut vaat etmektedir [53], [54].

2.4. Memristör Temelli Nöromorfik Bilgi İşlem

Nöromorfik bilgi işlem insan beyninin karşılaştırma, genelleme, tahmin, karar verme, tanıma ve navigasyon gibi yüksek seviyeli bilişsel görevleri yaklaşık 20 W gibi son derece düşük güç tüketiminde yürütme konusundaki benzersiz yeteneği üzerine inşa

edilmiştir. CMOS tabanlı Boolean bilgi işleminden farklı olarak, beyindeki öğrenme yaygın olarak sinaptik esneklik olarak bilinen ve sinapsların nöronları birbirine bağlarken onların yeniden yapılandırılması yoluyla meydana gelir. İnsan oğlunun beynindeki bilgi alışverişi ve işlemenin olay odaklı olması dolayısıyla enerjinin yalnızca ihtiyaç duyulduğu zaman ve yerde tüketilmesi ona düşük güç tüketimiyle öğrenme yeteneği sağlamaktadır. Ayrıca nöron ve sinapsların, her bir nöronun ortalama 10^4 nörona bağlı olduğu aynı ve yüksek düzeyde birbirine bağlı sinir ağı içinde birlikte bulunmalarında bu enerji verimliliğine olağan üstü katkı sağlamaktadır. Bu olağan üstü sinir ağı nöron/sinaps ortak yerleşiminin, sinaptik uyarım ve nöron ateşlemesinden oluşan veri işlemenin ve ayrıca sinaptik ağırlık ve nöron eşiklerinden oluşan hafızanın beyinde aynı yerde meydana geldiğini işaret eder [55].

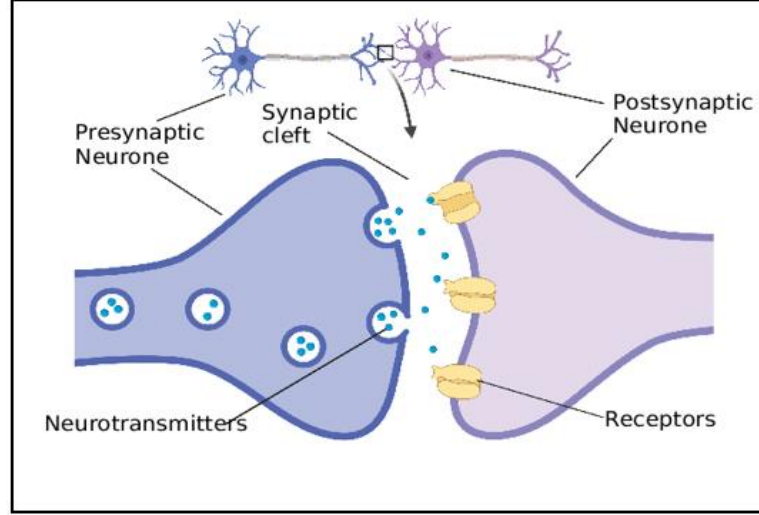
2.4.1. Nöromorfik Bilgi İşlem

Kelime anlamı sinir yapısı mühendisliği anlamına gelen nöromorfik bilgi işlem verileri alternatif olarak depolamak, işlemek ve hesaplamak için biyolojik beyinden ilham alır. Biyolojik sinir sisteminde verilerin depolanması ve işlenmesi sinapslar aracılığıyla nöronların birbirlerine paralel bilgi göndermesiyle gerçekleşir.



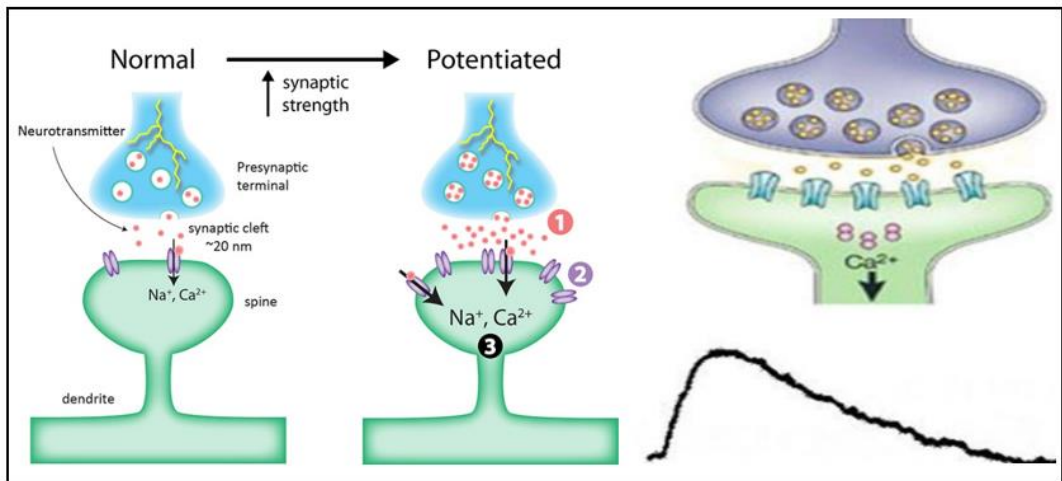
Şekil 2.7: Biyolojik sinir sistemindeki nöronların bağlantısı [56].

Bu süreç hesaplamalar için kısa vadeli davranışlara, öğrenme ve hafıza için ise uzun vadeli davranışlara sahip olan sinapslardan meydana gelir. Sinaptik bağlantının gücü veya ağırlığı, bilginin bir sonraki nörona ne kadar iyi aktarılacağını belirler [57], [58].



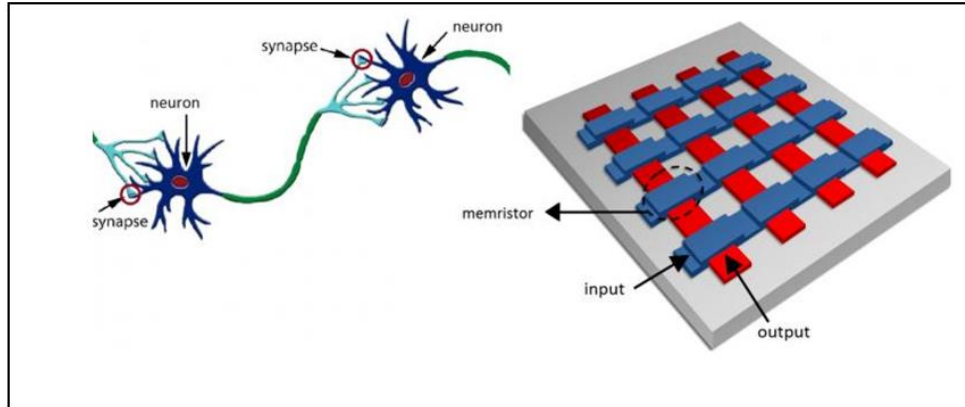
Şekil 2.8: Sinaps yoluyla iki nöronun bağlanması [59].

Sinapslar bağlanma güçlerini değiştirme yeteneğine sahiptirler, bu durum onlara bir hafıza bileşeni olarak uzun vadeli davranışa sahip olmalarını sağlar. Bu nedenle biyolojik beynin paralel yapısı değişken bağlantı ağırlıklarına sahip verileri son derece hassas ve verimli bir şekilde hesaplayabilir.



Şekil 2.9: Sinaptik bağlantı gücünün değişmesi [59].

Nöromorfik bilgi işlemde, analog elektronik cihazlarla elektrik devrelerinin modellenmesi ve kurulması yoluyla biyolojik beyin ile benzer işlevsellikler oluşturulmaya çalışılmaktadır. Bu işlevsellikler analog veri işleme, paralel bilgi işleme veya artışa dayalı bilgi hesaplama gibi farklı yaklaşımlara sahip olabilir. Nöromorfik bilişimdeki insan beynine en önemli benzeme süreci, sinaps ve nöronlarınkine benzer bellek davranışına sahip elektronik malzeme ve cihazlarla veri depolama ve bilgi işlemenin birlikte aynı yerde yapılmasıdır. Uzun vadeli sinaptik davranışı taklit etmek için geçmiş durumunun bir fonksiyonu olarak değişken direnç sahip elektronik cihazlara ihtiyaç vardır. Bu özelliklere sahip malzemelere memristör adı verilir. Onların bir elektrik darbesine verdikleri karmaşık değişken tepkiler, onların yapay sinapslar olarak hafıza elemanları veya değişken sinaptik ağırlıklar ile işlemciler olarak kullanılmalarına olanak tanır. Memristörlerin elektronik devrelere entegrasyonu yoluyla, onlar sinapsların biyolojik bir sistemde sahip olduğu ağırlıkları taklit edebilirler ve bunları analog bir sinyal oluşturmak için kullanabilirler. Birden fazla bağlı memristörler birlikte bir yapay nöron dizisine yerleştirilerek bir elektrik giriş sinyali üzerinde paralel bellek ve bilgi işlem elde edilebilir [31], [60], [61].



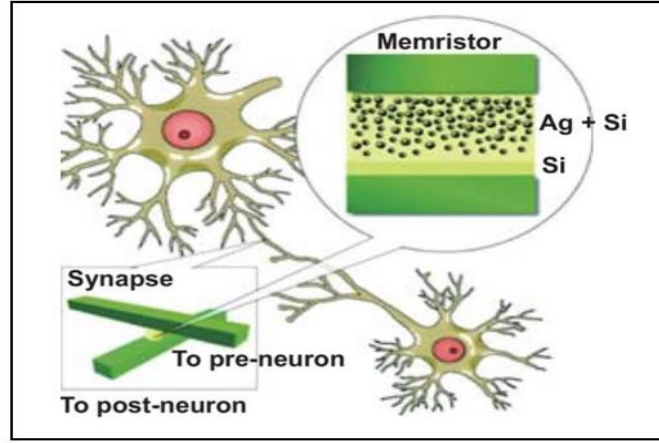
Şekil 2.10: Birden fazla nöronun bağlantılı olduğu çapraz çubuk mimarisi [62].

2.4.2. Yapay Sinaps Olarak Memristör

Öğrenme ve bilgi işlem için insan beynini taklit eden sistemler genellikle insan beyninin sinir ağındaki sinapsların esnekliğinden yararlanır. Her sinaps, önceki-sinaptik uç, sonraki-sinaptik uç ve iki uç arasındaki sinaptik aralıktan oluşur. Sinaps, nöronların işlevsel olarak bağlandığı yerdir ve bilgi iletiminin anahtar bileşenidir.

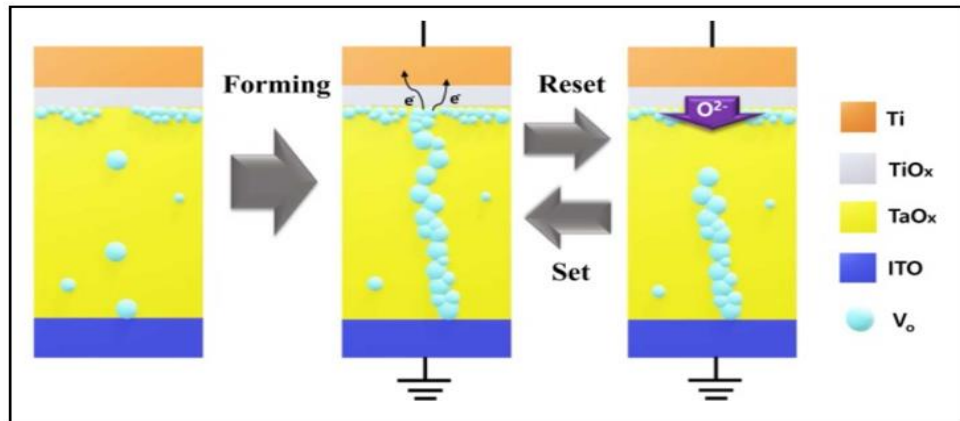
Önceki ve sonraki nöronların bağlantısını sağlayan sinapslar bağlanma güçlerini değiştirme yeteneğine sahiptirler. Bu bağlantı gücünü değiştirme sürecine sinaptik esneklik denir ve insan sinir ağında bilgi aktarımında kritik bir rol oynar. Sinaptik esneklik, nöronlar arasındaki bağlantı gücündeki deneyime bağlı bir değişimdir. Bu esneklik, dış darbelerin şekline bağlı olarak farklı türlerde meydana gelir. Kısa süreli güçlendirme ve çöküntü (STP/STD), uzun süreli güçlendirme ve çöküntü (LTP/LTD), ani artış zamanlamasına bağlı esneklik (STDP) ve eşleştirilmiş darbe kolaylaştırma (PPF) farklı türdeki sinaptik esnekliklerdir. Kısa süreli esnekliklerin genel olarak dış sinyallerin insan beyni tarafından tanınması ve işlenmesiyle ilgili olduğuna inanılmaktadır. Bu tür sinaptik esneklik temel olarak nöronlardaki biyokimyasal değişikliklere dayanır ve burada tanınan bilgiler kolayca unutulur. Uzun dönem esneklik insan beyninin öğrenmesi ve hafızasıyla ilgilidir. Bu tip sinaptik esneklik genellikle yapı ve gen ifadesindeki değişiklikleri içerir. Kısa süreli güçlenme ve çöküntüden uzun süreli güçlenmeye ve çöküntüye geçiş, insan beyninde hafızanın gerçekleşmesini sağlayan sürekli dış darbeler kullanılarak sinapsın uyarılmasıyla gerçekleşebilir. Ani artış zamanlamasına bağlı esneklik, sinapsın önceki-sinaptik ve sonraki-sinaptik uçlarına gelen harici sinyal uyarımlarının sırasına ve aralığına bağlıdır. Her iki uca gelen sinyallerin zaman sırası değiştiğinde, sinaps ağırlığı güçlenmeden çöküntüye ya da tersine dönüşebilir. Ani artış zamanlamasına bağlı esneklik, Hebbian teorisinin en önemli öğrenme mekanizması olarak kabul edilir ve bilgi kodlama, öğrenme ve hafızada önemli bir rol oynar. Bilginin beyin sinir ağındaki nöronlar arasında sinapslar aracılığıyla iletildiği göz önüne alındığında, sinaptik işlevleri taklit eden sinaptik cihazların yapımı yapay nöral ağların gelişimi için çok önemlidir [63]. Bu cihazların sinaptik davranışları biyolojik beyinin sinaptik davranışlarına benzer. Sinaptik cihaz harici bir uyarı aldığında sinaptik ağırlık değişecektir ancak hemen başlangıç durumuna dönmeyecektir. Fakat sinaps cihazı sürekli olarak uyarıldığında, sinaptik ağırlığı sürekli olarak değişecek ve hafızaya alınabilecek bir etki gösterecektir. Bu nedenle çeşitli işlevsel malzeme tabanlı hafızalı sistemlerin özelliklerine dayanarak sinaptik cihazlar inşa edilmiş ve dış uyarım sinyallerine yanıt olarak sinaptik davranışlar incelenmiştir. Bu dış uyarım sinyalleri temel olarak, bu malzeme bazlı cihazların fiziksel özelliklerinin düzenlenmesinde ve dolayısıyla sinaptik fonksiyonların taklit edilmesinde birçok avantaj sergileyen elektriksel ve optik darbelere dayanır. Farklı sinaptik cihazlar farklı mekanizmalara göre sınıflandırılabilir. Örneğin, çalışma mekanizmasına bağlı olarak, bazı sinaptik

cihazlar iyon göçü, ferroelektrik, faz değişimi, yük yakalama ve bırakma ve redoks mekanizmalı sinaptik cihazlardır. Bu mekanizmaları sağlayan malzemeler arasında metal oksitler, yarı iletkenler, faz değiştiren malzemeler ve perovskitler bulunur. Yapı türlerine göre sinaptik cihazlar iki terminalli ve transistör tipi sinaptik cihazlar olarak ayrılabilir [33], [36], [63], [64]. İki terminalli sinaptik cihazlar kolayca entegre edilebilirken, transistör tipi sinaptik cihazların entegre edilmesi zordur ancak giriş voltajları aracılığıyla elektriksel davranışları iyi bir şekilde düzenleyebilirler. Sinaptik cihazlar uyarılma türlerine bağlı olarak temel olarak elektriksel olarak uyarılan ve optik olarak uyarılan sinaptik cihazlar olarak ikiye ayrılırlar. Elektrikle uyarılan sinaptik cihazlar çeşitli sinaptik fonksiyonların taklit edilmesini gerçekleştirmek için esas olarak elektrik darbelerini uyarıcı sinyaller olarak kullanır. Onların iletkenlikleri yani sinaptik ağırlıkları, uyarıcı darbenin genişliği, genliği, frekansı ve sayısı gibi parametrelerle değiştirilebilir. İdeal elektrikle uyarılan sinaptik cihazların, sinaptik ağırlık değişiklikleri konusunda hafızaya sahip olması beklenir. Bu nedenle, sinaptik cihazların tasarımı ve hazırlanmasında, değişen direnç durumlarını ezberleyebilen bir cihaz yapısı dikkate alınmalıdır. Memristör bir direnç- anahtarlama özelliği gösteren hafıza elemanıdır. Memristör harici elektrik darbeleriyle uyarıldığında direnç durumu farklı mekanizmalara göre değişir. Elektrik uyarımı geri çekildiğinde direnç değerini korur ve böylece hafıza etkisi gerçekleşir. Bu davranış biyolojik sinapsların hafıza fonksiyonuna oldukça benzer. Memristörlerin ortaya çıkışından bu yana, araştırmacılar bunları biyolojik sinaptik fonksiyonları taklit etmek için sinaptik cihazlar olarak kullandılar. Sinaptik cihazlar alanında elektrikli hafıza sistemlerinin uygulanmasına ilişkin mevcut araştırmalar temel olarak iyon göçü, ferroelektrik, faz değişimi, ve taşıyıcı yakalama ve bırakma türlerini içermektedir [51], [63], [65], [66].



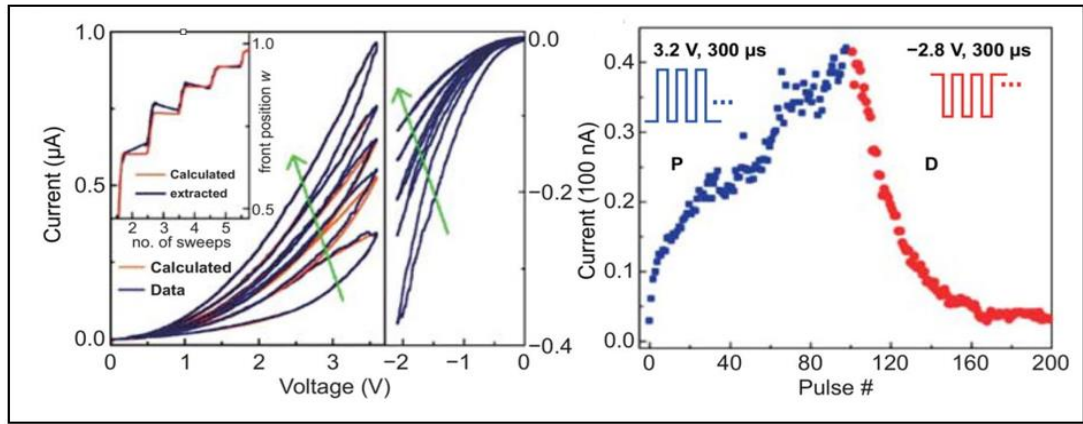
Şekil 2.11: İyon göçü yoluyla memristör cihazın sinaptik esnekliği taklit etmesi [67].

İyon geçişi tipi memristörlerde, metal iyonlarının veya oksijen boşluklarının hareketini tetiklemek için harici elektrik darbeleri kullanır ve bu da iletken filamentlerin oluşumuna yol açar. Ters elektrik darbelerinin uygulanmasıyla metal iyonları veya oksijen boşlukları ters yönde hareket eder ve ilk durumda oluşmuş olan filament kırılır. Filament oluşumu yoluyla elektriksel iletkenlikte meydana gelen bu değişim biyolojik sinaptik fonksiyonları taklit etmek için kullanılmaktadır. Benzer şekilde oksit bazlı memristörlerde de elektrik darbeleri yoluyla oksijen boşluklarının hareketi düzenlenerek sinaptik fonksiyonları taklit etmek için iletken filamentlerin oluşumu ve kırılması sağlanır. Son yıllarda bu oksit bazlı memristörler büyük ilgi görmüştür. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile harici elektrik darbeleri uyarımı yoluyla cihazdaki oksijen boşluklarının düzenlenmesi, ve filamentlerin oluşumu ve kopması sağlanarak sinaptik işlevler başarıyla taklit edilmiştir [68], [69].



Şekil 2.12: Oksijen boşluklarının filament oluşturmaları yoluyla memristör cihazın sinaptik esnekliği taklit etmesi [70].

Memristör cihazına pozitif voltaj uygulanarak akımlarda kademeli bir artış meydana geldiğinde bu durum "SET" işlemi olarak bilinen cihazlarda yüksek direnç durumundan (HRS) düşük direnç durumuna (LRS) geçişe neden olur. Bu değişiklikler, cihazın başlangıçta yüksek direnç durumunda olduğunu göstermektedir. Bunun tersine negatif voltaj uygulanarak akımlarda kademeli bir azalma meydana geldiğinde "SET" işleminin tersi olan "RESET" işlemi gerçekleşmiş olur. Yani cihazın direnci düşük dirençten tekrar yüksek dirence doğru değişmiş olur [2], [37].

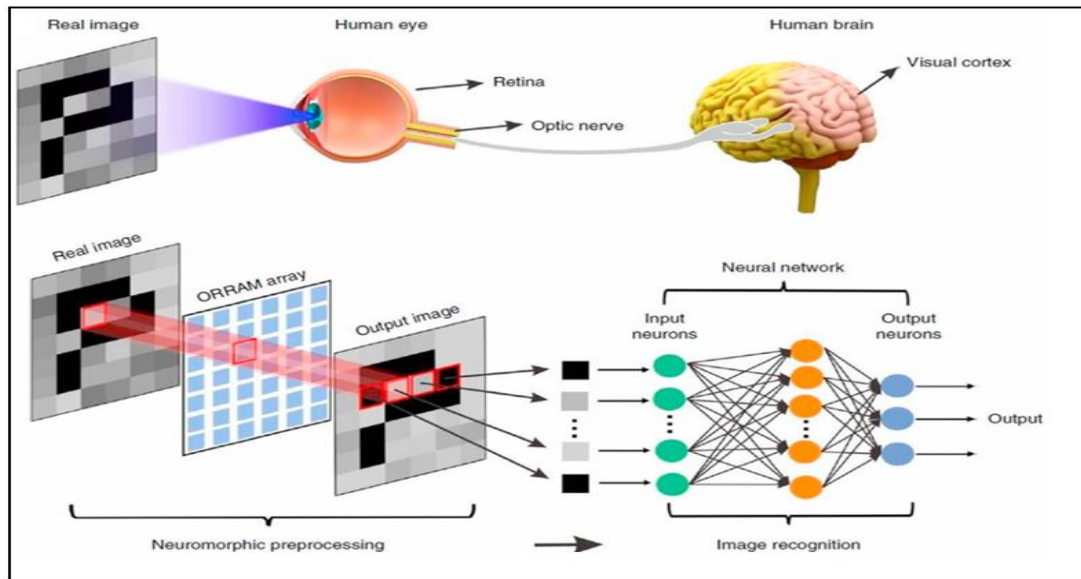


Şekil 2.13: Elektrik uyarımlarına memristör cihazının sinaptik esnekliği taklit ederek yanıt vermesi [67].

2.4.3. Yapay Nöral Ağlarda Memristör

Yapay nöronlar genellikle yapay sinir ağları olarak bilinen ağ yapıları halinde düzenlenir ve genellikle üç bileşenden oluşurlar. İlki, harici giriş sinyallerini alan ve bunları ağa besleyen giriş katmanıdır. İkincisi, ağın iç durumunu oluşturan ve dış bağlantısı olmayan gizli nöronlardan oluşan gizli katmandır. Son olarak, gizli katmandan çıktı alan ve bunu dışarıya doğru besleyen çıktı katmanıdır. Genellikle w ile gösterilen her nöron birleşimi arasındaki sinapslar bu sinaps boyunca bağlantı gücünü önceden tanımlayan kendileriyle ilişkili bireysel bir sinaptik ağırlığa sahiptirler. Yapay nöral ağlar, sinaptik ağırlıkların değiştirilmesi yoluyla çeşitli hesaplama görevlerini yerine getirmek üzere eğitilebilirler. Eğitim yöntemleri denetimli, denetimsiz veya pekiştirmeli olabilir. Denetimsiz öğrenme ağı kendi sinaptik ağırlıklarını belirlemeye bırakır, denetimli öğrenme ise eğitim için çeşitli algoritmalar kullanır. Denetimli eğitim algoritmaları, sinaptik ağırlıkları değiştirerek

ağ çıktısı ile önceden tanımlanmış bir hedef çıktı arasındaki farkı en aza indirmeye çalışır. Güçlendirme eğitimi, sistemin sayısal bir ödül sinyalini en üst düzeye çıkarmaya çalıştığı bir deneme yanılma yaklaşımını takip eder. İstenilen ağ eylemleri ödülü artırır, istenmeyen eylemler ise azaltır. Yapay nöral ağlar çeşitli ağ kategorilerine ayrılmıştır. İki önemli örneği vardır, ileri beslemeli sinir ağları ve tekrarlayan sinir ağları. İleri beslemeli sinir ağları, katmanlar arasında döngü veya döngüsel bağlantı olmaksızın tek bir ileri yönde yayılan sinaptik bağlantılar içerir. Tekrarlayan sinir ağları ise tek bir nörondan kendisine bile tekrarlayan bağlantılı bir ağ içinde döngüler oluşturabilir. Memristörler 10 nm' nin altındaki boyutlara kadar ölçeklendirilebilir, hafızasını yıllarca koruyabilir ve nanosaniye zaman ölçekleriyle anahtarlanabilirler. Bu tür özellikler, etkin yapay sinir ağlarının uygulanması için oldukça önemlidir. Yapay sinir ağlarının inşası, kalıcı hafıza, nöromorfik bilgi işlem ve insan beyninden esinlenilmiş bilgi işlem gibi uygulamalara memristörlerin uygunluğundan dolayı son yıllarda memristör etrafında yoğun araştırma yapıldı. Memristörlerin sahip oldukları bir diğer ilginç özellik ise, çapraz çubuk dizisi mimarisi olarak adlandırılan ve bir matris yapısında düzenlenmelerinden meydana gelen mimaridir. Bu çapraz çubuk dizisi mimarisi çok yüksek bir yoğunluğa sahip olabilmektedirler. Bu mimariler kullanılarak çok katmanlı sinir ağlarının inşası ve eğitimi ile başta model tanıma olmak üzere pek çok ileri seviyeli yapay nöral ağ uygulamaları başarı ile gerçekleştirilmiştir [8], [71], [72], [73].



Şekil 2.14: Memristör çapraz çubuk dizisi mimarisiyle gerçekleştirilmiş yapay nöral ağ uygulaması [74].

3. MALZEME VE METOT

Malzemeler ve özellikleri nanometre ölçekli cihazların işlevselliği üzerinde güçlü etkiye sahiptir. Farklı malzemeler kullanılarak farklı özellikler elde edilebilir. Bu yüzden memristif materyalleri tanımak ve onların kendi özgün yapılarından kaynaklanan direnç- anahtarlama davranışlarını bilmek geliştirilecek memristör cihazlar üzerinde olumlu etki sağlayacaktır. Malzeme özelliklerini bilmenin yanı sıra kullanılacak teknik ve yöntemlerin iyi bir şekilde bilinmesi cihaz üretim ve karakterizasyonunda ve özellikle cihaz performansının geliştirilmesinde şüphesiz önemli katkı sağlayacaktır.

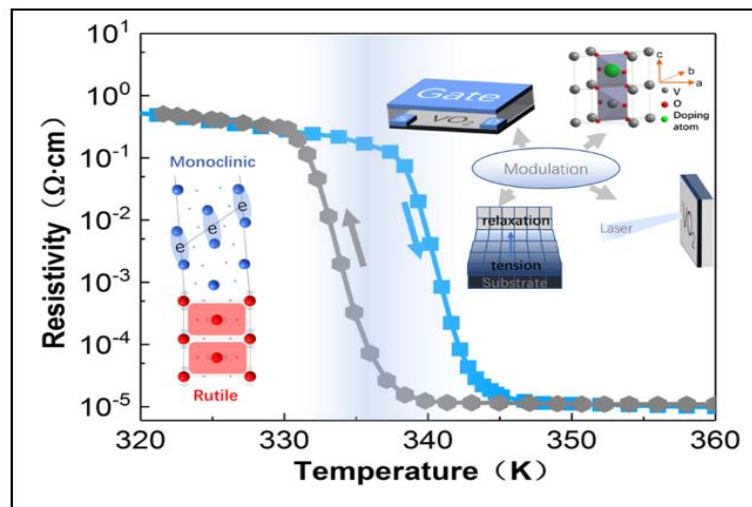
3.1. Materyaller

Al_2O_3 , NiO , TiO_2 , TiO_x , VO_x , TaO_x , CuO_x , ZnO ve ZnO_2 gibi oksitler sürekli olarak değişen farklı kalınlıklarda direnç-anahtarlama memristör cihazlarda fonksiyonel katman olarak kullanılmaktadırlar. Direnç-anahtarlamanın en iyi işlevsel mekanizmalarını elde etmek için farklı malzemeler üzerine ve malzeme mühendisliği konusunda derinlemesine bilgi sahibi olmak gerekmektedir. Direnç-anahtarlamanın anahtarlama optimizasyonu temel olarak geçiş metali oksit malzemesinin optimize edilmesine dayanmaktadır. Çünkü metal oksit malzemenin yüksek iyonik iletkenlik, çoklu-kararlı oksidasyon durumları, basit ve imalat dostu malzeme olma, yüksek Schottky bariyer yüksekliği ve yüksek sıcaklıklarda güvenilirlik gibi arzu edilen özellikleri bu yapılar kullanılarak üretilen cihazların direnç-anahtarlama davranışını etkileyen önemli etkenlerdir [41], [75].

3.1.1. VO_2

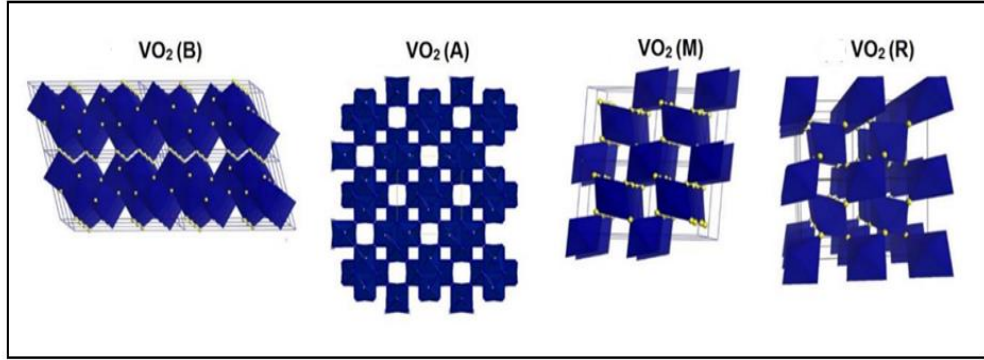
VO_2 son yıllarda yoğun araştırma ilgisi almış oksit malzemelerden biridir. Çünkü bu yapı yaklaşık 67°C civarındaki bir sıcaklıkta monoklinik $\text{VO}_2[\text{VO}_2(\text{M})]$ ve tetragonal rutil $\text{VO}_2[\text{VO}_2(\text{R})]$ arasında tersinebilir ve oldukça hızlı faz geçişine sahiptir. Bu faz geçişi yarıiletken yapıdan metalik yapıya ya da yalıtkan yapıdan metalik yapıya geçiş şeklinde gerçekleşmektedir [76]. 1959 yılında Morin bulk VO_2 için bu yarıiletken-metal geçişini yaklaşık 67°C civarında keşfetti ve bu yapısal geçiş optiksel ve elektriksel özelliklerde keskin değişimlere yol açmıştır. Sonuç olarak elektriksel ve

optiksel özelliklerdeki bu değişimler pek çok uygulama için potansiyel etki oluşturmaktadır [77]. VO_2 'nin elektriksel ve optiksel özellikleri yapısal olarak sahip olduğu faz geçişi davranışı yoluyla anahtarlanabilmektedir. Dahası bu yarıiletken-metal geçişi katkılama, oksijen boşluğu, harici elektrik alan uygulama gibi faktörlerle modifiye edilerek yeni teknolojik uygulamalar için alternatifler sunmaktadır. Bu yüzden VO_2 yapılar akıllı pencereler, iki kutuplu elektronik cihazlar, elektrik alan etkili üç kutuplu cihazlar, bütünleşmiş optik cihazlar ve gaz sensörleri gibi birçok uygulama için oldukça önemlidirler [76]. VO_2 üzerine yapılan deneysel araştırmalarda, faz geçişi sırasında meydana gelen hacimsel değişim bulk boyuttaki VO_2 yapılar için uygulama ve teknoloji alanlarında olumsuz bir durum olarak ortaya çıkmaktadır. Fakat bulk boyutta gözlemlenen bu hacimsel değişim ince film yapılarda gözlemlenmemiştir. Bu yüzden tüm gayret ve çabalar VO_2 'nin yüksek kaliteli ince filmlerinin hazırlanmasına ve karakterizasyonuna adanmıştır. VO_2 faz geçişinin yanı sıra yapısal olarak başka bir eşsiz özelliğe daha sahiptir. Bu yapı farklı polimorfik yapılar sergileyebiliyor. Şu ana kadar VO_2 'nin dört farklı faz yapısına sahip olduğu bilinmektedir. Bu yüzden bazı durumlarda VO_2 ince filmleri elde etmek zor olabilmektedir. Çözüm yolu olarak büyütme sonrası ısı işlemler ile VO_2 ince filmleri elde etmek için ara yüzey indirgenme aşaması kullanılabilir [77]. Ayrıca VO_2 ince filmleri elde etmek vanadyum metalinin geniş oksidasyon durumundan dolayı zor olabilmektedir. Çünkü vanadyum VO , VO_2 , V_6O_{13} , V_4O_9 , V_3O_7 , V_2O_5 gibi bazı ikili oksitleri oluşturan oksidasyon durumlarının (+3'den +5 kadar) geniş çeşitliliğine sahiptir.



Şekil 3.1: VO_2 'nin sıcaklık ile faz değişim mekanizması [78].

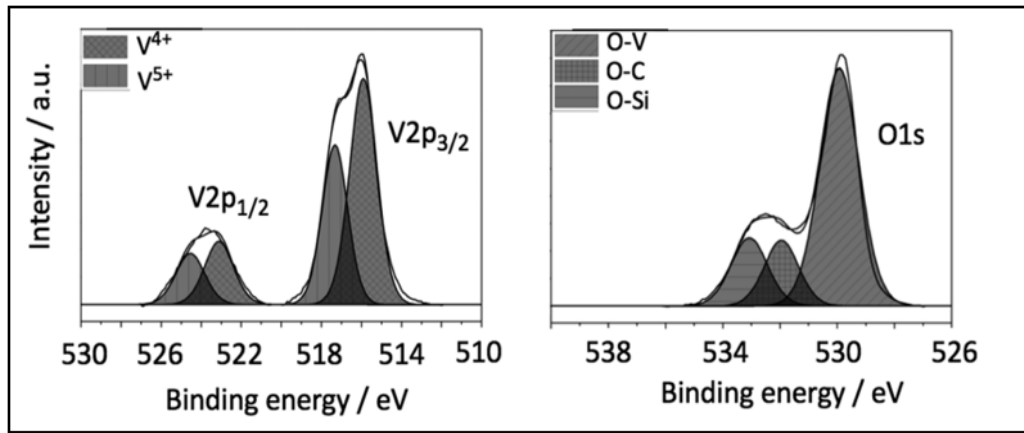
Üretim aşamasındaki zorluklarına rağmen vanadyum temelli oksitler ve onların ilgili bileşikleri elektronik ve optoelektronik uygulamalar için yaygın bir şekilde incelenmektedirler. Vanadyumun oksit bileşikleri arasından, özellikle VO_2 hafıza amaçlı elektronik cihazlar için çok uygundur. Çünkü diğer oksitlere göre görece düşük sıcaklıktaki metal- yalıtkan faz geçişine sahiptir. Günümüze kadar vanadyum metalinin çeşitli formlarının ondan fazla çeşidi bildirilmiştir. Bunlar arasında monoklinik $\text{VO}_2(\text{B})$, tetragonal $\text{VO}_2(\text{A})$, tetragonal-rutil tipi $\text{VO}_2(\text{R})$ ve monoklinik rutil $\text{VO}_2(\text{M})$ VO_2 ' nin farklı formlarıdır. Özellikle rutil tipi $\text{VO}_2(\text{R})$ en kararlı VO_2 yapısı olarak bilinirken, monoklinik $\text{VO}_2(\text{B})$ ise düşük sıcaklıkta çok hızlı ve tersinir metal- yalıtkan geçişi sergilemesiyle bilinmektedir. $\text{VO}_2(\text{B})$ ve $\text{VO}_2(\text{A})$ ise yarı kararlı yapıda olup nano ölçekli uygulamalarda yüksek potansiyele sahip olduklarından yoğun ilgi almaktadırlar [79] VO_2 oldukça yaygın bir şekilde incelenmesine rağmen gerek vanadyumun çeşitli oksidasyon durumları ve de VO_2 ' nin farklı polimorfik yapılarından dolayı karmaşasındaki ve ayırt edilmesindeki zorlukları sürdürmektedir. Bu zorluğun üstesinden gelmek için vanadyumun oksijen ile oluşturduğu bağ yapısının ve kimyasal durumunun iyi bilinmesi ve tam anlaşılması gerekmektedir [80].



Şekil 3.2: VO_2 ' nin farklı kristal faz yapıları [79].

Sol-gel, elektron-ışın buharlaştırma, püskürtme, darbeleri lazer biriktirme, moleküler ışın epitaksisi, kimyasal buhar biriktirme ve atomik katman biriktirme gibi çeşitli yöntemler VO_2 ince filmleri hazırlamak için kullanılmıştır [76]. Bu yöntemler arasından darbeleri lazer biriktirme yöntemi hedef materyalden altaşa stokiyometrik transfer sağlayarakdan materyallerin üretilmesi için çok önemli avantaj sağlamaktadır. Bu yöntem ayrıca hedef malzeme üzerine odaklanmış yüksek enerjili lazer ışınını kullanarakdan altaşa doğru yüksek yönelimli plazma bulutunun oluşmasını sağlar, bu

durum yüksek kaliteli ince filmleri elde etmek için çok önemlidir. Bu yöntem ile hedef malzemesi olarak hem vanadyum metali hem de vanadyum oksitler (V_2O_3 , V_2O_5 ve VO_2 gibi) kullanılarak VO_2 ince film yapıları elde etmek yine bu sistemin diğer avantajlarındandır. Literatürde yapılan birçok çalışmada saf VO_2 ince filmleri elde etmek için ayrıca büyütme sonrası ısıt işlemler uygulandığı bildirilmiştir [81]. VO_2 üzerine gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, üretilen ince filmlerin kimyasal yapıları ve oksidasyon durumları genellikle X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) yöntemi ile incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda, $V_{2p_{3/2}}$ çekirdek seviyesi piki genelde yüzeyde V^{+4} ve V^{+5} olarak vanadyumun iki oksidasyon durumunu göstermiştir. Bunların bağlanma enerjileri genel olarak 515.9 ve 517.3 eV seviyelerine denk gelmektedir. V^{+4} ün V^{+5} e göre görece yüksek miktarı oluşan filmlerin iyi kimyasal yapıda olduğunu bildirmektedir [80]. VO_2 üzerine yapılan XPS sonuçları kapsamlı incelendiğinde yaklaşık olarak 529.9 eV' ye denk gelen O1s sinyali V-O bağının oluşumuna denk gelmektedir. 531.9 eV' ye denk gelen bağlanma enerjisi C-O bağına denk gelirken, 533.3 eV' ye denk gelen bağlanma enerjisi ise Si-O bağına atıf yapılmaktadır. $V_{2p_{3/2}}$ ve $V_{2p_{1/2}}$ ye denk gelen bağlanma enerjileri ise yaklaşık olarak 516.4 ve 523.8 eV olmaktadır [82].



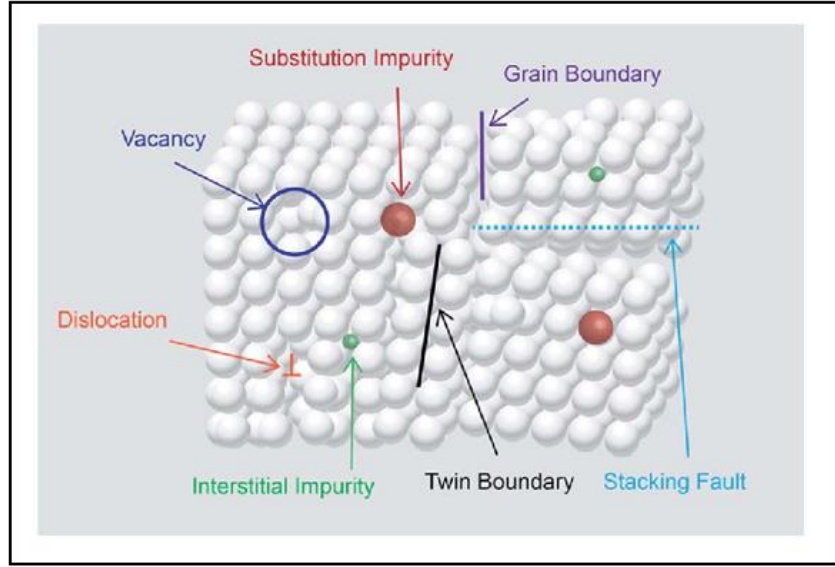
Şekil 3.3: Literatürdeki iyi kimyasal orana sahip VO_2 ince filmin XPS örneği [80].

Yukarıda belirtildiği gibi vanadyumun pek çok ikili oksit durumları mevcuttur, deneysel olarak yapılan çalışmalarda bu ikili oksit yapıları birbirinden ayırt etmek ve iyi bir şekilde karakterize etmek için XPS verilerinden yararlanılmaktadır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda VO_2 için $V_{2p_{3/2}}$ karakteristik bağlanma enerjisi yaklaşık olarak 516.4 eV' ye denk gelirken diğer oksit yapıları için bu değer 513.6 ve

517.1 eV gibi farklı bağlanma enerjilerine denk gelmektedir. Vanadyum metalinin karakteristik bağlanma enerjisi ise 512.3 eV' ye denk gelmektedir [81], [82].

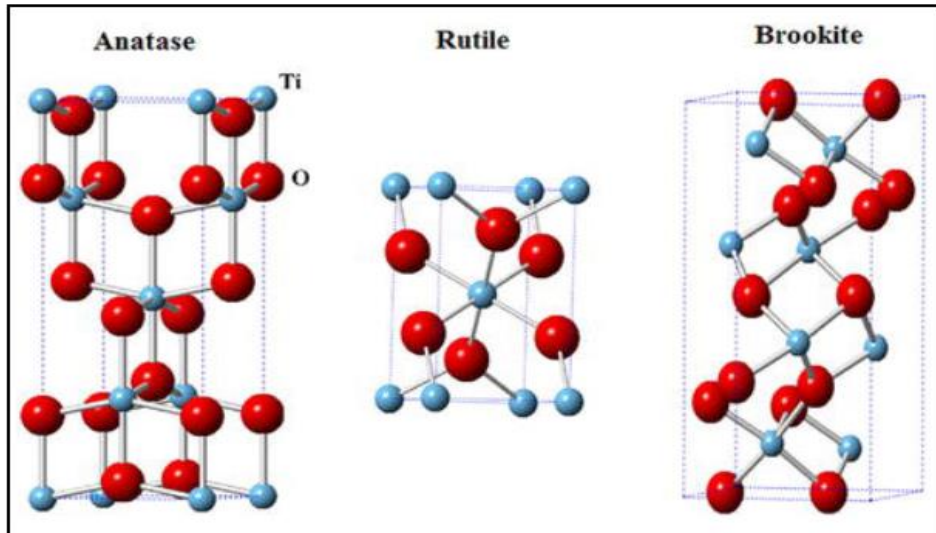
3.1.2. TiO₂

TiO₂ sahip olduğu kimyasal yapı, bio uyumluluğu, fiziksel, optiksel ve elektriksel özellikleri nedeniyle çok yaygın olarak araştırılan bir materyaldir. TiO₂ n-tipi bir yarı iletken ve geniş band aralığına sahiptir ($E_g=3-3.3$ eV). TiO₂ sahip olduğu bu eşsiz özellikleri nedeniyle gaz sensörleri, boya duyarlı güneş hücreleri, fotokatalitikler ve MOSFET yapılarda yalıtkan gibi çok çeşitli uygulamalarda yer alabilmektedir [83]. TiO₂ son yıllarda en çok incelenen yarıiletken metal oksitler arasındadır aynı zamanda. Çünkü bu bileşik elektro-optik cihazlar, kendi kendini temizleyebilen ve buğu önleyici kaplamalar, mikroelettronikler, güneş hücreleri, lityum iyon bataryalar, enerji depolama ve fotovoltaiik gibi uygulamalarda en çok tercih edilen yapıdır. Özellikle TiO₂ nano-parçacık ve nano-çubuklar bu gibi cihazlar için eşsiz ve gelişmiş özelliklere sahiptirler ve kullanıldığı yapıların, cihazların performansını önemli ölçüde artırmaktadır. TiO₂' nin karışık fazdaki yapısı bile eşsiz özellikleri ile düşük maliyetli yarıiletken materyallerdir, çünkü bu yapılar yüksek saydamlık, kimyasal kararlılık, görece sertlik ve geniş optiksel band gap aralığına sahiptirler [84]. TiO₂ ayrıca kimyasal reaksiyonlardaki kararlılığı ve toksit malzeme olmamadaki gösterdiği direnç nedeniyle fotoduyarlı yarıiletken olarakta geniş bir şekilde kullanılabilir. Ayrıca TiO₂ yapıda üretilen foton taşıyıcıları uzun yaşam ömrüne ve güçlü fotokatalitik aktivasyona sahiptir. Bu yapılar özellikle TiO₂ ince filmlerdeki oksijen ve titanyum kusurları olan kusur bozukluklarından etkilenebilen ilginç fiziksel özellikleri bünyesinde barındırmaktadır. Bu kusur bozuklukları bazı uygulamalar için önemli endişe konusu olabiliyorlar. Fakat bazı yeni uygulamalar için özellikle de mikro, nano elektronik yapılar için ise alışılmadık fiziksel olgulara yol açarak mikro ve nano-yapılı elektronik cihazların gelişimine katkı sağlamaktadırlar.



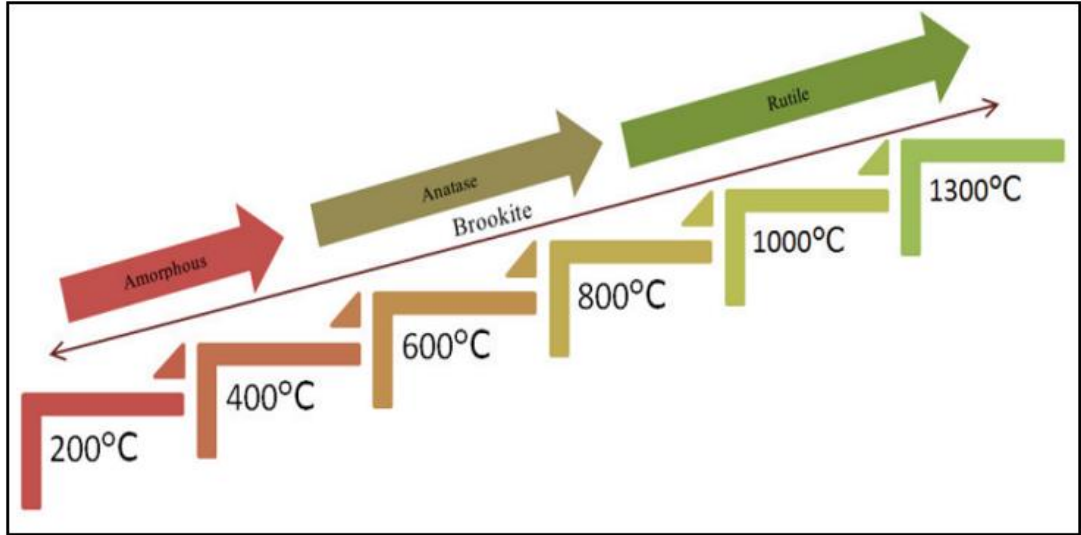
Şekil 3.4: TiO₂ kristal yapıdaki kusur çeşitleri [85].

TiO₂ ince filmlerin kusur yapısını modifiye etmek için ısı işlemleri uygulanmasıyla O-Ti-O bağının parçacık düzenlenmesi artırılabilir. Böylece stokiometrik oranlara ulaşılabilir ve çeşitli uygulamalar için önemli etkiler gözlemlenebilir [86]. TiO₂ isimleri anataz, rutil ve brokit olan 3 farklı kristal faza sahiptir. Anataz ve rutil kristal yapıları tetragonal bir yapıya sahip iken, brokit kristal yapı ortorombik yapıya sahiptir. Bulk materyal olarak rutil faz kararlı bir fazdır. Fakat çözelti fazı hazırlamak için daha elverişli olan anataz ve brokit yarı kararlı bir fazdır ve kolay bir şekilde ısı işlem yoluyla rutil faza dönüştürülebilirler.



Şekil 3.5: TiO₂'nin farklı kristal fazları [87].

TiO₂ 600 °C gibi görece düşük sıcaklıklarda sentezlendikten sonra, TiO₂' nin anataz fazı normal olarak elde edilebilir. Ve daha sonra 800 °C üzerinde ısıtılarak anataz yapı rutil faza dönüştürülebilir. Bu genel davranışa rağmen başlangıç materyali, materyalin bileşimi, üretim metodu ve ısıtılma sıcaklığı gibi etkenler TiO₂' nin kristal fazının gelişiminde önemli rol oynamaktadırlar. TiO₂ üzerine gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda bazı anataz- rutil dönüşüm sıcaklıklarının 1000 °C gibi daha yüksek sıcaklıklarda meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu duruma sebep TiO₂' nin kristal yapısı ve TiO₂ ince filmlerin boyutunun farklılığının neden olabileceği bildirilmiştir. Özellikle kristal yapı oluşumu üretim metoduna önemli ölçüde bağlıdır [83].



Şekil 3.6: Sıcaklık değişimine göre TiO₂ nin kristal yapısındaki faz değişimi [83].

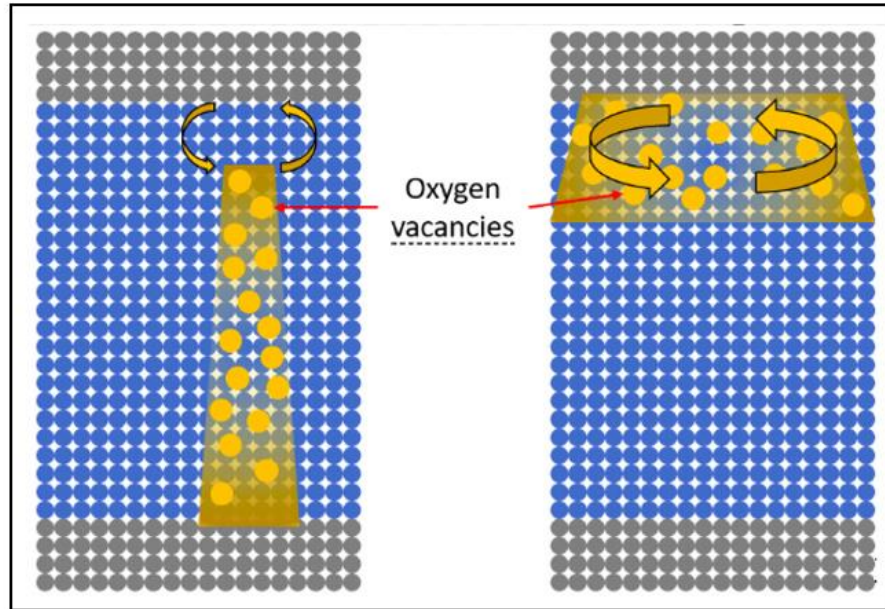
TiO₂ üzerine literatürde gerçekleştirilen çalışmalarda çok düşük sıcaklıklarda üretilen amorf ve kristal TiO₂ ince filmlerin düşük elektron yapısına ya da düşük yük taşıyıcı mobilitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu şekilde zayıf elektron mobilitesine sahip TiO₂ ince filmlerin fotokatalitik uygulamalar, güneş hücreleri ve gaz sensörleri gibi uygulamalarda cihaz performansında kötü bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu şekilde gözlemlenen zayıf elektron taşıyıcı mobilitesini artırmak için ısıtılma işlemi kullanılarak elektronik yapıdaki cihazların performanslarında önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda TiO₂' nin anataz-rutil faz dönüşümü üretim tekniğine bağlı olarak meydana gelmektedir. Bu faz dönüşümü geri dönüşümlü değildir. Gerçekleştirilen çalışmalarda rutil TiO₂ ince filmler sahip olduğu bilimsel ve

pratik önemi nedeniyle daha çok ilgi görmüştür. Özellikle boya duyarlı güneş hücreleri için rutil TiO_2 yapı kullanıldığında cihaz ve sistemin fotokatalitik aktivitesinin önemli ölçüde arttığı ve aynı zamanda yapının dolgu faktörü ile enerji dönüşüm veriminin geliştiği gözlemlenmiştir. Karışık fazdaki TiO_2 yapısının, yük ya da elektron transfer ayrımını geliştirdiği ve elektron rekombinasyon mekanizmasını azalttığı da ayrıca yapılan çalışmalarda ortaya çıkmıştır. Karışık faz yapısının bir başka avantajıda yapılarda anataz-rutil ara yüzey tuzaklama yerlerine yol açmasıdır. Oluşan bu ara yüzey tuzaklama yerlerinin etkisiyle de elektronlar daha düşük enerjili anataz yapılar içerisine göç edebilme fırsatına sahip olurlar [84], [88], [89]. HfO_2 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 ve VO_2 gibi TiO_2 de kalıcı hafıza uygulamaları ve nöromorfik bilgi işlem gibi alanlarda en çok tercih edilen materyallerin arasındadır. Ayrıca sahip olduğu oksijen boşlukları kusurları direnç-anahtarlama davranışı gösteren memristör cihazların üretiminde onu en ideal aday yapmaktadır [2]. TiO_2 ince film yapılar magnetron püskürtme, hidrotermal, kimyasal buhar biriktirme, ultrasonik spre y piroliz ve sol-gel motudu gibi pek çok yöntemler kullanılarak başarılı bir şekilde hazırlanabilmektedirler [90]. Bu yöntemlere ek olarak darbeli lazer biriktirme yöntemi de TiO_2 ince filmleri üretmek için oldukça avantajlı ve önemli bir metottur. Çünkü bu yöntem ile üretilen TiO_2 ince filmlerin kullanılan hedef materyal ile özdeş kimyasal oranlara sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca bu yöntem TiO_2 ince filmleri üretmek için hızlı biriktirme oranı, kolay film büyütme kontrolü ve istenilen düzeyde film kalınlığı, düşük yüzey pürüzlülüğü gibi avantajlarda sağlamaktadır. En önemlisi de bu yöntem ile TiO_2 ince filmler üretilirken enerji, sıcaklık, basınç ve alttaş-hedef malzeme arası mesafesi gibi parametreler üretim prosesini iyileştirmek için ayarlanabilmektedir [84].

3.2. Metal Oksit Yapılarda Direnç Anahtarlama

Faz değıştiren malzemelerden katı çözeltilere kadar geniş malzeme aralığında direnç-anahtarlama davranışı gözlemlenebilmektedir. Bu geniş malzeme aralığındaki en umut verici malzeme sistemi geçiş metali oksitleridir. Bu oksit grubu, direnç-anahtarlamanın gözlemlendiği tüm sistemler arasında en yüksek çok yönlülüğe sahiptir. Geçiş metal oksitleri elektron-elektron iş birliğinden kaynaklanan diğer olağandışı taşıma özellikleriyle evrensel direnç- anahtarlamaı birleştirebilmektedir. Geçiş metal oksitleri süperiletkenlik, devasa manyetodirenç, termoelektriklik, ferromanyetizma, ferroelektriklik ve metal yalıtkan geçişleri gibi pek çok işlevleride

sergiler. Bu bileşiklerin olağanüstü işlevselliklerinde birkaç temel özellik ortaya çıkıyor. Kimyasal olarak geçiş metalleri genellikle birden fazla değerlik durumuna sahiptirler. Bu durum onlara çeşitli latis yapılarına yol açabilecek oksijenle farklı koordinasyonlara imkân vermektedir. Ayrıca bu durum onlara aktif bant yapısındaki elektroniksel işgali değiştirmelerine de imkân tanır. Bu ilgili yönler direnç-anahtarlama olgusunun anlaşılmasında anahtar olan olağandışı elektrik aktarım özelliklerine yol açmaktadır. Direnç- anahtarlamanın en çarpıcı yönlerinden biri her yerde bulunmasıdır. Bu yaygınlık, direnç anahtarlama davranışını bazı özel materyale bağlı etkilere değil, oldukça genel bir ortak kökene işaret etmektedir. Kalıcı direnç-anahtarlamanın ortak fiziksel kökeni, iyonların, oksijen boşluklarının bu oksitlerde sürüklenbilmesine ve geçiş metalinin çoklu- değerlik durumlarından kaynaklanan yarı kararlı olmalarına dayanır. Direnç- anahtarlamanın önemli bir özelliği malzeme içerisindeki kusurlara ve bunların göçüne dayanmasıdır. Dolayısıyla tüm geçiş metali oksitlerinin diğer ortak özelliği, yüksek ve düşük direnç durumu arasında direnç-anahtarlama değişiminin belirli bir derecede değişkenlik göstermesine imkân tanımasıdır [91], [92], [93].



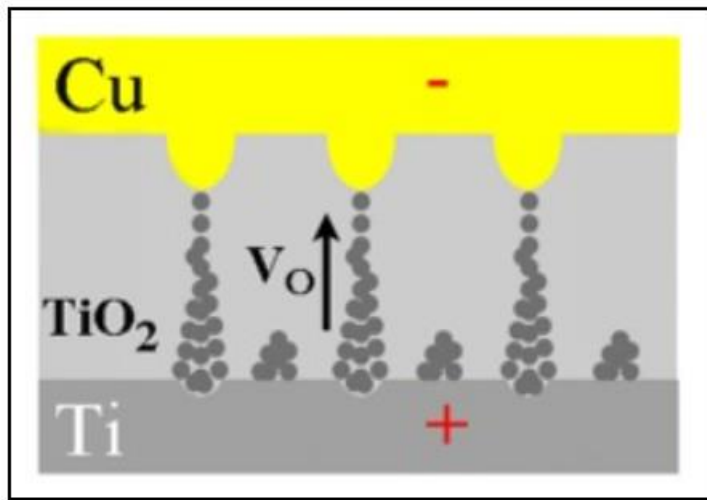
Şekil 3.7: Direnç anahtarlama davranışı gösteren oksit temelli memristör cihazında oksijen boşluklarının göçü [94].

3.2.1. VO₂ Direnç Anahtarlama Özelliği

VO₂ yapısı direnç-anaharlama olgusuna sahip önemli bir yapıdır. Bu yapıda iletkenlik, uygulanan elektrik alan altında oda sıcaklığında anahtarlabilir. VO₂ bileşiğinde anahtarlayıcı mekanizma, oksijen boşlukları olan hareketli pozitif yüklerin yeniden dağılımıdır. Böylece tüm oksit hacim içerisinde rasgele bir şekilde dağılmış katkılı ve katkısız bölgeler oluşturulabilir. Uygulanan bir voltaj uyarımı ile bu bölgeler düzenlenebilir ve memristördeki anahtarlama etkisini belirleyen nanoboyutlu iletken kanallar oluşturulabilir [95].

3.2.2. TiO₂ Direnç Anahtarlama Özelliği

Geçiş metal oksitleri arasında TiO₂ saydamlık, esneklik, iyi kimyasal kararlılık ve yüksek CMOS uyumluluğuna sahiptir. Ayrıca termal kararlılık, yüksek elektronik ve optik özellikleri nedeniyle direnç-anahtarlama gösteren yapılar arasında en çok ümit vaat eden adaylardan biri olarak kabul edilir. Hem çoklu-kristal hem de amorf TiO₂ direnç- anahtarlama davranışı sergiler. VO₂ bileşinde olduğu gibi oksijen boşlukları olan hareketli pozitif yüklerin yeniden dağılımıyla TiO₂ oksit bileşiğinde de direnç-anahtarlama davranışı elde edilebilmektedir. Yapılan araştırmalar göstermiştir ki tek-kristal anataz TiO₂ yapılı direnç- anahtarlama cihazlar amorf ya da çoklu-kristal TiO₂ cihazlardan farklıdır ve de daha üstündür [96].



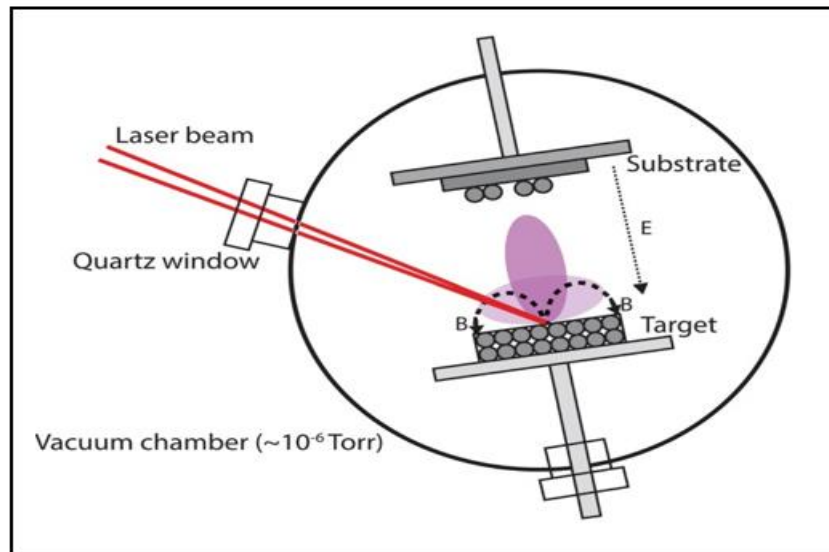
Şekil 3.8: TiO₂ oksit bileşiğindeki oksijen boşluklarının iletken filament yapılar oluşturması yoluyla direnç-anahtarlama davranışının temsili resmi [97].

3.3. Memristör Cihaz Üretiminde Kullanılan Yöntemler

İnce filmler yapılar fonksiyonel nanoelektronğin temel yapı taşlarıdır. Sentez yöntemi ince filmlerin kusur düzeyini ve uygunluğunu belirlediğinden, ince film yapılar için sentez tekniklerinin seçimi çok önemlidir.

3.3.1. Darbeli Lazer Biriktirme

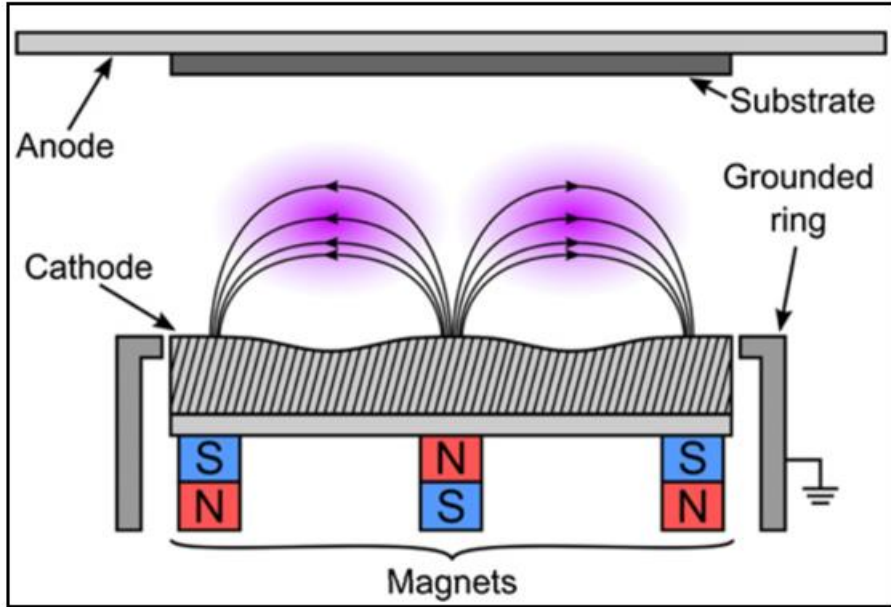
Darbeli lazer biriktirme yöntemi hedef malzemeyi buharlaştırmak için yoğun lazer darbeleri kullanan ince film biriktirme tekniğidir. Lazer darbeleri yoluyla buharlaşan-ablasyona uğrayan parçacıklar hedeften çıkar ve alt tabaka üzerinde birikmeye başlarlar. Biriktirme işlemi, parçacık dağılımını en aza indirmek için bir vakum odasında gerçekleştirilir. Ancak diğer durumlarda birikmenin stokiyometrisini değiştirmek için reaktif gazlar kullanılır. Lazer tarafından üretilen plazma geçicidir ve büyük ölçüde gelen lazer kaynağına, lazer dalga boyuna, ortamdaki gaz bileşimine ve basınca bağlıdır. Bu yöntem, biriktirme stokiyometrisi üzerinde daha fazla kontrol sağladığından onu diğer karmaşık biriktirme tekniklerine göre de en uygun teknik haline getirir. Bu yöntem, oksit ince filmlerin başarıyla biriktirilmesi için kanıtlanmış mükemmel bir yöntemdir [98]. Yöntem, pürüzsüz ve hedef malzemeye aynı stokiyometrik bileşime sahip ince filmler elde etmek için idealdir. Ayrıca yüksek biriktirme hızı onu oksit filmlerin biriktirilmesi için ideal kılar. Bu nedenle darbeli lazer biriktirme yöntemi oksit ince filmler için oldukça idealdir [99].



Şekil 3.9: Darbeli lazer biriktirme yönteminin şeması [100].

3.3.2. Magnetron Püskürtme Yöntemi

Magnetron püskürtme, mükemmel yapışma ve paketleme özelliğine sahip ince filmler üretmek için kullanılan fiziksel bir buhar biriktirme yöntemidir. Anot ve katot boyunca bir ön gerilim uygulanarak Ar (Argon) püskürtme gazı boyunca plazma üretilir. Yüklü parçacıklar daha sonra plazmayı, bir magnetron konfigürasyonunda hizalayan sabit mıknatıslarla hedefe doğru hızlandırır. Bu durum hedef malzemenin altına doğru oldukça düzenli bir şekilde bombardıman edilmesiyle ve ince bir filmin birikmesiyle sonuçlanır. Bu sistemde düşük kirlilik içeren temiz bir ortam sağlamak için yüksek vakumdan sonra püskürtme gazı Ar verilir. Bu sistemde üretilen plazma, magnetron konfigürasyonunda metalik/seramik hedefi bombardıman eder. Buharlaşan hedef malzeme altına yüksek enerjiyle ulaşır ve oraya yapışarak ince film olarak birikmeye başlar [101].



Şekil 3.10: Magnetron püskürtme işleminin şeması [102].

3.4. Yapısal Karakterizasyonda Kullanılan Teknikler

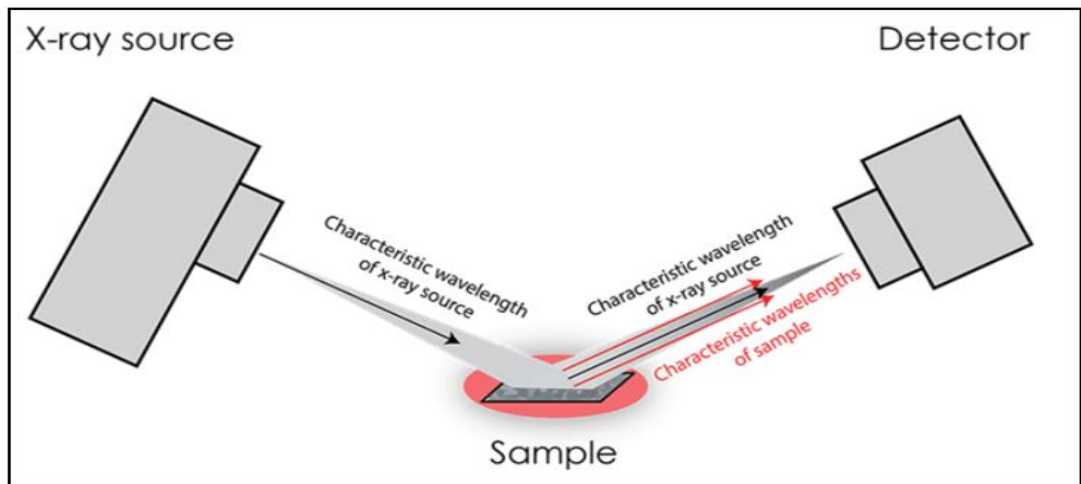
3.4.1. X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS)

X-ışını fotoelektron spektroskopisi, bu tekniğin hassasiyeti nedeniyle oksijen kusurlarını araştırmak ve kimyasal analiz için oldukça avantajlı bir yapısal

karakterizasyon yöntemidir. Burada, Al K α X-ışınları örnekleri ışınlar ve kaçan fotoelektronlar kalkış açısında toplanabilir. Fotoelektronların kinetik enerjileri, elementi ve kimyasal ortamı belirten bağlanma enerjisi seviyelerini gösterebilir. Metal oksitlerin kimyasal durumları, kimyasal ortama bağlı olarak metaldeki kimyasal kaymalar oksijen pikleri nedeniyle hassas bir şekilde incelenebilir. Oksijen zirvesi (O 1s) önemli bir spektrumdur ve bize oksitteki yapılanmayı, oksijen türleri ve kimyasal bağlanma hakkında bilgi verir. Metalik zirvelerde ayrıca çok değerlikli olması nedeniyle özellikle önemlidir. Ayrıca XPS' nin kendisi de fotoelektronların kolayca dağılması nedeniyle yüzeye duyarlı bir tekniktir ve metal oksit arayüzünün incelenmesinde gürültüyü azaltır [103].

3.4.2. X-Işını Kırınımı (XRD)

X-ışını kırınımı (XRD) yöntemi, kristal yapıya sahip elementleri ve bileşiklerini karakterize etmek için çok sık kullanılan tahribatsız bir yöntemdir. Bu yöntem ile malzemelerin yapıları ve fazları hakkında bilgi sahibi olunabilirken ayrıca malzemenin ortalama tanecik boyutu ve kristal kusurları gibi yapısal dinamikleri hakkında ayrıntılı araştırma yapılabilir. Bu yöntem ile incelenen malzemeden elde edilmiş kırınım zirveleri, araştırılan malzemedeki her bir latis düzlemi üzerinden belirli özel açılarla saçılan X-ışınının yapıcı girişimi ile meydana gelir. Spektrumda elde edilen pik yoğunlukları latis(kafes) içindeki atomların dağılımı üzerinden meydana gelmektedir. Sonuç olarak, X-ışını kırınım yöntemi, belirli bir malzemedeki periyodik atomik düzenlemelerin bir yansımasıdır [104].



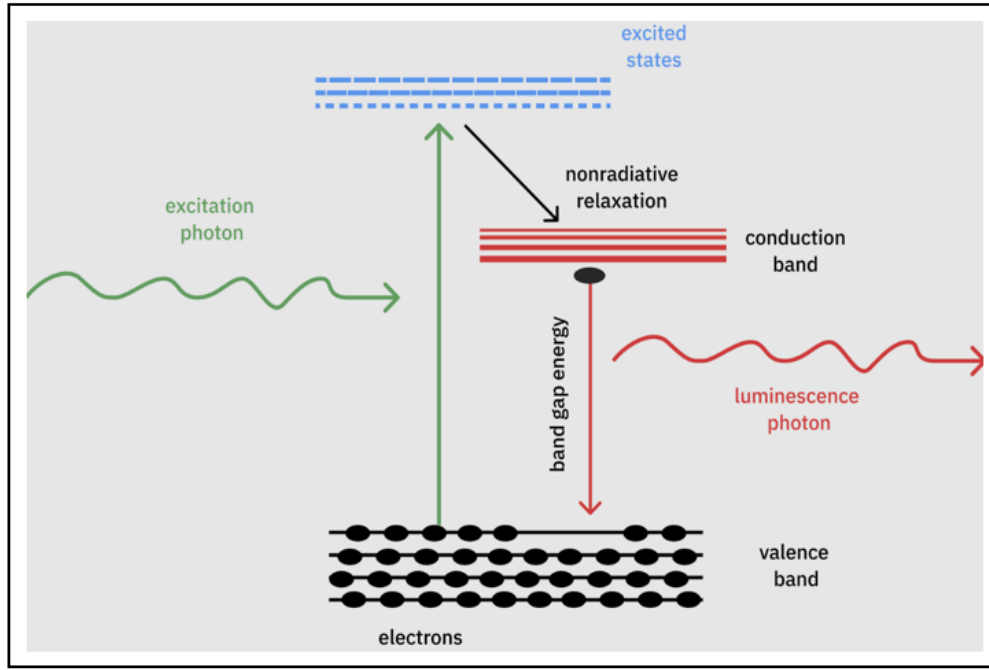
Şekil 3.11: X-ışını kırınımının sistematik görüntüsü [105].

3.4.3. X-Işını Yansıtıcılığı (XRR)

İnce film kalınlığının belirlenmesinde en sık kullanılan yöntemlerden biri X-ışını kırınımı(XRR)' dır. Bu yöntem film kalınlığının angstrom çözünürlüğüyle belirlenmesini sağlayan, tahribatsız bir işlemdir. XRR yönteminde kaydedilen kırınım pikleri, araştırılan katmanın kalınlığı ile ilişkilendirilir. Bu yöntemin hassasiyeti kırınım tepe noktalarının konumunun belirlenmesinin doğruluğuna bağlıdır. Bu yöntemde piklerin tanımlanması, spektrum ölçümü sırasında kaydedilen gürültü nedeniyle bozulabilir. Bu yüzden böyle durumlarda sinyal-gürültü oranının iyileştirilmesine yönelik geliştirmeler yapılması gerekmektedir. Bu teknik aynı zamanda organik ince film çok katmanlı yapıların analizi için de kullanılabilir. Bu yöntemde kalınlık hesabının doğruluğu, XRR eğrisinin yerel maksimumlarının belirlenmesinin doğruluğuna bağlıdır [106].

3.4.4. Fotolüminesans (PL) Spektroskopisi

Fotolüminesans (PL) spektroskopisi temassız modda çalışan ve malzemenin elektronik yapısını inceleyen tahribatsız bir tekniktir. Işık bir numuneye çarptığında, foto-uyarılma olarak bilinen olayla fazla enerjisini malzemeye vererek emilir. Numunenin bu fazla enerjiyi dağıttığı yöntemlerden biri ışık emisyonu, yani lüminesanstır. Foto-uyarma durumunda, lüminesans fotolüminesans olarak bilinir. Uyarım olayı, malzemenin elektronlarına izin verilen uyarılmış durumları işgal etmesine neden olur. Bu uyarılmış elektronlar, ya ışımsal süreç olarak bilinen ışık biçimindeki ya da ışımsal olmayan herhangi bir formda ekstra enerjiyi dağıtarak kararlı hallerine, yani denge ya da temel durumlarına geri dönerler. Yayılan ışık enerjisi (fotolüminesans), uyarılmış ve denge durumları arasındaki geçişte yer alan iki elektronik durumun enerji farkı ile bağlantılıdır. Işıma sürecinin bir kısmı ise yayılan ışığın miktarını belirler. Bu yöntem malzeme kusurlarını ve yabancı maddeleri gözlemlemek için oldukça elverişli bir yöntemdir [107].

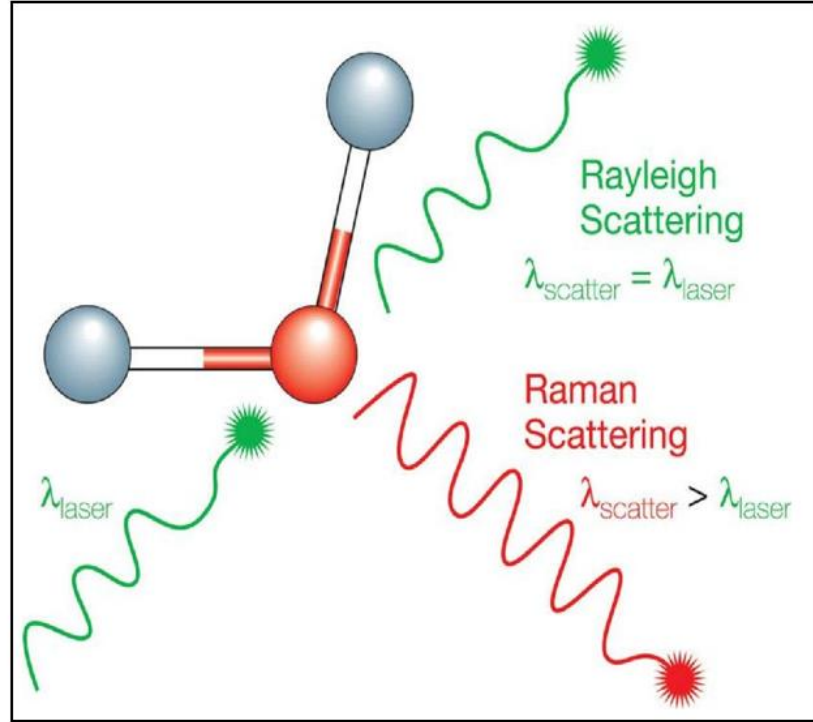


Şekil 3.12: Fotolüminesans spektroskopisinin çalışma prensibi [108].

3.4.5. Raman Spektroskopisi

Raman Spektroskopisi, moleküler yapının analizi için popüler bir tekniktir ve artık kızılötesi spektroskopiyi tamamlayıcı olarak kabul edilmektedir. Raman spektroskopisi Raman etkisine dayanmaktadır. Kuantum mekaniğine göre, fotonlar bir molekülle etkileşime girdiğinde, molekül daha yüksek enerjili sanal bir duruma geçebilir. Bu yüksek enerji durumunda birkaç senaryo meydana gelebilmektedir. Bu senaryolardan biri, molekülün bir foton üreterek başlangıç durumundan farklı bir titreşim enerji düzeyine inmesi olabilir. Farklı malzemeler farklı titreşim modlarına ve dolayısıyla kendi karakteristik Raman spektrumlarına sahiptirler. Bu durum, Raman spektroskopisini malzeme tanımlama ve teşhisi için yararlı bir teknik haline getirmektedir. Gazların ve sıvıların Raman spektrumları ile katılardan (kristaller gibi) alınan spektrumlar arasında yapılması gereken önemli bir ayrım vardır. Gazlar ve sıvılar, malzemeyi oluşturan bireysel moleküllerin farklı titreşim enerji seviyelerine sahiptirler fakat kristaller belirli titreşim enerji seviyelerine sahip moleküllerden oluşur. Böylece kristal kafesin tamamı makroskobik düzeyde titreşime maruz kalır ve bu titreşim modlarına fonon adı verilir. Raman spektroskopisi benzer maddelerin ayrımında analitik bir araç olarak tanınmaktadır. Buluşunun yapıldığı tarihten bu yana

bu yöntem, tıbbi teşhislerden malzeme bilimi ve reaksiyon analizine kadar çok çeşitli uygulamalar için kullanılmıştır [109].

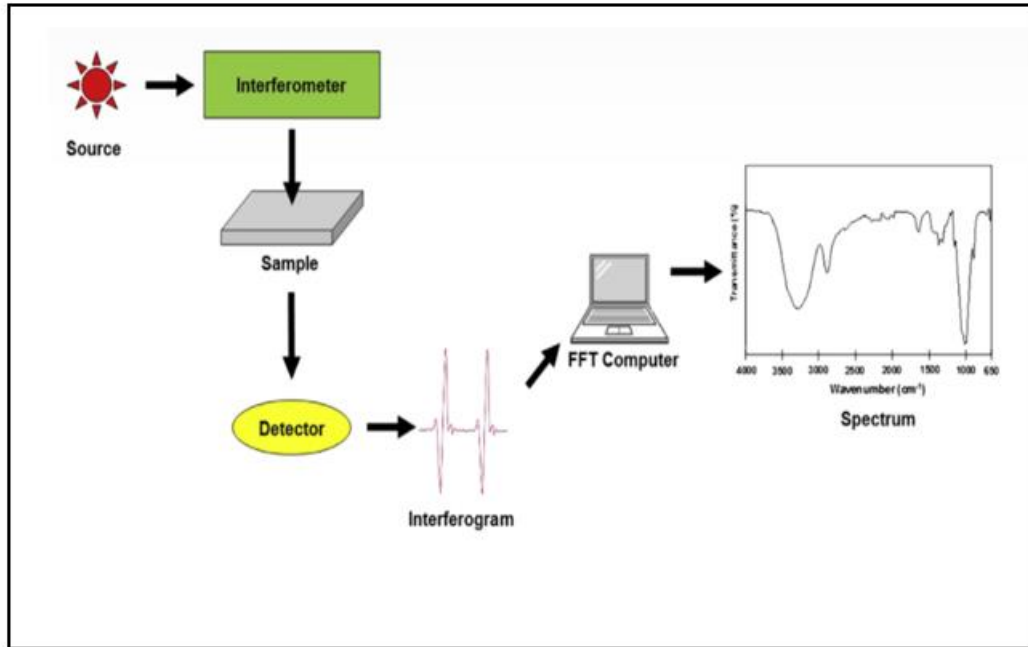


Şekil 3.13: Raman spektroskopisinin çalışma prensibi [110].

3.4.6. Fourier Dönüşümü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi

Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), kızılötesi radyasyon ışını kullanarak malzemelerdeki fonksiyonel grupları belirlemek için kullanılan deneysel bir tekniktir. Bu spektroskopi tekniği, moleküldeki her bir bağ üzerinden meydana gelen kızılötesi (IR) radyasyonunun emilimini ölçer. Bu emilim yoluyla dalga sayısına (cm^{-1}) karşı yüzde geçirgenlik olarak belirlenen spektrum elde edilir. Kovalent bağ içeren çok çeşitli malzemeler IR bölgesindeki elektromanyetik radyasyonu absorbe edebilmektedirler. Görünür ışığa göre daha düşük enerji ve daha yüksek dalga boyuna sahip olan kızıl ötesi(IR) bölgesi mikrodalga radyasyonlarından ise daha yüksek enerjiye veya daha kısa dalga boyuna sahiptir. Bir yapıdaki fonksiyonel grupların belirlenebilmesi için onun IR açısından aktif bir yapı olması gerekir. IR aktif bir molekül dipol momente sahip olan moleküldür. IR radyasyonu, elektrik dipolü olan malzemelerin kovalent bağıyla etkileşime girdiğinde molekül enerjiyi emer ve bağ

ileri- geri salınım yapmaya başlar. Bu nedenle, molekülün net dipol momentinde değişikliğe neden olan salınım IR radyasyonlarını absorbe etmelidir. Burada, belirli bir IR radyasyonunun (frekansının) moleküldeki belirli bir bağ tarafından emileceğine dikkat edilmelidir, çünkü her bağın kendine özgü doğal titreşim frekansı vardır. Bazı frekanslar aynı olsa da farklı yapılara sahip iki molekülün aynı kızılötesi spektruma sahip olmadığını söyleyebiliriz. Son zamanlarda malzemelerin karakterizasyonu için FTIR spektroskopisindeki ilerleme artık iyi bilinmekte ve giderek artmaktadır, özellikle de bu yöntemin kimyasal ve biyolojik malzemeleri karakterize etme kabiliyeti katlanarak artmaktadır [111], [112].

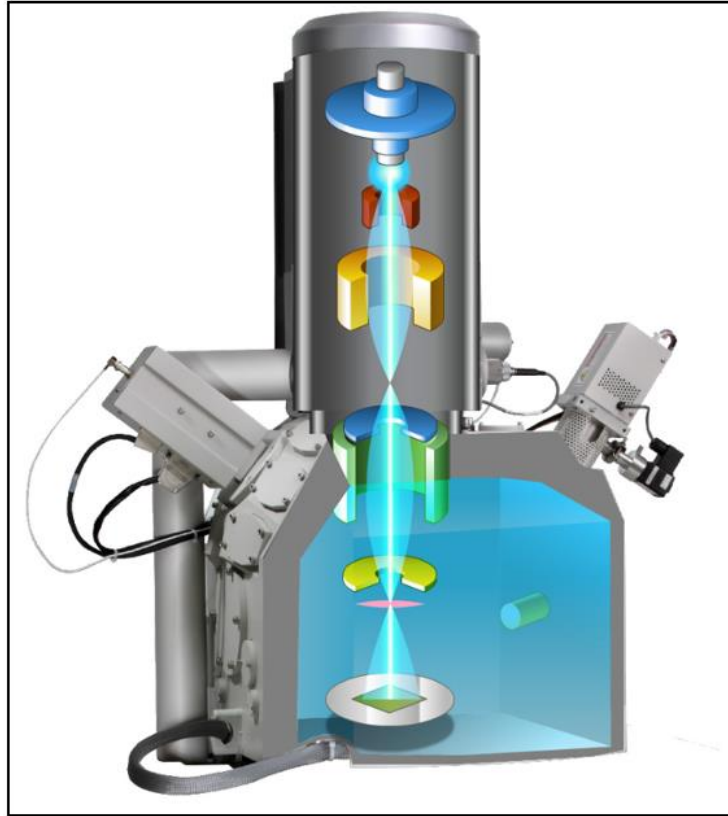


Şekil 3.14: FTIR spektrometresindeki temel bileşeni [113].

3.4.7. Tarayıcı Elektron Mikroskobu Spektroskopisi (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), bir numunenin büyütülmüş görüntüsünü oluşturmak için odaklanmış bir elektron ışını kullanır. Elektron ışını numunenin yüzeyi boyunca düzenli bir şekilde taranır ve numuneden çıkan elektronlar görüntünün oluşturulmasında kullanılır. SEM analizi veya SEM tekniği olarak da bilinen taramalı elektron mikroskobu, dünya çapında birçok disiplinde kullanılmaktadır. Organik ve inorganik maddelerin nanometreden mikrometreye kadar analizlerinde etkili bir yöntem olarak kabul edilebilir. SEM, çok çeşitli malzemelerden çok hassas görüntüler

retmek için çok yüksek çözünürlüklere ulaşan yüksek bir büyütmede çalışır. Bu yöntem taranan numunelerin malzeme bileşimi hakkında ortak laboratuvar testleriyle sağlanamayan temel bilgileri sunma potansiyeline sahiptir. Bu yöntem ile ayrıca ince filmlerin yapısal ve morfolojik analizlerini yapmak ve film yapıları hakkında ayrıntılı bilgi sahibi olmak mümkündür [114].



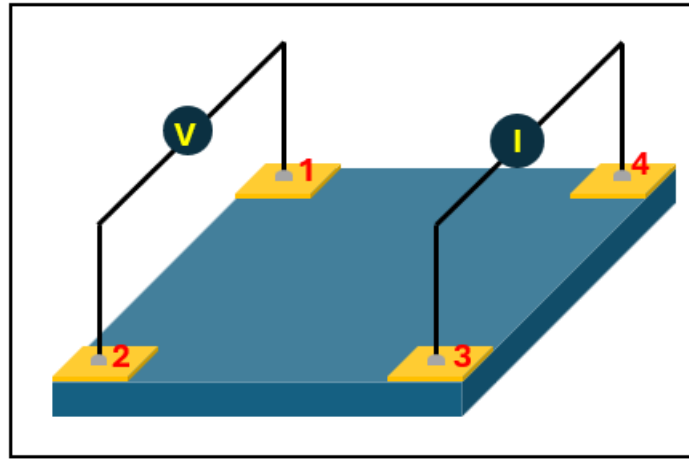
şekil 3.15: SEM cihazının genel fiziki ve sistematik görüntüsü [115].

3.5. Elektriksel Karakterizasyonda Kullanılan Teknikler

3.5.1. Van Der Pauw Yöntemi

Bu yöntem rasgele şekli malzemelerin Hall katsayısını ve öz dirençlerini ölçmek için geliştirilmiş oldukça verimli bir yöntemdir. Bu yöntem kullanılarak elektronik malzemeler özellikle de yarı iletken malzemeler hakkında ayrıntılı karakterizasyon yapılabilmektedir. Bu yöntem ile ince film yapıların ölçümü yapılırken, ince film yapının her bir köşesinde dört adet kontak bölgeleri oluşturulur ve onlar 1’den 4’ e kadar numaralandırılır. Özdirenç lmleri için çapraz çiftler hariç kontakların her

çifti boyunca birkaç ölçüm yapılmak zorundadır. Özellikle belirtmek gerekirken bu ölçümler süresince harici manyetik alan kullanılmaz [116]. Ölçüm işlemi I_{34} olarak gösterilen kontak 3 ve 4 boyunca akım uygulayarak başlıyor ve sonra V_{12} olarak gösterilen kontak 1 ve 2 boyunca denkle gelen voltaj ölçülüyor (Şekil 3.15). Akım sonra ters çevriliyor I_{43} oluyor ve voltaj da tekrar ölçülerek V_{21} değeri elde ediliyor. Sonra ilgili formül kullanılarak bu durumun direnç değeri olan R_{3412} direnç değeri hesaplanır. Sonra diğer kontak bölgelerinden de aynı sistematik form kullanılarak R_{4123} , R_{1234} , ve R_{2341} direnç değerleri hesaplanır.



Şekil 3.16: Öz direnç hesaplamak için voltaj ve akım ölçüm geometrisi.

$$R_{3412} = \frac{V_{12} - V_{21}}{I_{34} - I_{43}} \quad (3.1)$$

$$R_{4123} = \frac{V_{23} - V_{32}}{I_{41} - I_{14}}, \quad R_{1234} = \frac{V_{34} - V_{43}}{I_{12} - I_{21}}, \quad R_{2341} = \frac{V_{41} - V_{14}}{I_{23} - I_{32}} \quad (3.2)$$

Bu dört direnç kullanılarak, öz direncin iki değeri denklem (3.3)' deki ilgili iki van der Pauw formülleri ile hesaplanır.

$$\rho_1 = \frac{\pi f t}{\ln(2)} \frac{R_{3412} + R_{4123}}{2}, \quad \rho_2 = \frac{\pi f t}{\ln(2)} \frac{R_{1234} + R_{2341}}{2} \quad (3.3)$$

Burada f değeri yaklaşık 1' dir ve t materyalin kalınlığıdır. Bu iki öz direnç değerlerinin ortalaması materyalin öz direncine eşit olur. Van der Pauw methodu aynı zamanda Hall katsayısı, taşıyıcı konsantrasyonu ve film yapının mobilitesini bulmak için kullanılır.

Özdirenç ölçümlerinden farklı olarak akım ve voltajlar harici bir manyetik alan altında yüzeyin köşegenleri boyunca uygulanır ve ölçülür. Bu ölçümlerin ilkinde akım 1 ve 3 numaralı kontaklar boyunca uygulanır, Hall voltajı 2 ve 4 numaralı kontaklar boyunca ölçülür. Bu durumda manyetik alan pozitif bir yönde uygulanır (şekil 3.16). İlgili ölçüm sıralaması şu şekilde olur: I_{13+} olarak gösterilen bir pozitif akım uygulanır ve denk gelen Hall voltajı ölçülür, V_{24+} . Akım sonra ters çevrilerek I_{31+} akımı uygulanır ve denk gelen voltaj ölçülür. Akım ters çevrilerek, termoelektrik voltajdan gelen hatalar elenmiş olur. Sonra manyetik alan ters çevrilir ve aynı yöntem kullanılarak I_{13-} , V_{24-} , I_{31-} , ve V_{42-} değerleri pozitif ve negatif akımlar ile ayrı ayrı ölçülür. Bu kombinasyon da hatalı kontak geometrisinden kaynaklanan yanlış hizalama voltajını ortadan kaldırmak için gerçekleştirilir. İlgili ölçümler tamamlandıktan sonra uygulanan akım ve ölçülen voltaj değerlerinin ilgili denklemlerde uygun yerlerde kullanılmasıyla R_{12} , R_{34} direnç değerleri hesaplanır. Yöntemin diğer bir parametreleri olan Hall katsayısı R_H , taşıyıcı yoğunluğu n , ve mobilitayı denklemler (3.5), (3.6) ve (3.7)'yi kullanarak bulabiliriz.

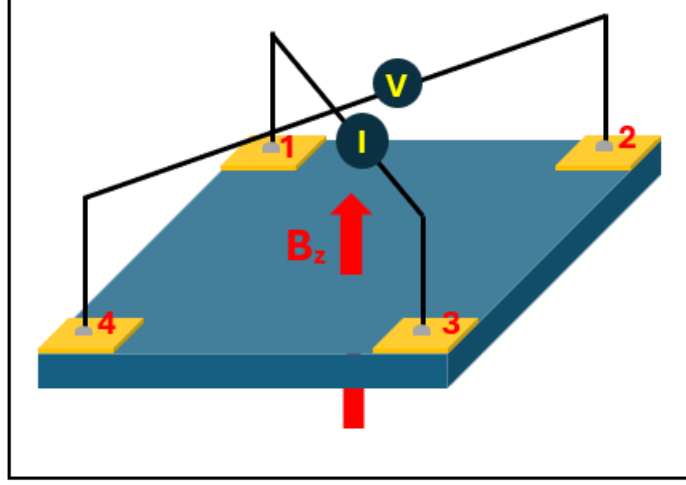
$$R_{12} = \frac{V_{24+} - V_{42+}}{I_{13+} - I_{31+}}, R_{34} = \frac{V_{24-} - V_{42-}}{I_{13-} - I_{31-}} \quad (3.4)$$

$$R_H = (R_{12} - R_{34}) \frac{t}{B} \quad (3.5)$$

$$n = \frac{1}{R_H e} \quad (3.6)$$

$$\mu = R_H \frac{1}{\rho} \quad (3.7)$$

Bu denklemlerdeki B değeri uygulanan harici manyetik alan ve t değeri ise malzemenin kalınlığıdır. Hesaplanan Hall katsayısının işareti taşıyıcı tipini belirtir. Eğer Hall katsayısı negatif bir değer ise n tipi bir yarı iletkeni, pozitif ise p tipi bir yarı iletkeni belirtir [117].

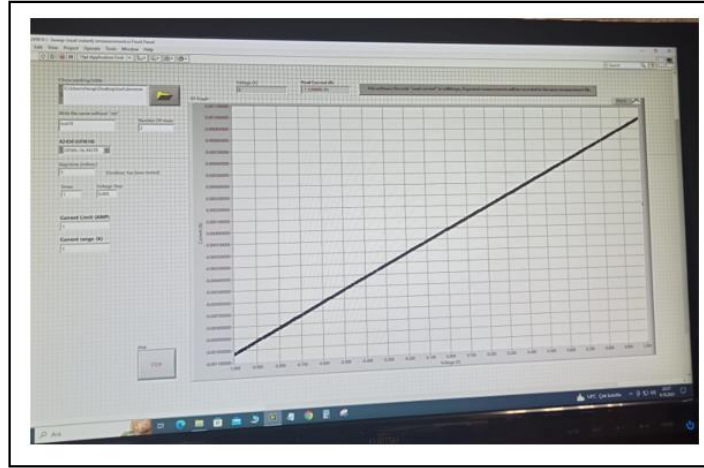


Şekil 3.17: Hall katsayısı hesabı için voltaj ve akım ölçüm geometrisi.

3.5.2. DC Elektriksel Ölçüm

Dielektrik metal oksitlerde direnç- anahtarlama etkisi, elektriksel direncin iki kararlı direnç durumu arasında dış bir elektrik alan ile değişmesinin bir sonucudur. Memristör cihazlarda direnç- anahtarlama mekanizmasının tipik gösterimi akım-voltaj (I-V) eğrisinin elde edilmesi ile sağlanır. Bu amaç doğrultusunda memristör cihazlarda direnç-anahtarlama olayının gözlemlenebilmesi için uygulanan dış elektrik alan altında akım voltaj ölçümleri yapılması gerekir. İki tür I-V taraması vardır bunlar ardışık pozitif/negatif taramalar ve tam iki kutuplu taramalardır. Yarım döngü için ardışık taramalar herhangi bir hafıza efektini güçlendirmek ve pekiştirmek için yapılabilir. Bu tür karakterizasyonda histerisis eğrisinin yönü de kritiktir. Cihazın çevrim dayanıklılığını görmek için tam bipolar tarama gereklidir. Bu şekilde ayrıca yüksek direnç ve düşük direnci ayırt etmek için gereken okuma voltajı belirlenebilir. Bu tez çalışmasında da DC elektriksel ölçüm düzeneği memristör cihazların akım voltaj davranışlarını incelemek amacıyla kuruldu. Üretilen cihazların akım-gerilim (I-V) eğrileri artan ve azalan bir voltaj taraması aralığında gerçekleştirildi. I-V eğrileri labview ara yüzey destekli Keithley kaynak-ölçüm cihazından meydana gelen ölçüm düzeneği ile ölçülmüştür. Bu düzenek istenilen voltaj değeri ve tarama aralığı belirlenecek şekilde oluşturuldu. Bu düzenekte memristör cihaza uygun voltajın pozitif ve negatif tarama gerilimleri uygulanarak cihazın verdiği akım yanıtları elde edilmektedir. Elektriksel karakterizasyonlarda alt elektrotlar daima topraklanmış, üst elektrotlara ise DC gerilimler uygulanmıştır. Ölçümler de fark edilir bir histerisis eğrisi

tespit edilene kadar voltaj taramasının genliği arttırıldı. Histerisis etkisinin tekrarlanabilirliğini göstermek için I-V taramaları daha sonra tekrarlanmıştır. Akım uyumluluğu cihazdan yüksek akımın geçmesini ve dolayısıyla işlevsel katmanların geri dönülemez şekilde bozulmasını önlemek için bir güvenlik özelliği olarak ayarlandı. Ayrıca bu ölçüm düzeneği kullanılarak memristör cihazların forming ve ters forming işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. DC elektriksel ölçümlerde ayrıca memristör cihazların dayanıklılığının test edildiği bir başka ölçüm düzeneği daha kuruldu. Bu ölçüm düzeneğinde ardışık pozitif ve negatif voltajlar uygulanarak cihazın yüksek ve düşük direnç durumlarındaki direnç ve akım değerleri ölçülebilmekte ve böylece cihazın dayanıklılığı belirlenmektedir.



Şekil 3.18: DC elektriksel ölçüm düzeneğinin arayüzü.

3.5.3. AC Elektriksel Ölçüm

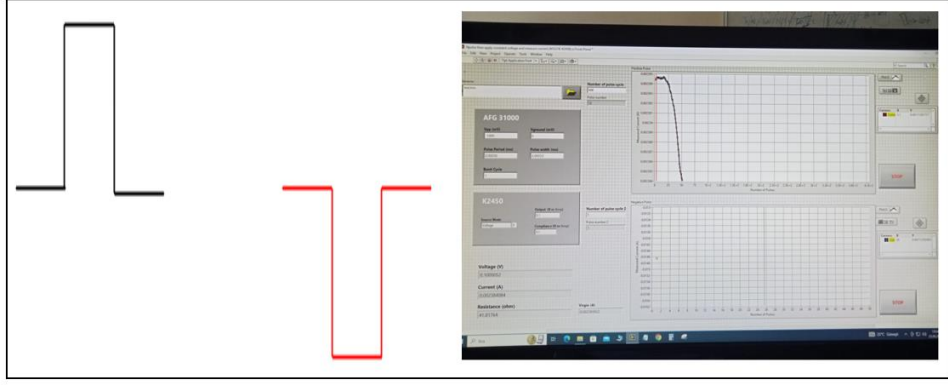
DC ölçüm düzeneklerine ek olarak tez çalışması kapsamında ayrıca fonksiyon üretici, dijital osiloskop ve Keitley 2450 cihazlarının kullanıldığı labview ara yüzeyi destekli AC elektriksel ölçüm düzeneği kuruldu. AC elektriksel deneysel düzeneği, üretilen tek katmanlı ve iki-katmanlı memristör cihazların dalga tipi, frekans, genlik ve atım süresi gibi dijital atım parametrelerine bağımlılığını incelemek için kurulmuştur. Bu yöntemle geliştirilen ölçüm protokolü ile üretilen memristör cihazların sinaptik davranışlarını karakterize etmek amaçlanmıştır. Ölçüm düzeneği atımların genliği, periyodu, frekansı gibi parametreler ve ayrıca uygulanacak atımların sayısı ve kutbu gibi önemli değerler değiştirilebilecek şekilde hazırlanmıştır. DC ölçümlerde olduğu

gibi AC elektriksel ölçümlerde de alt elektrotlar daima topraklanmış, üst elektrotlara ise AC darbe gerilimleri uygulanmıştır.



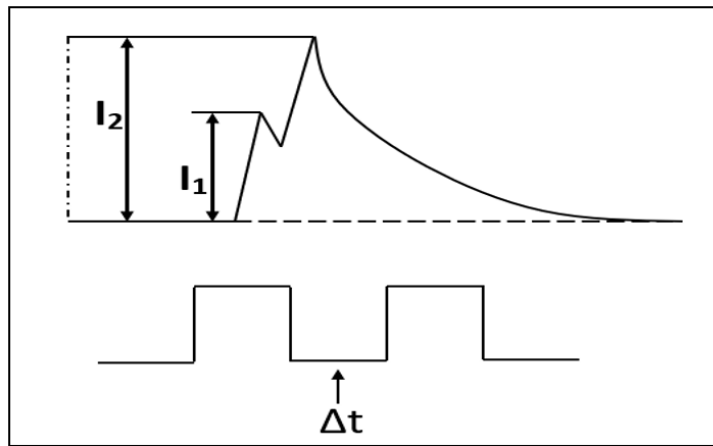
Şekil 3.19: AC elektriksel ölçüm düzeneği.

Nöromorfik sistemlerde gözlemlenen karakteristik sinaptik esneklik öğrenme ve hafıza yeteneklerinin temel taşıdır. Olağan üstü bir durum olan biyolojik sinapslardaki güçlenme ve çöküntü yetenekleri genellikle ardışık uyarıcı ani artışlarla elde edilir. Biyolojik sistemlerdeki bu mekanizmaya benzetme yaparak üretilen memristör cihazlarımıza ardışık pozitif ve negatif darbeler uygulayarak biyolojik sistemlerdekine benzer güçlendirme ve çöküntü yapıları elde etmeyi amaçladık. Bu amaç doğrultusunda üretilen memristör cihazlarının güçlendirme ve çöküntü gibi sinaptik esnekliğini ölçebilmek için AC ölçüm düzeneği ile özel bir program oluşturduk. Bu program uygulanan atımların genliği, periyodu, frekansı gibi parametreler ve ayrıca uygulanacak atımların sayısı ve kutbu gibi önemli değerler değiştirilebilecek şekilde hazırlanmıştır. Sistem genel olarak memristör cihaza ardışık atımlar uygulanarak her bir atım sonrası cihazın iletkenliğinde meydana gelen değişimlerin ölçülmesine dayanmaktadır.



Şekil 3.20: Sinaptik esneklik ölçümleri için ilgili program ara yüzeyi ve çalışma mekanizması.

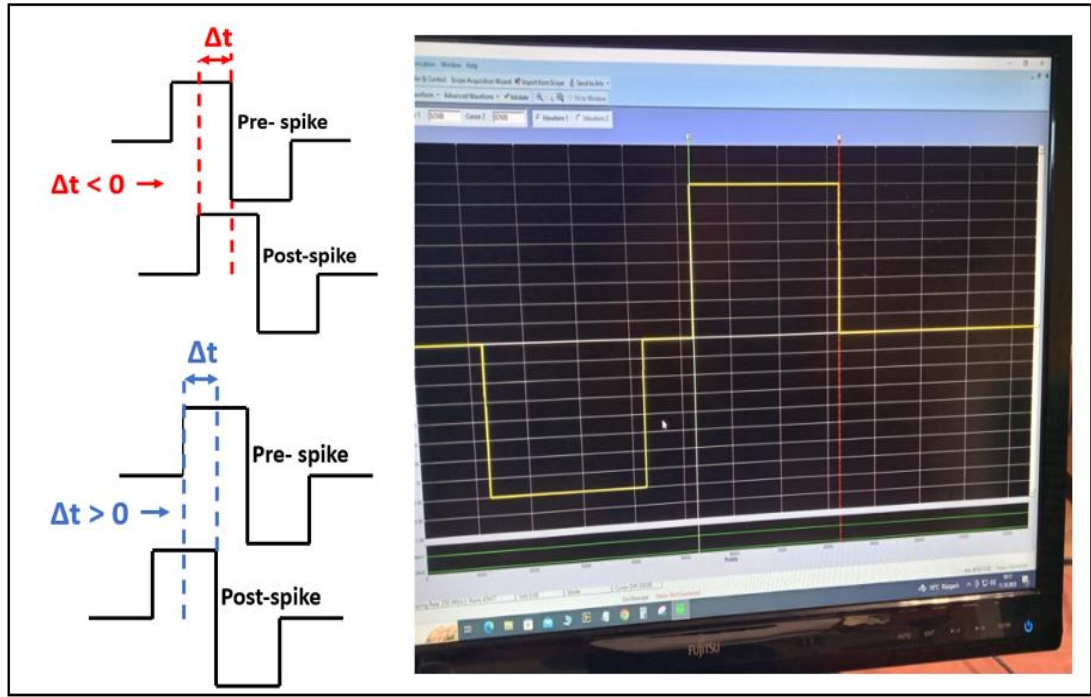
Biyolojik sinapslardaki bir başka karakteristik davranış PPF göstergesidir. Tez çalışması kapsamında üretilen memristör cihazlarımız için bu sinaptik davranışla benzerlik kurabilmek amacıyla AC elektriksel ölçüm düzeneğimizin bir başka çeşidini hazırladık. Bu ölçüm sisteminde sadece 2 tane pozitif atımlar uygulayarak memristör cihazın her bir atımdan sonraki verdiği akım yanıtlarını ölçtük. Daha sonra ilgili PPF indeksi formülünü kullanarak memristör cihazlarımızın PPF indeksi davranışlarını belirlemeyi amaçladık. Bu ölçüm düzeneği atımların genliği, frekansı, periyodu gibi parametreler değiştirebilecek şekilde hazırlanmıştır. Bu ölçüm düzeneği iki atım arasındaki bekleme süresi isteğe göre ayarlanabilecek ve sonuçlar bu sürenin fonksiyonu olacak şekilde kurulmuştur [118].



Şekil 3.21: PPF indeksi ölçüm düzeneğinin çalışma mekanizması.

Biyolojik nöronlardaki bağlantı sinapslar yoluyla gerçekleştirilir. Eğer iki nöronun bağlantısı artıyor yani kuvvetleniyorsa bu sinaptik ağırlığın arttığını tersi durum ise

sinaptik ağırlığın azaldığını söylemektedir. Biyolojik sinapslardaki bu davranışla bir benzerlik kurmak amacıyla ardışık farklı yönlü atımların uygulandığı bir başka AC elektriksel ölçüm sistemi kurduk. Bu ölçüm düzeneğinde ardışık pozitif ve negatif atımlar uygulanarak cihazların atımlar uygulanmadan önceki ve sonraki akım yanıtları ölçülmüştür. Daha sonra ilgili sinaptik ağırlık değişimi denklemini kullanarak ve biyolojik sinapslarla benzetme yaparak memristör cihazlarımızın sinaptik ağırlık değişimlerini belirlemeyi amaçladık. Bu ölçüm düzeneğini atımların frekansı, genliği, periyodu ve en önemlisi atımlar arasındaki süreyi belirleyebilecek şekilde inşa ettik. Ayrıca programı labview ara yüzeyi kullanarak, ölçümlerimizi atımlar arasındaki sürenin fonksiyonu olacak şekilde ölçüp verilerimizi de sürenin fonksiyonuna göre istatistiksel olarak hesaplayacak şekilde geliştirdik [119].

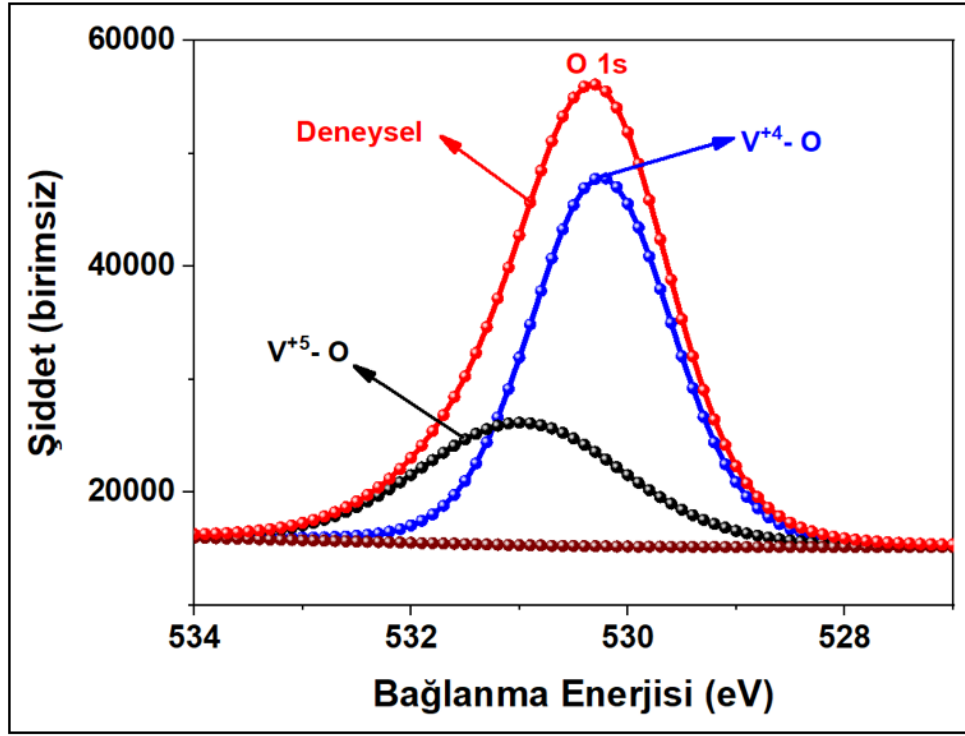


Şekil 3.22: SDTP ölçümleri mekanizması ve ölçüm düzeneğinin ara yüzü.

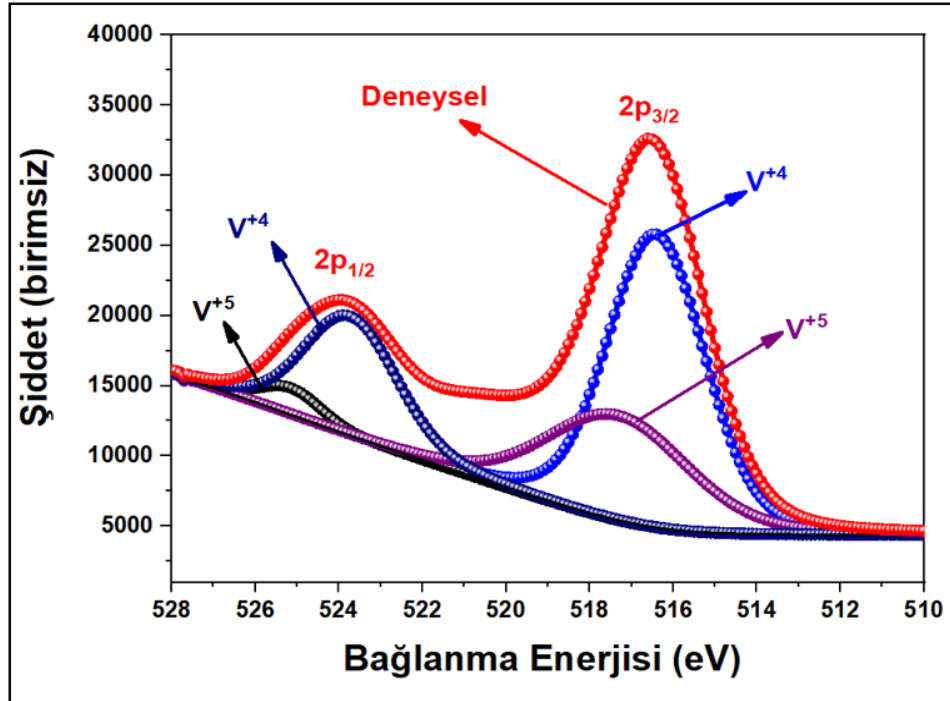
4. VO_x VE TiO_y İNCE FİMLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONLARI

4.1. VO_x İnce Fimlerin Üretimi ve Yapısal Karakterizasyonu

Bu tez çalışmasında VO₂ ince filmleri PLD yöntemi kullanılarak üretildi. VO₂ ince filmleri, bir KrF (248 nm dalga boyu) darbeli lazer kaynağı kullanılarak (100) yönelimli SiO₂ alttaş üzerine biriktirildi. PLD sisteminde büyütme işlemi için hedef malzeme olarak önceden satın alınmış bir VO₂ hedef malzemesi kullanıldı. PLD sisteminde hedef malzeme ile alttaş arasındaki mesafe 24,8 mm' de sabit tutuldu. PLD sisteminde VO₂ büyütme işlemi süresince lazer 350 mJ güçte çalıştırıldı ve 10 Hz tekrarlama oranına sahipti. Lazer akışı parametresi ise 2,4 J/cm² ye ayarlandı. Düzgün ve homojen film yüzeyleri elde edebilmek için alttaş ve hedef malzemeler üretim süresince düşük hızlarda döndürüldüler. Film biriktirmeden önce tüm alttaşlar, sırasıyla aseton ve izopropanol içerisinde 5 dakika boyunca ultrasonik olarak temizlendi ve ardından tüm yüzey kirliliğinden kurtulmak için nitrojen ile kurutuldular. Tüm ince film üretim işlemleri oda koşulları sıcaklığında ve ultra yüksek vakum koşulları altında gerçekleştirildi. Fakat alttaş sıcaklığının etkisini araştırmak için alttaş SiO₂ sıcaklığı farklı değerlere göre ayarlandı. PLD tekniği ile yüksek vakum şartlarında büyütülen VO₂ ince filmlerin yapısal özellikleri aşağıda sunulmaktadır. Üretilen VO₂ ince filmlerin kimyasal bileşimi ve oksidasyon durumu XPS ölçümleri ile incelenmiştir. Ayrıca literatür kısmında bildirildiği gibi vanadyumun oksijen ile birçok oksit bileşik oluşturma potansiyeli olduğundan ve bu oksitler içerisinde VO₂ formunun teşhis ve karakterizasyonunu tam olarak yapabilmek için V-O bağının çok ayrıntılı incelenmesi gerekmektedir. XPS sonuçlarını incelediğimizde V_{2p3/2} için bağlanma enerjisi 516.5 eV olurken O_{1s} için bağlanma enerjisi 530.3 eV olmuştur. Bu denk gelen bağlanma enerjileri VO₂ formunun oluştuğunu doğrulamaktadır. Ayrıca V⁺⁴ ve V⁺⁵ valans değerleri için denk gelen bağlanma enerjileride VO₂ formu için oldukça uyumlu değerlerdir. V⁺⁴ ve V⁺⁵ valans değerlerinin birbirlerine göre göreceli durumlarını incelediğimizde, V⁺⁴ valans değeri V⁺⁵ valans değerine göre görece daha yüksek olmaktadır. Bu durum filmlerin çok iyi bir stokiometrik oranlara sahip olduğunu belirtmektedir [76], [77]. Ayrıca artan film kalınlıkları ve alttaş sıcaklıklarının fonksiyonu olarak XPS sonuçlarını incelediğimizde belirgin bir değişim gözlemlenmemiştir.



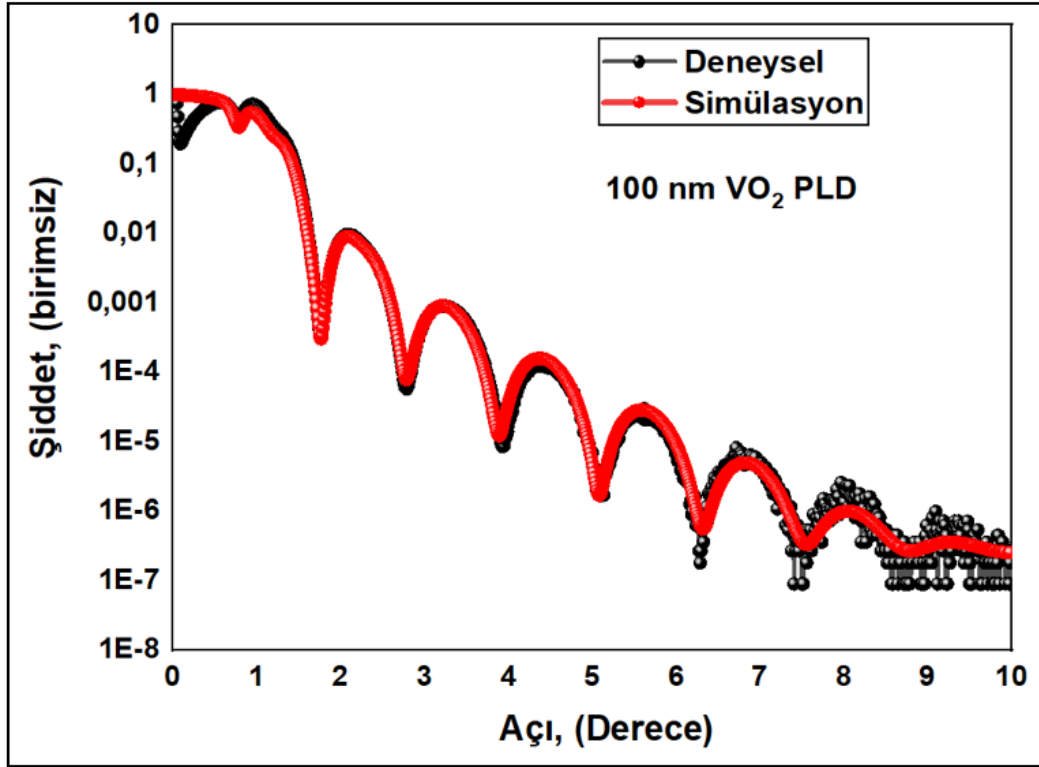
Şekil 4.1: VO₂ ince film O 1s XPS spektrumu.



Şekil 4.2: VO₂ ince film V 2p XPS spektrumu.

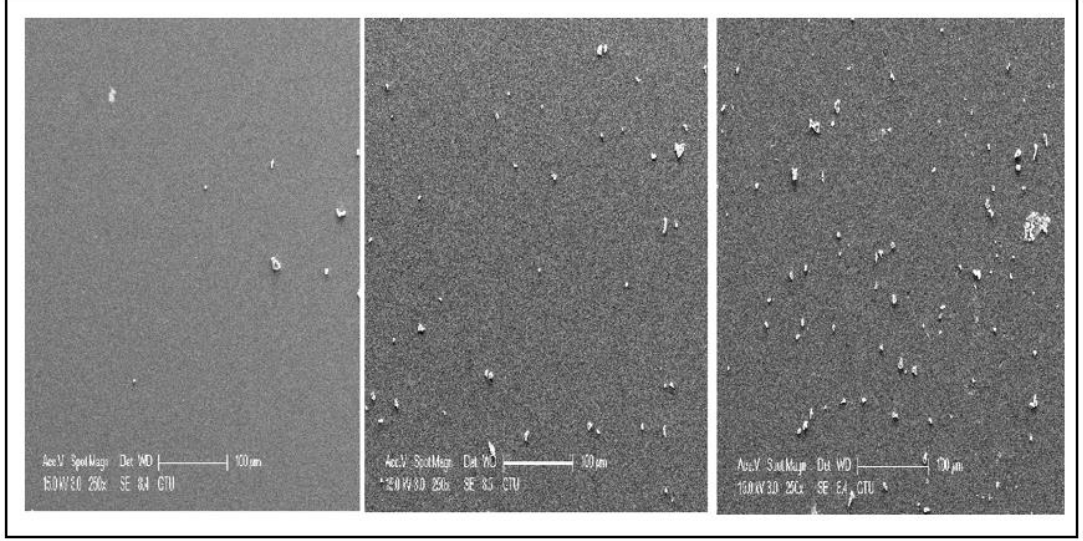
Büyütülen VO₂ filmlerin kalınlıkları, fiziksel yoğunlukları ve pürüzlülükleri XRR ölçümünün simülasyonu ile elde edilmiştir. Ölçüm ve simülasyon sonucu Şekil 4.3'

de gösterilmektedir. Bu çalışmada, farklı kalınlıklarda VO₂ ince filmleri büyütülmüş ve sonra çeşitli karakterizasyon işlemleri uygulanmıştır.



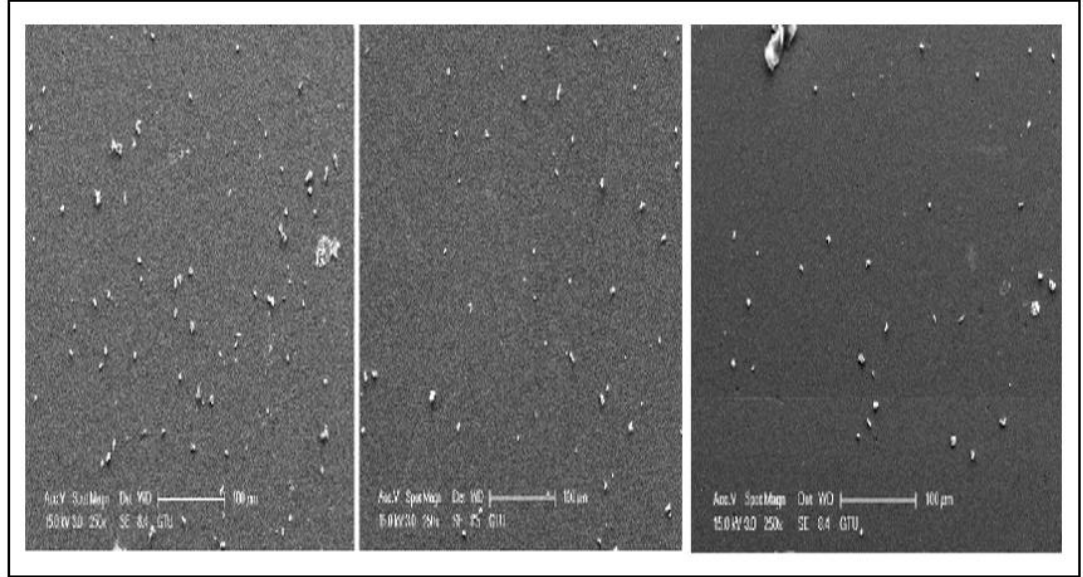
Şekil 4.3: 100 nm kalınlığındaki VO₂ ince filmin XRR ölçüm grafiği.

VO₂ ince filmlerin yüzey mikro yapılarını SEM ile inceledik. Üretilen filmler düzgün ve homejen bir yapıda olmuştur. Film mikro yapılarında çatlak ve kusurlara rastlanmamıştır. Fakat artan film kalınlığı ile, film yüzeylerinde az da olsa bölgesel topaklanmalar meydana gelmiştir.



Şekil 4.4: VO₂ ince filmlerin soldan sağa artan film kalınlığına göre SEM görüntüleri.

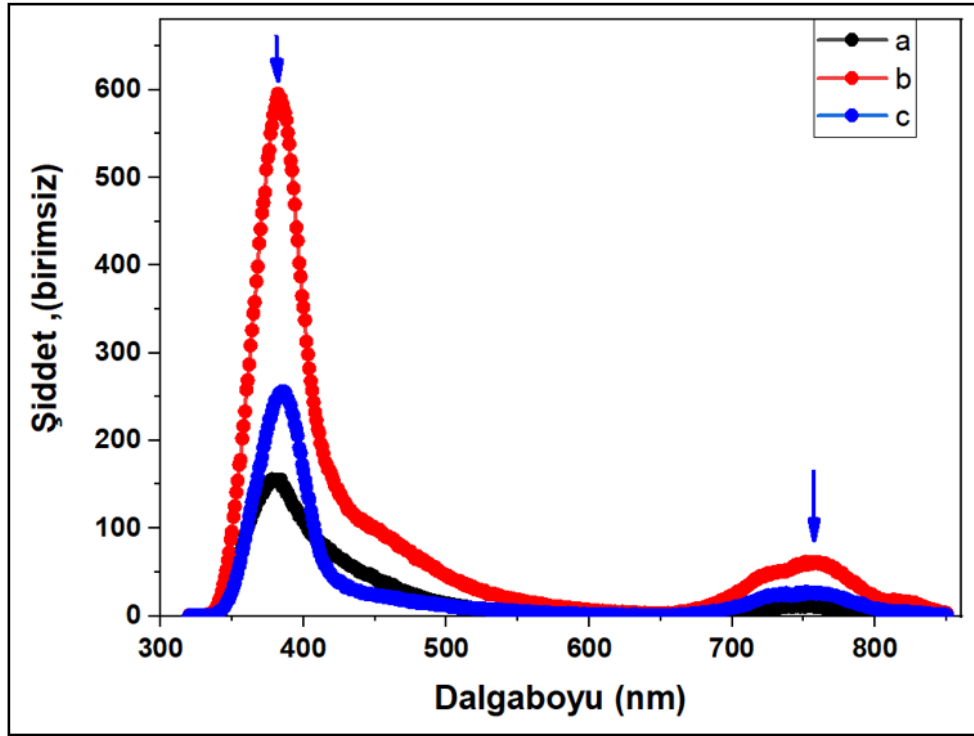
Film mikro yapılarını kalınlık sabit tutarak artan alttaşı sıcaklığının fonksiyonu olarak incelediğimizde film mikro yapılarının artan alttaşı sıcaklığı ile daha düzgün bir yapıya sahip olduğunu ve topaklanmanın belirgin şekilde azaldığını gözlemledik.



Şekil 4.5: VO₂ ince filmlerin soldan sağa artan alttaşı sıcaklığına göre SEM görüntüleri.

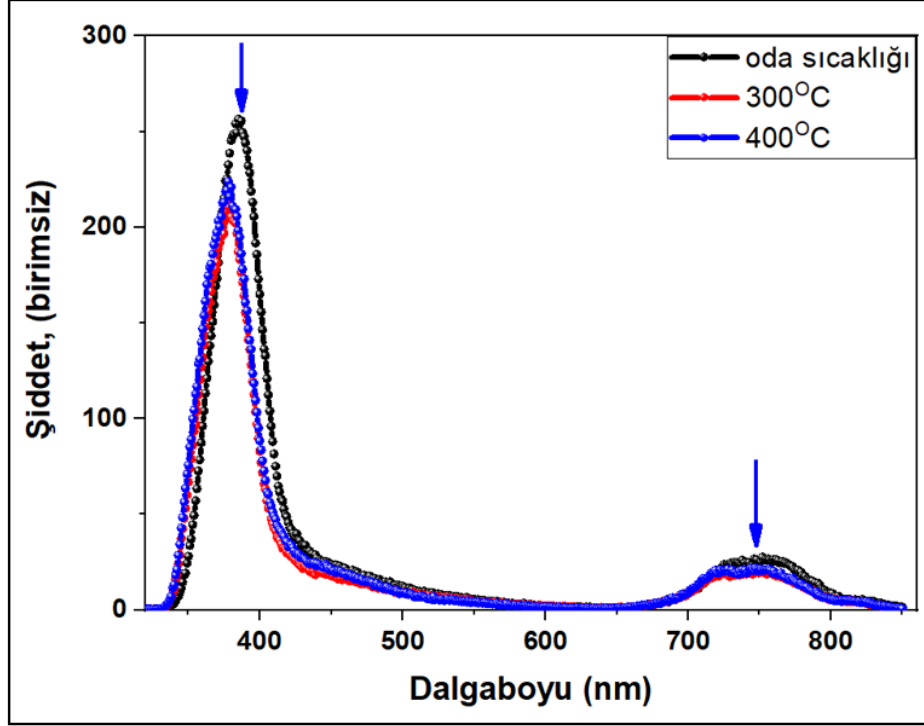
VO₂ ince filmlerin optiksel özelliklerini ve oksijen kusurlarını PL ölçümleri ile araştırdık. Tüm filmler için VO₂ yapısının karakteristik PL spektrumunu gözlemledik, spektrumlarda 750 nm de emisyon piki ve yaklaşık 380 nm de uyarılma piki gözlemlendi. 750 nm civarındaki emisyon pikleri yapıdaki oksijen boşluklarından

kaynaklanmaktadır. Artan film kalınlığı ile uyarılma pikleri daha dar bir dalga boyunda meydana gelmiştir. Oksijen boşluğundan kaynaklanan emisyon pikleri ise artan film kalınlığı ile daha belirgin olmuştur.



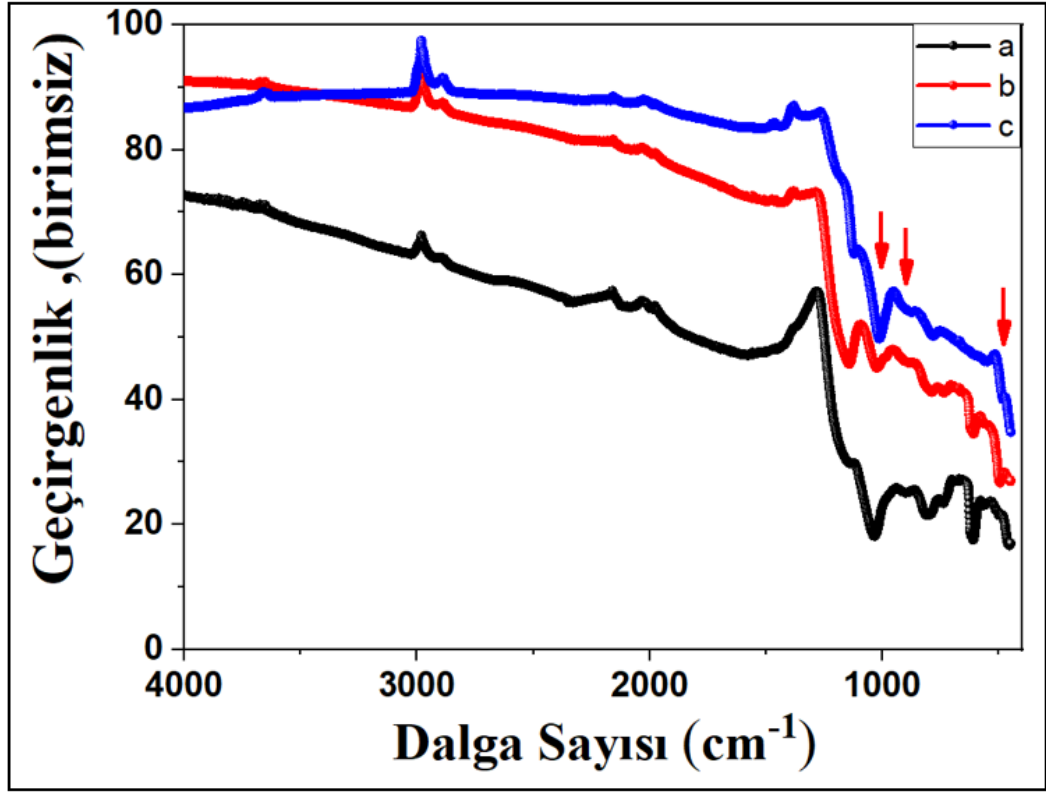
Şekil 4.6: VO₂ ince filmlerin a,b,c sırasıyla artan film kalınlığına göre PL spektrumları.

PL spektrumunu değişen alttaş sıcaklığının fonksiyonu olarak incelediğimizde VO₂ ince filmler için benzer emisyon ve uyarılma piklerini gözlemlemekdeyiz. Artan alttaş sıcaklığı emisyon ve uyarılma piklerinde büyük bir değişime neden olmamıştır. Burdaki filmlerde de oksijen boşluklarından kaynaklanan emisyon pikleri belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir.



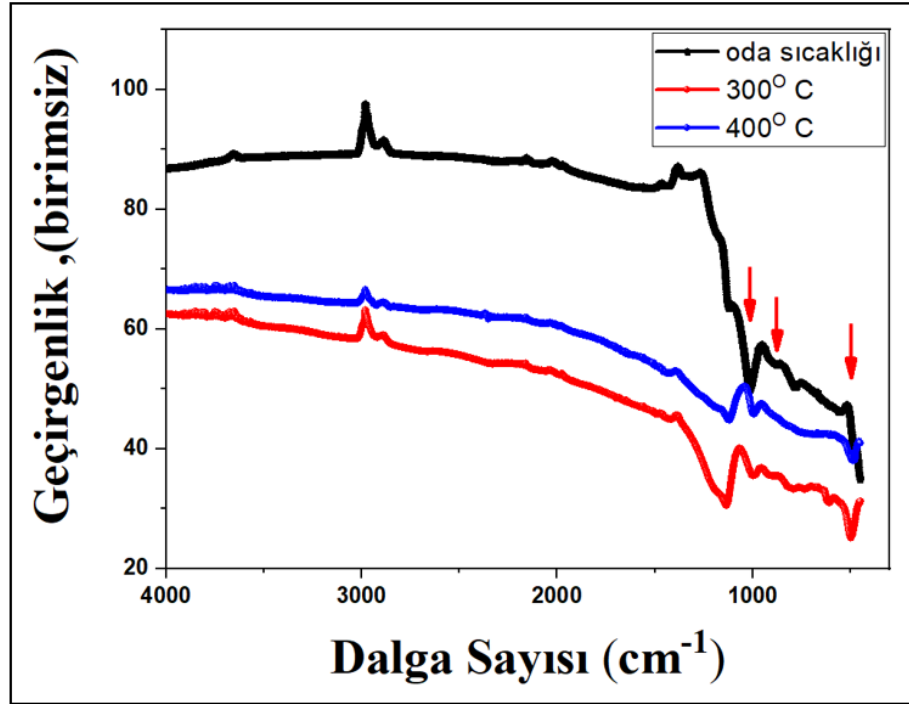
Şekil 4.7: VO₂ ince filmlerin değişen alttaş sıcaklığına göre PL spektrumları.

VO₂ filmlerin bağ yapılarını, fonksiyonel gruplarını ve oksijen içeriklerini FTIR ölçümleri olarak inceledik. FTIR spektrumlarında karakteristik V-O bağının oluştuğunu temsil eden bant merkezleri gözlemlenmiştir. FTIR spektrumlarını ilk önce kalınlığın fonksiyonuna göre inceledik. 500 ve 896 cm⁻¹ de gözlemlenen bantlar V⁺⁵ ile VO₂ titreşim modlarına denk gelmektedir. Bu bantlar oldukça zayıftır. Bunlar XPS sonuçları ile tutarlı bir şekilde vanadyumun oksitlenerek VO₂ yapısını oluşturduğunu ve filmlerin iyi bir kimyasal bileşime sahip olduğunu açıklamaktadır. Bu bantlar artan kalınlık ile azalma eğiliminde olmuştur. 1012 cm⁻¹ denk gelen bant yapısı gerçek VO₂ bant yapısını temsil etmektedir. Artan kalınlıkla hem daha belirgin olmuş hem de literatürdeki değerlere daha yakın olmuştur. FTIR spektrumunda alttaşdan kaynaklı silikon ve oksijen fonksiyonel gruplarının bantlarına da raslanmıştır fakat bunlar artan kalınlık ile azalma eğiliminde olmuşlardır.



Şekil 4.8: VO₂ ince filmlerin a,b,c sırasıyla artan film kalınlığına göre FTIR spektrumları.

FTIR spektrumlarını alttaş sıcaklığının fonksiyonu olarak incelediğimizde kalınlığın fonksiyonunkinden daha farklı değişimler olmuştur. Alttaş sıcaklığının artmasıyla V⁺⁵, e denk gelen 896 cm⁻¹ merkezli bant neredeyse hiç ortaya çıkmamıştır fakat diğer 500 cm⁻¹, e denk gelen bant da bir değişim olmamıştır. Hidroksil gruplardan kaynaklı oksijen içeriği artan alttaş sıcaklıkları ile belirgin bir şekilde azalmıştır. Ana VO₂ bant oluşumunu teşkil eden 1012 cm⁻¹ merkezli bant artan alttaş sıcaklığı ile varlığını korumuş ve daha belirgin olmuştur. Bu yüzden kaliteli VO₂ ince filmler üretmek için yüksek alttaş sıcaklıkları daha avantajlıdır. Genel olarak FTIR spektrumları üretilen filmlerin VO₂ formunda meydana geldiğini ve iyi bir kimyasal bileşime sahip olduğunu ortaya koymuştur.

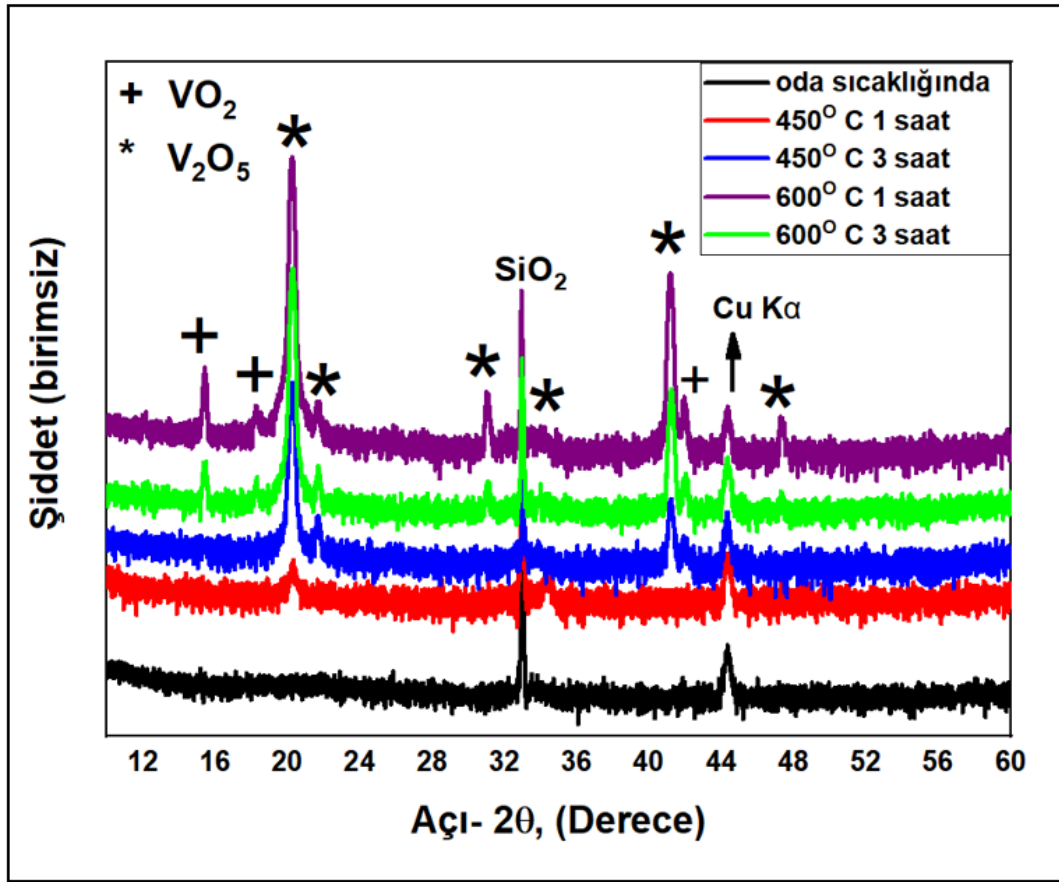


Şekil 4.9: VO₂ ince filmlerin alttaş sıcaklığına göre FTIR spektrumları.

4.2. VO_x İnce Fimlerin Termal İşlemeYapısal Özelliklerinin İncelenmesi

VO₂ ince filmlerde büyütme sistemimizin yüksek sıcaklıklara çıkamamasından dolayı büyütülen filmlerde kristal yapı oluşumunu gözlemleyemedik. Bu yüzden VO₂ ince filmlere büyütme sonrası ısıtma işlemi uyguladık. VO₂ ince filmlerin kristal yapısını ve faz gelişimini incelemek için, Raman spektroskopisi ve XRD ölçümleri gerçekleştirdik. Şekil 4.10 büyütülmüş ve termal olarak işlenmiş filmlerin XRD spektrumlarını göstermektedir. Büyütme sonrasında ısıtma işlemi görmeyen filmlerin amorf olduğu ve karakteristik VO₂ pikine sahip olmadığı anlaşıldı. Fakat çeşitli sıcaklık ve sürelerde ısıtma işlemi tabi tutulan filmlerin VO₂ veya V₂O₅ kristal formunu oluşturduğu görülmüştür. XRD spektrumları, VO₂'nin $2\theta=15.4^\circ$, 18.32° , 42° 'de (001), (100) ve (210) yönelimli kristal formunun varlığını gösterdi [120], [121], [122]. Ayrıca spektrumlar V₂O₅'in $2\theta=20.3^\circ$, 21.7° , 31.06° , 41.2° ve 47.3° daki kristal formunu gösterdi [123], [124]. Ayrıca $2\theta=33^\circ$ ve 44.34° daki pikler sırasıyla SiO₂ alttaşının ve XRD' nin Cu K α zirvesine karşılık gelir. XRD sonuçları açık bir şekilde, V₂O₅ formunun 450 derecede oluşmaya başladığını, VO₂ formunun ise 600 derece gibi daha yüksek sıcaklıklarda oluşmaya başladığını gösterdi. Ayrıca XRD sonuçları, 450°C' de

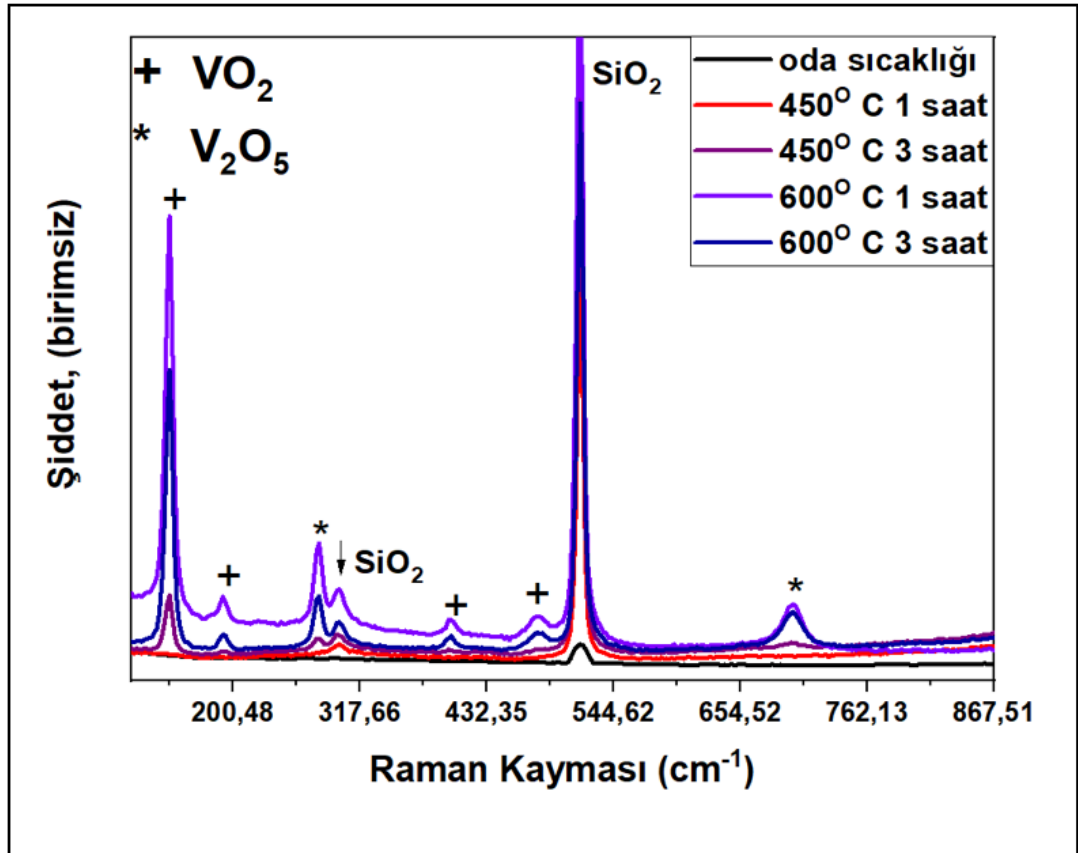
sadece V_2O_5 ' in kristalleştiğini, 600°C ' de ise hem VO_2 hem de V_2O_5 ' in birlikte kristalleştiğini açıkça gösterdi. Dolayısıyla 600 derecede tavlanan filmler VO_2 ve V_2O_5 kristal yapılarından oluşan homojen olmayan yapılardır. XRD sonuçlarından genel olarak amorf VO_2 ince filmlerin ısıtılma işlemle kristal yapılara dönüştürülebileceğini anlıyoruz. Ancak amorf VO_2 yapıları yapılan ısıtılma işlemlerle çoğunlukla V_2O_5 formunda kristalleşme eğiliminde olmuştur. Bu durum literatürde de belirtildiği gibi atmosfer ortamında veya yoğun oksijen ortamında gerçekleştirilen tavlama işleminden kaynaklanmaktadır. Vanadyum metalinin aşırı oksijen ilgisi de bu durumda etkilidir. Saf kristal VO_2 yapıları elde etmek için tavlamanın oksijenin sınırlı olduğu 600°C gibi yüksek sıcaklıklarda yapılması gerekmektedir.



Şekil 4.10: Isıl işlem görmüş VO_2 filmlerin XRD spektrumu.

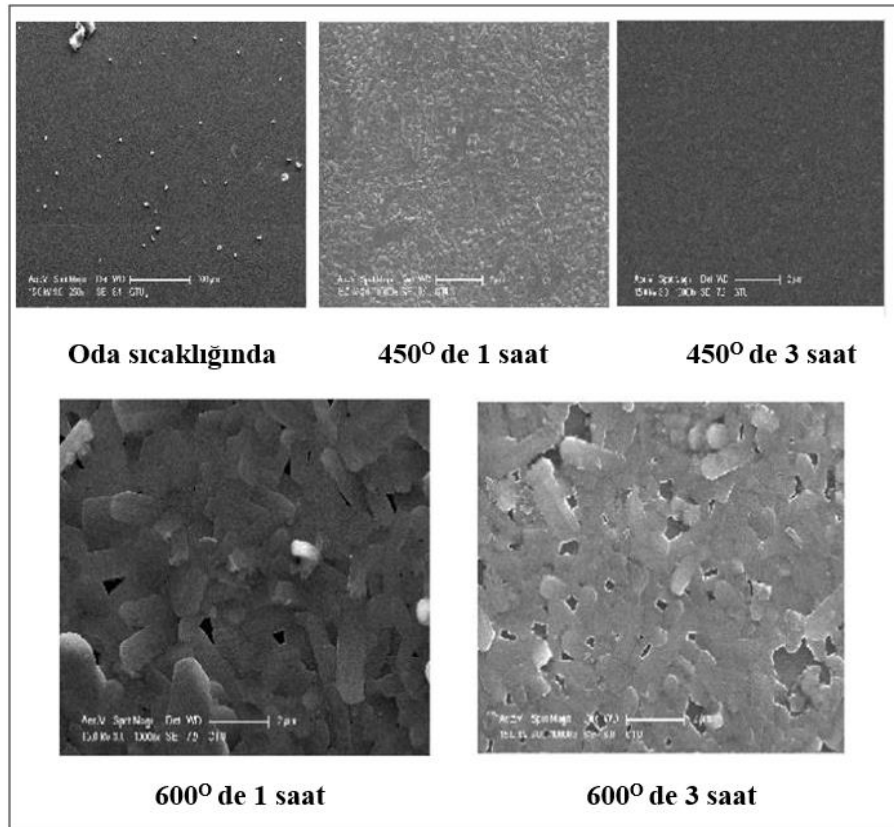
Şekil 4.11 büyütülmüş ve termal olarak işlenmiş VO_2 filmlerinin Raman spektrumlarını göstermektedir. Spektrumda Raman saçılımı 140.93 , 190.99 , 280.44 , 400.49 , 477.55 ve 700 cm^{-1} ' de karakteristik bantlara sahiptir. $140,93$ ve $190,99\text{ cm}^{-1}$,

deki bantlar düşük frekans bantları olup V-V titreşimlerini, 400,49 ve 477,55 cm^{-1} ' deki bantlar ise V-O bağlarının titreşimlerini temsil etmektedir [125], [126]. Ayrıca 280,44 ve 700 cm^{-1} ' deki bantlar V_2O_5 formundan kaynaklanan titreşimlerdir [127]. XRD ölçümleri gibi, Raman ölçümleri de ısıtılmış VO_2 ince filmlerin VO_2 ve V_2O_5 ' in karışık formunda kristalleştiğini açıkça ortaya koyuyor. Ayrıca düşük sıcaklıkta ve düşük tavlama süresinde yapılan ısıtılmalarda bağ titreşimleri gözlenmezken, sıcaklık değerleri ve tavlama sürelerinin artmasıyla karakteristik bağ titreşimleri ortaya çıkmıştır. XRD sonuçlarında olduğu gibi Raman ölçümlerinde de kristal VO_2 bandını temsil eden bant titreşimleri düşük sıcaklıktaki termal işlemlerle elde edilememiştir. Çünkü düşük sıcaklıkta VO_2 filmleri kristalleşmeyi sağlayacak yeterli termal enerjiye sahip değildi. Bu nedenle kristal VO_2 bağ yapılarının oluşumunu sağlayacak yeterli aktivasyon enerjisine ulaşamadı. 600° C gibi yüksek sıcaklık değerlerine veya yüksek ısıtılma sürelerine ulaşarak hem VO_2 hem de V_2O_5 ' in karakteristik bağ titreşimlerini sağlayacak gerekli aktivasyon enerjilerine ulaşılmıştır.



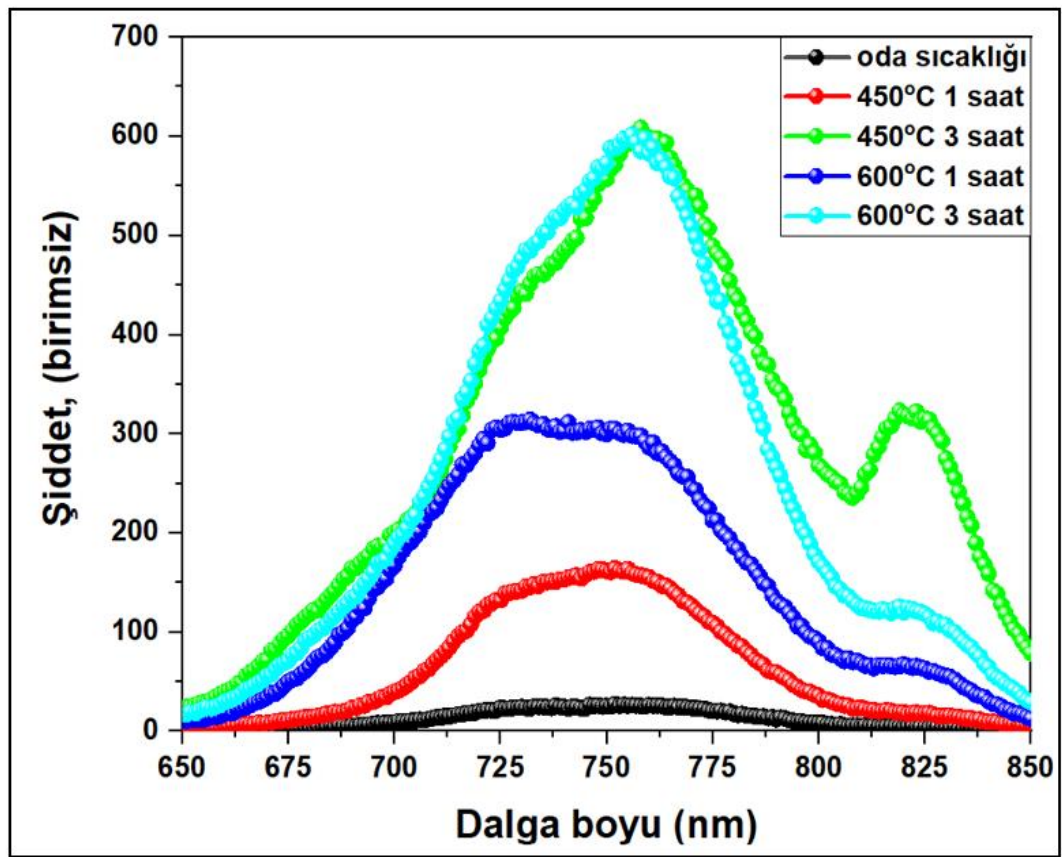
Şekil 4.11: Isıl işlem görmüş VO_2 filmlerin Raman spektrumu.

Şekil 4.12 büyütülmüş ve termal olarak işlenmiş VO₂ filmlerinin SEM görüntülerini göstermektedir. Isıl işlem etkisinin VO₂ filmlerinin yüzey mikro yapılarını değiştirdiği SEM görüntülerinden açıkça gözlemlenmiştir. En büyük değişiklik 600 °C’ de ısıl işleme tabii tutulan VO₂ filmlerinde meydana geldi. Filmlerin yüzey mikro yapılarının XRD ve Raman sonuçlarıyla da orantılı olarak, kristalleşmeyle birlikte değiştiği gözlemlendi. Ayrıca tüm ısıl işlemlerde film yüzeylerindeki topaklanmaların ortadan kalktığı görülmüştür. Ancak kristalleşmenin meydana geldiği yüksek sıcaklıklarda daha yoğun yüzey mikro yapıları gözlemlendi. Isıl işlemler film yüzeylerinde herhangi bir bozulmaya neden olmadı, sadece bu işlem filmlerin yüzey mikro yapılarını değiştirdi. SEM görüntülerinde en büyük değişimin meydana geldiği yüksek sıcaklıklar amorf VO₂ filmlerinin kristalleşmesi için yüksek termal enerji gerektirdiğini göstermektedir. Yüksek sıcaklıklara ulaşılmasıyla birlikte film yüzeylerinde daha yoğun görünen mikro yapılar ortaya çıktı. Bunun nedeni VO₂ filminin bağ yapılarının değişmesi veya yapının kristalleşmesi olabilir. Ayrıca filmlerin yüzey mikro yapıları, kristalleşmenin en fazla meydana geldiği sıcaklıklarda düzenli bir yüzey görünümüne sahip değildi. Bunun nedeni, filmlerin karışık fazda kristalleşmesi olabilir.



Şekil 4.12: Isıl işlem görmüş VO₂ filmlerin SEM görüntüsü.

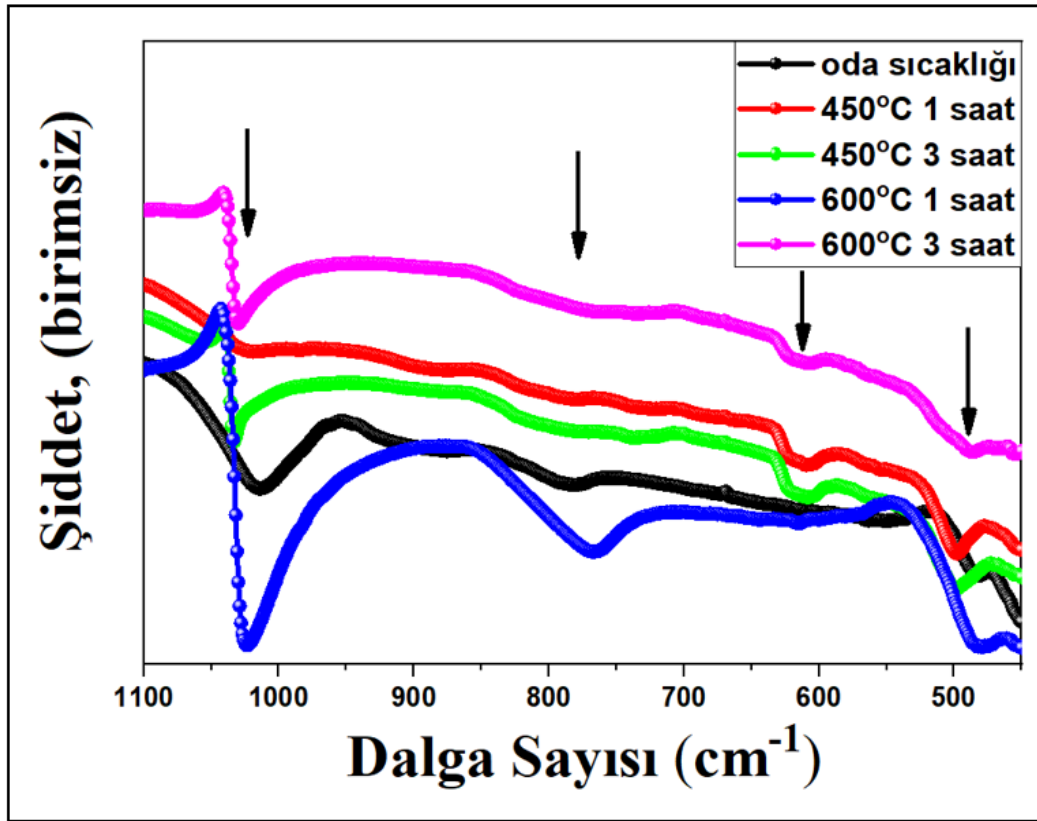
Şekil 4.13 büyütülmüş ve ısıtılmış ve ısıtılmış VO₂ filmlerinin PL spektrumunu gösteriyor. PL spektrumları genellikle uyarılma ve emisyon tepe noktalarından oluştu. Bu tez çalışmasında biz VO₂ tabanlı cihazlardaki öneminden dolayı emisyon zirvelerine odaklanıyoruz. Çünkü emisyon pikleri yapıdaki oksijen boşluklarından kaynaklanır ve bu oksijen boşlukları VO₂ tabanlı cihazların çalışmasında etkin rol oynar [128], [129]. Karakteristik emisyon zirveleri spektrumun yaklaşık 750 nm' sinde meydana geldi. Bu emisyon zirveleri, ısıtılma sıcaklığı ve süresinin artmasıyla birlikte artma eğiliminde oldu. Ancak daha uzun süreli ısıtılma işlemlerin daha fazla oksijen kusuruna yol açtığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.13: Isıtılmış VO₂ filmlerinin PL spektrumu.

Büyütülmüş ve ısıtılmış filmlerin FTIR spektrumları Şekil 4.14' de verilmiştir. Spektrumda oldukça farklı karakteristik titreşim bantları gözlemlendi. 480 ile 502 cm⁻¹ aralığındaki titreşimler V-O-V gerilme titreşimlerine karşılık gelir. Büyütülmüş filmin durumuna göre ısıtılma işlemi bu aralıktaki bantlarda kayma gözlemlenmiştir. Spektrumda 608 ile 616 cm⁻¹ arasında karakteristik bantlar bulunmaktadır. Bunlar VO₂ formundaki ana titreşim modlarıdır ve V-O-V bağlarından

kaynaklanırlar. Isıl işlemle bu aralıktaki bantların ortaya çıktığı gözlemlendi. Ayrıca spektrumda VO₂' nin kristal olmayan V-O bağına karşılık gelen titreşim bantları da vardır. Bunlar 768 ile 785 cm⁻¹ arasındaki bantlardır [130], [131], [132]. Isıl işlemin ince filmlerin bağ yapısını değiştirebildiğini FTIR spektrumlarından açıkça görebiliriz. FTIR spektrumunda 608 ile 616 cm⁻¹ arasındaki bantlar oldukça ilgi çekicidir. XRD ve Raman sonuçlarıyla yorumladığımızda bu titreşim bantları filmin kristalleşmesinden kaynaklanan bantlardır. Çünkü bu titreşim bantları büyüyen filmde bulunmayıp ısıtılımlerle ortaya çıkmıştır. Ancak spektrumdaki diğer titreşim bantları, büyütölmüş VO₂ filminde gözlemlendiğı ve ısıtılımlle hayatta kaldığı için amorf VO₂ formundaki V-O-V ve V-O titreşim bantlarıdır.

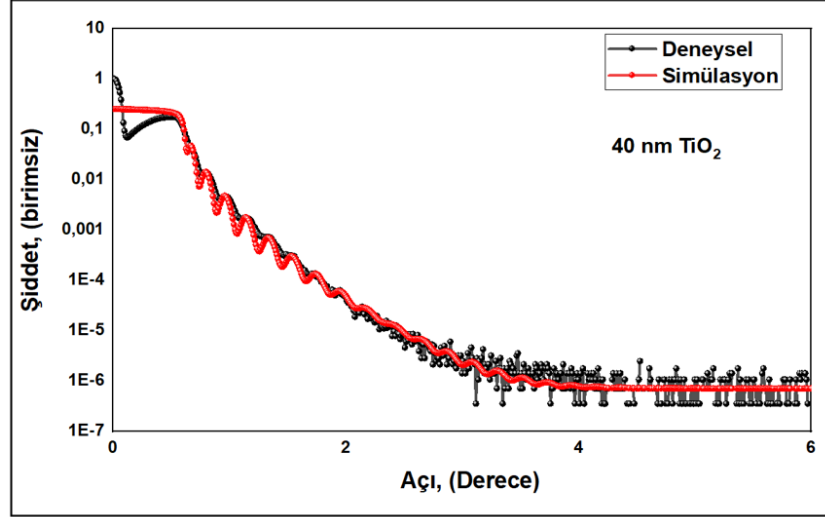


Şekil 4.14: Isıl işlem görmüş VO₂ filmlerin FTIR spektrumu.

4.3. TiO_x İnce Filmlerin Üretimi ve Yapısal Karakterizasyonu

TiO₂ metal oksit yapılar PLD sistemi kullanılarak üretilmiştir. Bu süreçte PLD sisteminde film üretim süresi değiştirilerek farklı kalınlıklarda filmler başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Üretilen filmlerin kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve yoğunlukları

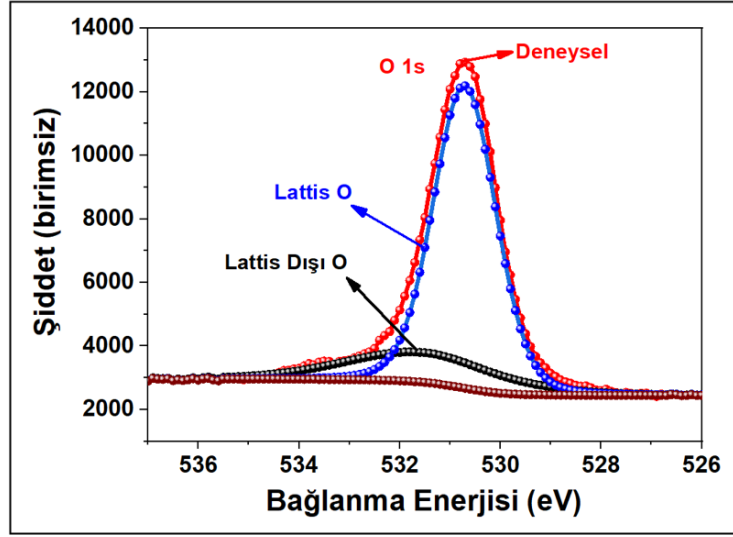
X- ışını yansıtma (XRR) tekniği ile belirlenmiştir. Üretilen filmlerin XRR analizlerini yaptığımızda, film kalınlığının artışıyla yoğunlukta az da olsa bir artış gözlemledik. Fakat film kalınlığının yüzey pürüzlülüğüne bir etkisi olmamıştır.



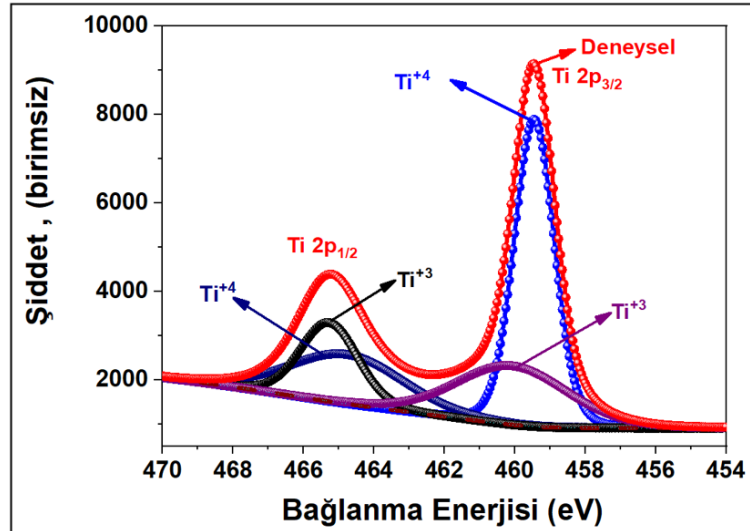
Şekil 4.15: 40 nm kalınlığındaki TiO₂ ince filmin XRR ölçüm grafiği.

Büyütülen filmlerin büyütme sonrası herhangi bir ışıl işleme maruz kalmayınca kristal yapıya sahip olmadığını öğrendik. Çünkü kullandığımız PLD büyütme sisteminin maksimum sıcaklığı yaklaşık 400⁰ C olup bu değeri kristal TiO₂ filmleri üretmek için oldukça yetersizdir. Yaptığımız literatür araştırmalarında kristal TiO₂ ince film yapıları üretmek için daha yüksek sıcaklık değerlerine gereksinim duyulmuştur [133]. Üretilen TiO₂ filmlerin kimyasal bileşimi ve oksidasyon durumları X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) yöntemi ile incelendi. XPS sonuçlarını incelediğimizde TiO₂ yapısının oluşumunu temsil eden Ti_{2p} ve O_{1s} karakteristik piklerini görmekteyiz. Elde edilen Ti_{2p} ve O_{1s} karakteristik piklerinin bağlanma enerjileri literatürde yapılan çalışmalarla uyumludur. Elde edilen tüm filmler iyi bir O/Ti görece konsantrasyonuna sahip olmuşlardır. XPS sonuçları TiO₂ yapısının mevcudiyetini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Filmlerin O_{1s} spektrumlarını detaylı incelediğimizde, O_{1s} spektrumları iki tepe noktasına ayrılmışlardır. Yüksek olan pik TiO₂ latis yapısındaki O⁻² den kaynaklanırken, daha düşük olan pik yüzey kusurları ya da absorbe edilmiş oksijen iyonlarından kaynaklanabilir. Ti elementine ait XPS pikleri spin-yörünge etkileşmesinin sonucunda 460 eV civarında ayrıık iki pik şeklinde gözlemlenmiştir. Bu piklerden zayıf olanı p_{1/2} diğeri p_{3/2} yörüngelerine aittir.

Ayrıca Ti 2p spektrumunda Ti^{+4} ve Ti^{+3} gibi değişik valans yüküne sahip TiO bileşiklerinin varlığı söz konusudur [84].

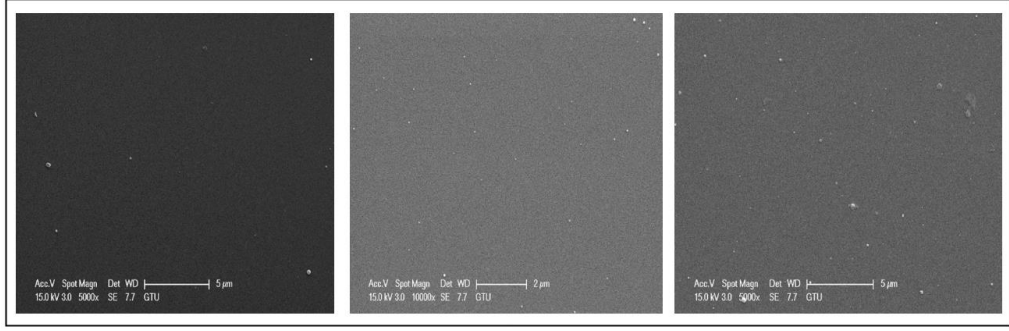


Şekil 4.16: TiO_2 ince film O 1s XPS spektrumu.



Şekil 4.17: TiO_2 ince film Ti 2p XPS spektrumu.

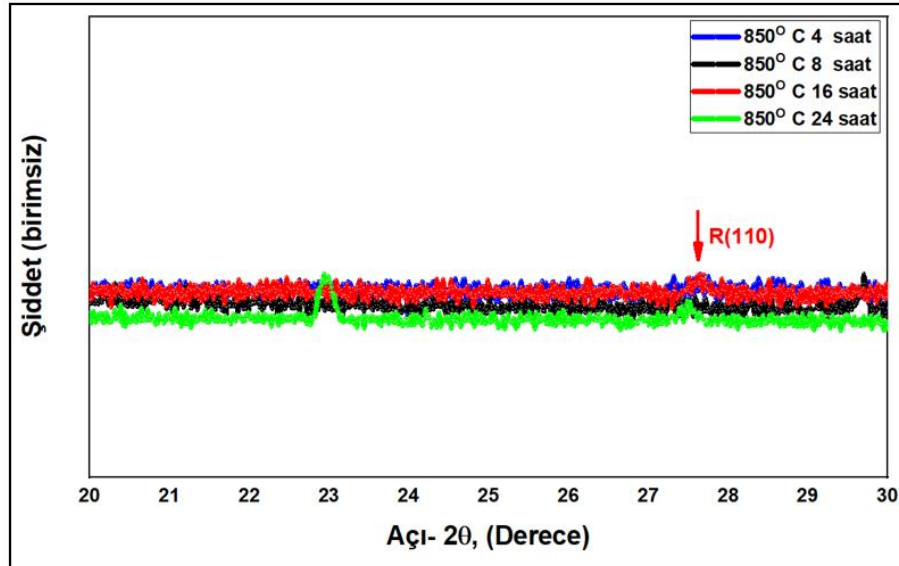
Filmlerin yüzey mikro yapıları tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Üretilen tüm filmlerin düzgün ve homojen olduğu gözlemlenmiş ve film yüzeylerinde çatlak gibi herhangi kusura rastlanmamıştır. Isıl işlem öncesi filmlerin yüzey mikro yapıları amorf ince filmlerde rastlanan yapılardaki gibi olmuştur.



Şekil 4.18: Farklı kalınlıklara göre TiO₂ ince filmlerin SEM görüntüleri.

4.4. TiO_x İnce Fimlerin Termal İşlemeYapısal Özelliklerinin İncelenmesi

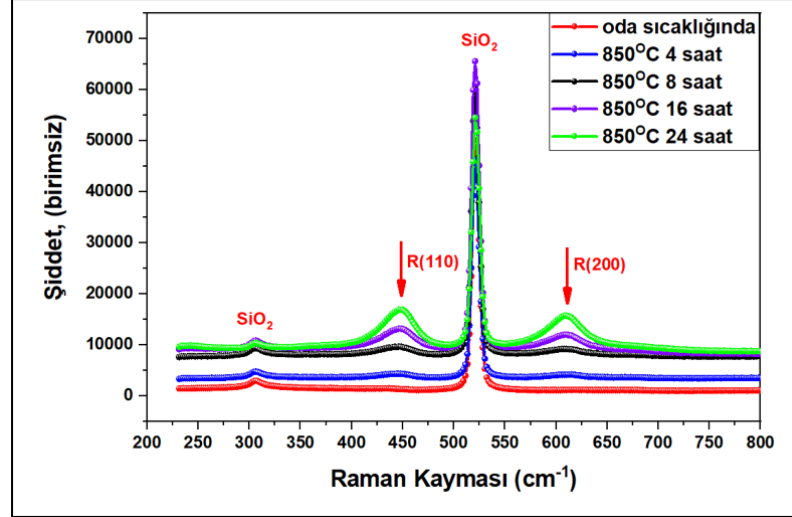
Büyütme sonrasında TiO₂ filmlere ısıt işlem uygulayarak filmlerin kristal yapısının gelişimini inceledik. Bu aşamada ısıt işlem süresinin ve sıcaklığının fonksiyonu olarak 2 ısıt işlem türü gerçekleştirdik. İlk olarak sabit sıcaklıkta farklı sürelerde ısıt işlem gerçekleştirdik. Yaklaşık 850°C’ de farklı sürelerde gerçekleştirilen tüm ısıt işlemler sonrasında filmlerin rutil (110) karakteristik pikine sahip olduğunu gözlemledik. Değişen ısıt işlem süresi ile rutil (110) pikinde çok az derecede değişiklikler olmuştur.



Şekil 4.19: Isıt işlem görmüş TiO₂ filmlerin XRD spektrumu.

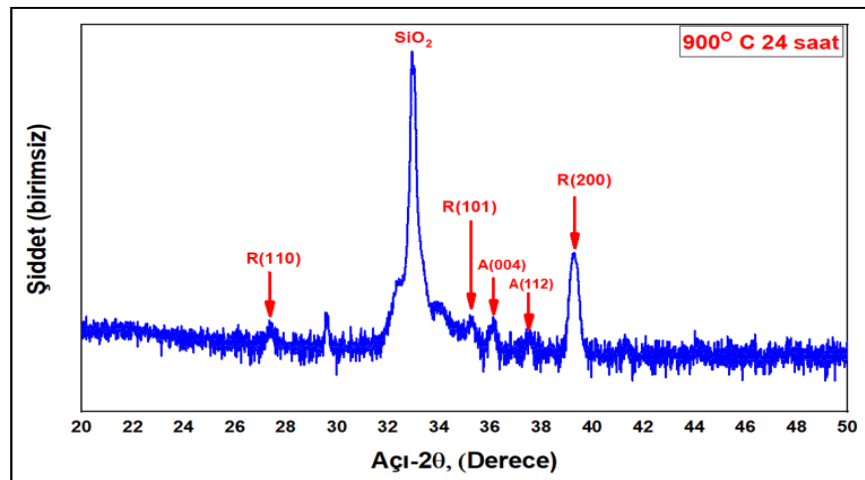
Aynı filmlerin ısıt işlem sonrası kristal yapı gelişimini Raman spektroskopisi tekniği ile de inceledik. Bu yöntemde XRD tekniğinden farklı olarak diğer karakteristik rutil

pikininde oluştuğunu gözlemledik. Isıl işlemler sonrasında filmler hem rutil (110) ve hem de rutil (200) piklerine sahip olmuşlardır. Artan ısıtım süresi ile karakteristik rutil pikleri daha belirgin olmuşlardır.



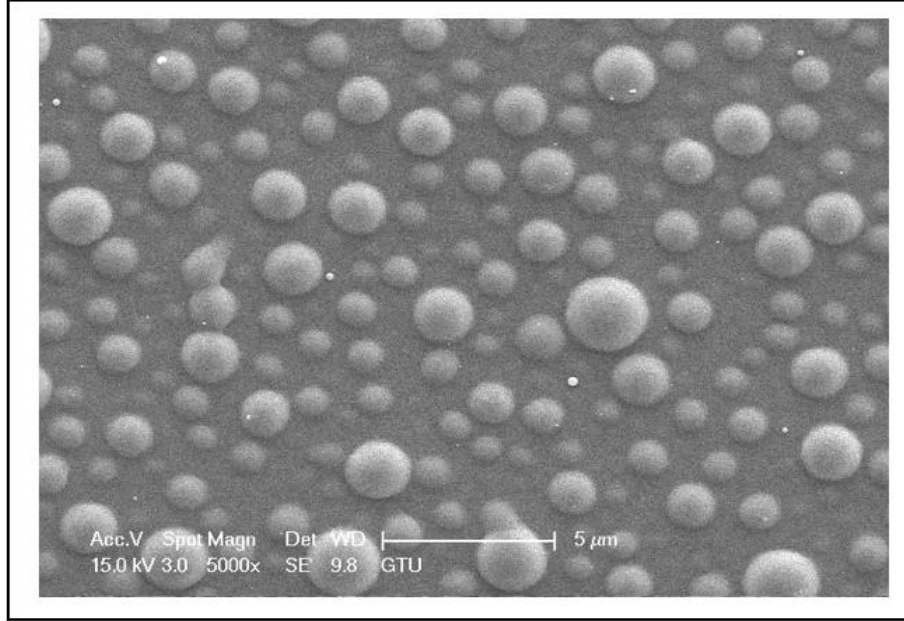
Şekil 4.20: Isıl işlem görmüş VO₂ filmlerin Raman spektrumu.

Büyütme sonrası ısıtım sıcaklığını daha yüksek değerlere çıkararak kristal yapı gelişimini incelediğimizde kristal yapı oluşumunu temsil eden daha fazla karakteristik anataz ve rutil piklerin meydana geldiğini gözlemledik. Genel olarak ısıtım sıcaklığı ve süresinin TiO₂ kristal yapı gelişiminde önemli etkiye sahip olduğunu gözlemledik. Belirtilen tüm karakterisitk rutil ve anataz pikler literatürde yapılmış çalışmalarla uyumludur [88].



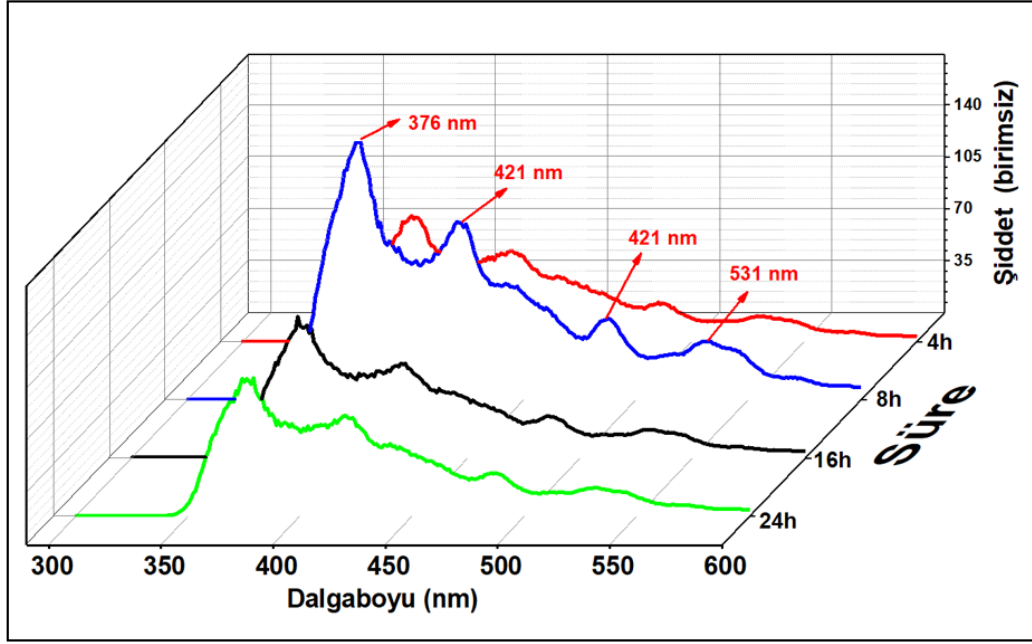
Şekil 4.21: Yüksek sıcaklık ısıtım işlem görmüş TiO₂ filmlerin XRD spektrumu.

Isıl işlem öncesi ve sonrası filmlerin SEM görüntülerini karşılaştırdığımızda, ısıtıl işlem sonrasında film yüzeylerinde kristal yapı oluşumunu temsil eden küresel yapıların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca ısıtıl işlem ile filmlerin yüzey mikro yapıları belirgin şekilde değişmiştir fakat uygulanan ısıtıl işlemler film yüzeylerinde herhangi bir kusura neden olmamıştır.



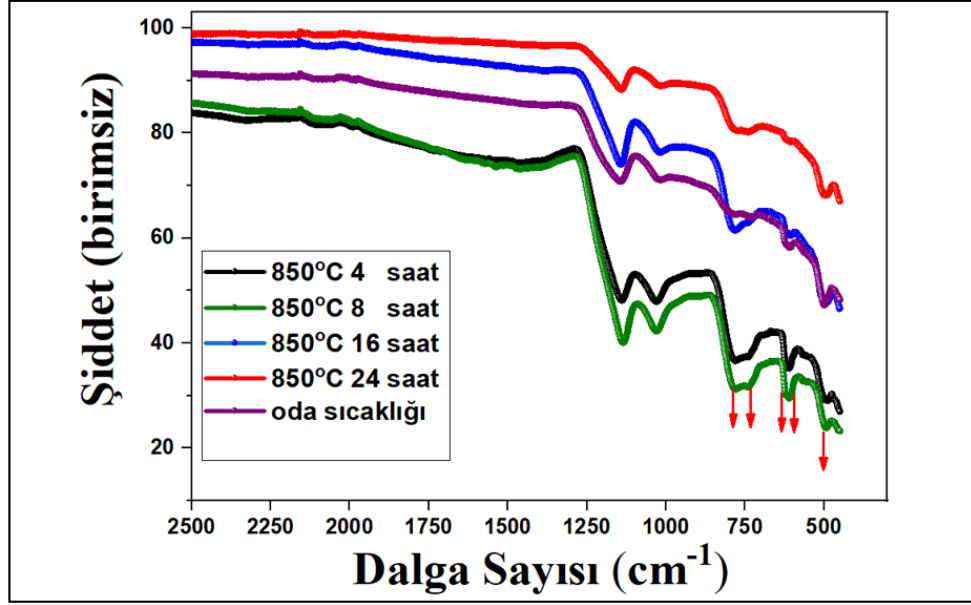
Şekil 4.22: Isıl işlem görmüş TiO₂ filmlerin SEM görüntüsü.

TiO₂ ince filmlerdeki tuzak durumlarını ve oksijen boşluğu kusurlarını incelemek için fotolüminesans spektroskopisi (PL) ölçümleri gerçekleştirdik. Farklı ısıtıl işlem sürelerinde kaydedilen TiO₂ ince filmlerin fotolüminesans spektrumları şekil 4.23’ de gösterilmektedir. PL spektrumlarında her ince film için 4 pik gözlemlendi. Bu pikler sırasıyla 376, 421, 487, ve 531 nm’ de merkezlenmişlerdir. Bu spektrum, literatürdeki diğer TiO₂ nano yapılarının PL özellikleri üzerine yapılan çalışmalarla tutarlıdır. Spektrumu oluşturan pikleri detaylı olarak incelediğimizde 376 nm’ deki emisyonu eksitonik emisyon olarak tanımlayabilirken, diğer emisyonlar ise oksijen kusurlarından kaynaklı emisyon pikleridir. PL ölçümleri genel olarak TiO₂ ince film yapılarda oksijen kusurlarının mevcudiyetini ve ısıtıl işlem ile bu oksijen kusurlarının değiştiğini bildirmektedir.



Şekil 4.23: Isıl işlem görmüş TiO_2 filmlerin PL spektrumu.

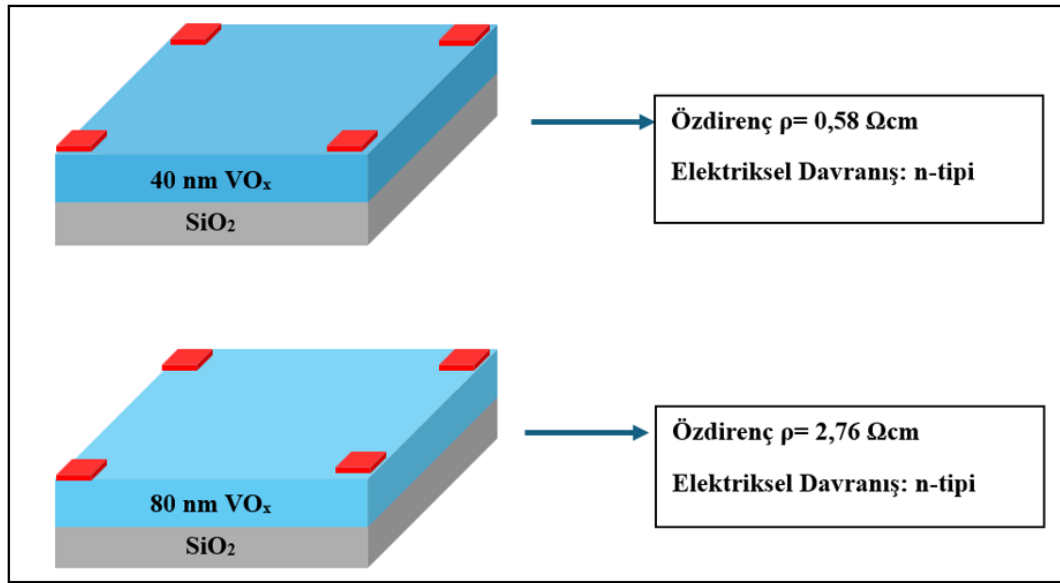
Isıl işlemin, TiO_2 ince filmlerdeki fonksiyonel gruplara etkisini incelemek için Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrofotometre (FTIR) ölçümleri gerçekleştirdik. Bu yöntem kullanılarak malzemenin yapısal değişimi ve bileşikleri oluşturan elementlerin bileşimindeki değişim hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir. Şekil 4.24 büyütülmüş ve ısıtılmış TiO_2 ince filmlerin FTIR spektrumunu göstermektedir. FTIR spektrumunu incelediğimizde karakteristik absorpsiyon piklerini görmekteyiz. Bu absorpsiyon piklerini karakterize ettiğimizde, 495, 615, 621, 741 ve 782 cm^{-1} deki absorpsiyon pikleri Ti-O-Ti bağının titreşimlerinden kaynaklanmaktadır. Bu karakteristik piklerin varlığı filmlerde Ti-O-Ti bağlarının oluştuğunu ve filmlerde TiO_2 yapısının geliştiğini gösterir. Uygulanan ısıtılmış işlem ile bazı piklerin durumunda değişimler gözlemlenmiştir, bu durum uygulanan ısıtılmış işlem ile TiO_2 kristal yapısının geliştiğini ve artan ısıtılmış süreleri ile TiO_2 kristal yapısının anataz yapıdan rutil yapıya geliştiğini göstermektedir [134], [135], [136].



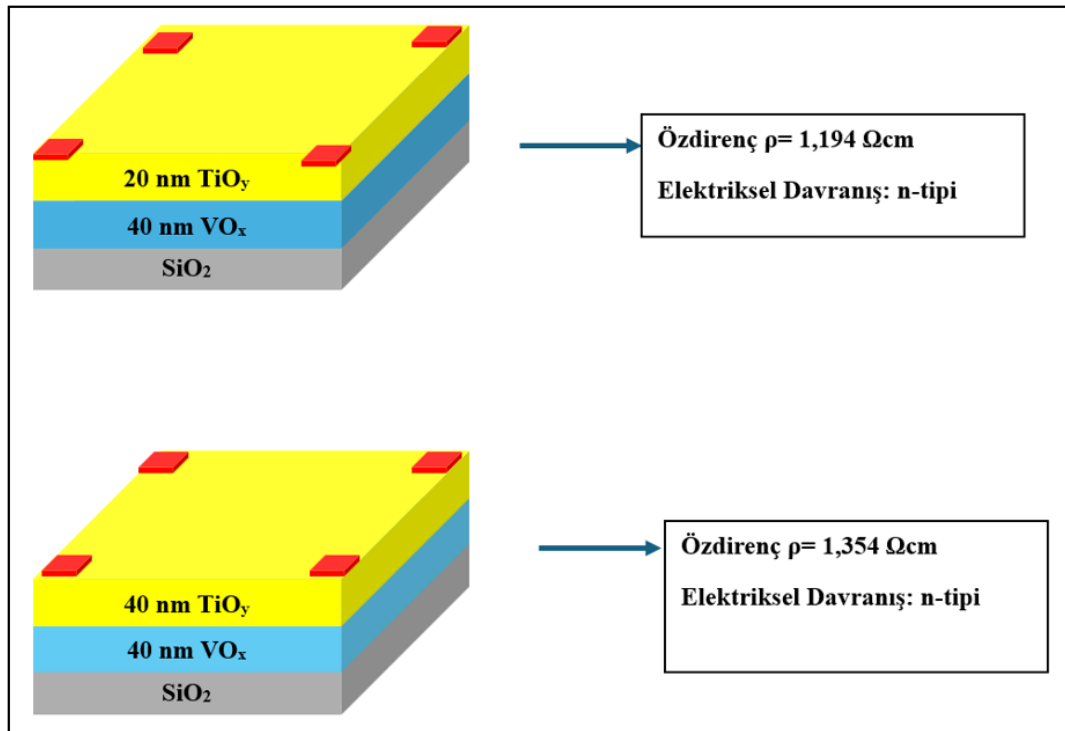
Şekil 4.24: Isıl işlem görmüş TiO_2 filmlerin FTIR spektrumu.

4.5. VO_x ve TiO_y İnce Fimlerin Elektriksel Özellikleri

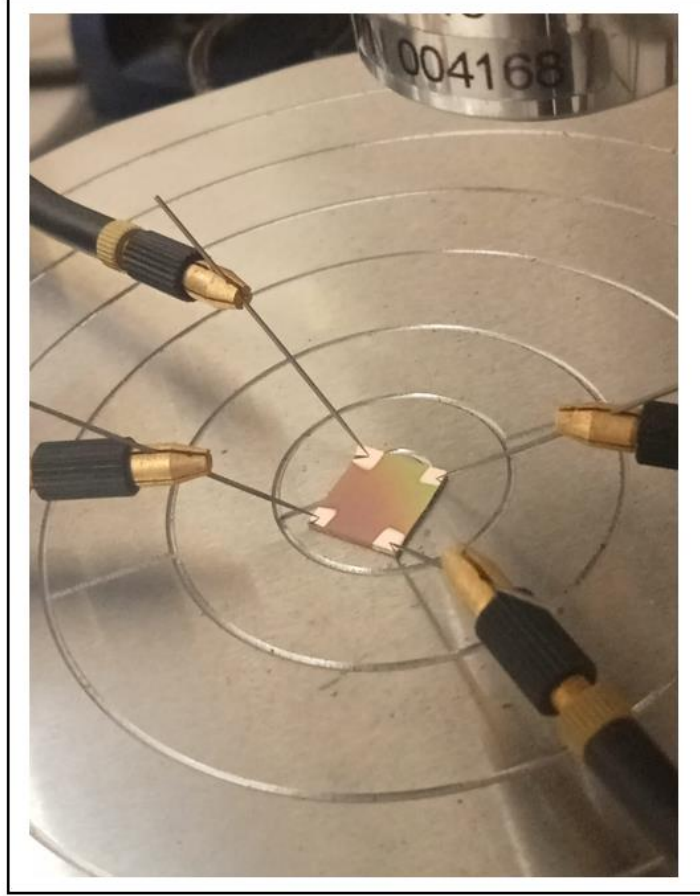
Tez çalışması kapsamında üretilen ince film yapıların yapısal karakterizasyonuna ek olarak elektriksel karakterizasyonlarında gerçekleştirilmiştir. Elektriksel karakterizasyonlarda VO_x ve VO_x/TiO_y ince filmlerin Van Der Pauw methodu kullanılarak yüzey dirençleri ve yarıiletken davranışları incelenmiştir. Sonuçlar artan film kalınlığı ile tüm ince film yapıların yüzey özdirenç değerlerinin arttığını göstermiştir. Ayrıca filmlerin elektriksel karakterizasyonları onların n-tipi bir yarıiletken yapıda olduklarını gösterdi. Bu durum onların yapısal olarak oksijen boşluklarına sahip olduklarını göstermiştir. Çünkü hem VO_2 hem de TiO_2 , oksijen boşlukları (Vo) nedeniyle n- tipi bir yarı iletkenler ve onların oksijen kaybı derecesi arttıkça iletkenlikleri artan oksit bileşiklerdirler [137], [138]. Yapısal karakterizasyonda gerçekleştirilen PL ölçümleride bu tez çalışmasında sentezlenen VO_x ve TiO_y yapıların oksijen boşluklarına sahip olduğunu göstermişti. Böylece sentezlenen bu yapıların n-tipi bir yarıiletken olmaları ve doğal olarak oksijen boşluklarına sahip olmaları PL sonuçlarıyla uyumlu olmuştur. Sonuç olarak elektriksel karakterizasyonlar sentezlenen VO_x ve VO_x/TiO_y yapılarının kalınlıkları arttıkça yüzey özdirençlerinin arttığını ve onların doğal olarak oksijen boşluklarına sahip olmaları nedeniyle n-tipi yarıiletken karakteristiğe sahip olduklarını gösterdi.



Şekil 4.25: Van Der Pauw yöntemi ile VO_x filmlerin elektriksel karakterizasyon sonuçları.



Şekil 4.26: Van Der Pauw yöntemi ile VO_x/TiO_y filmlerin elektriksel karakterizasyon sonuçları.

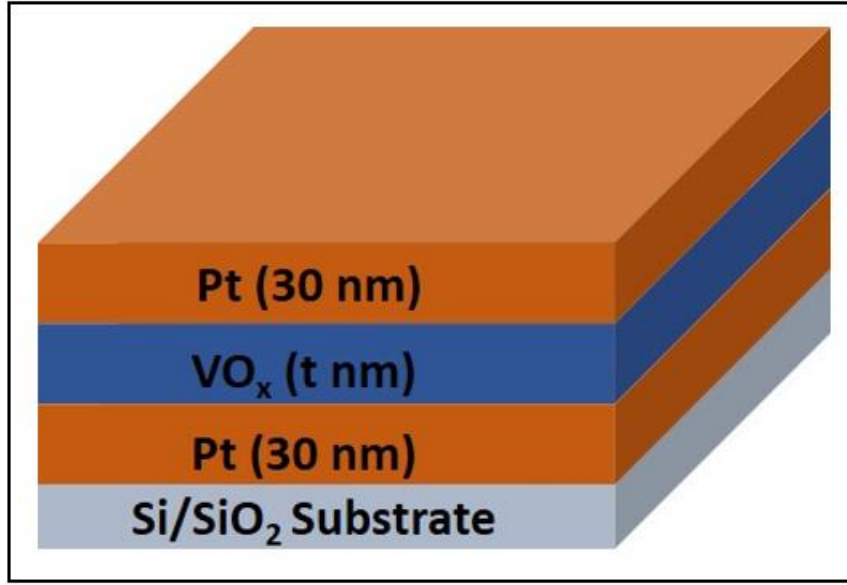


Şekil 4.27: Van Der Pauw yöntemi ile ince filmlerin elektriksel karakterizasyonu.

5. VO_x VE VO_x/TiO_y TEK HÜCRELİ MEMRİSTÖR CİHAZLARIN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

5.1. VO_x Tek Hücreli Memristör Cihazların Üretilmesi ve Karakterizasyonu

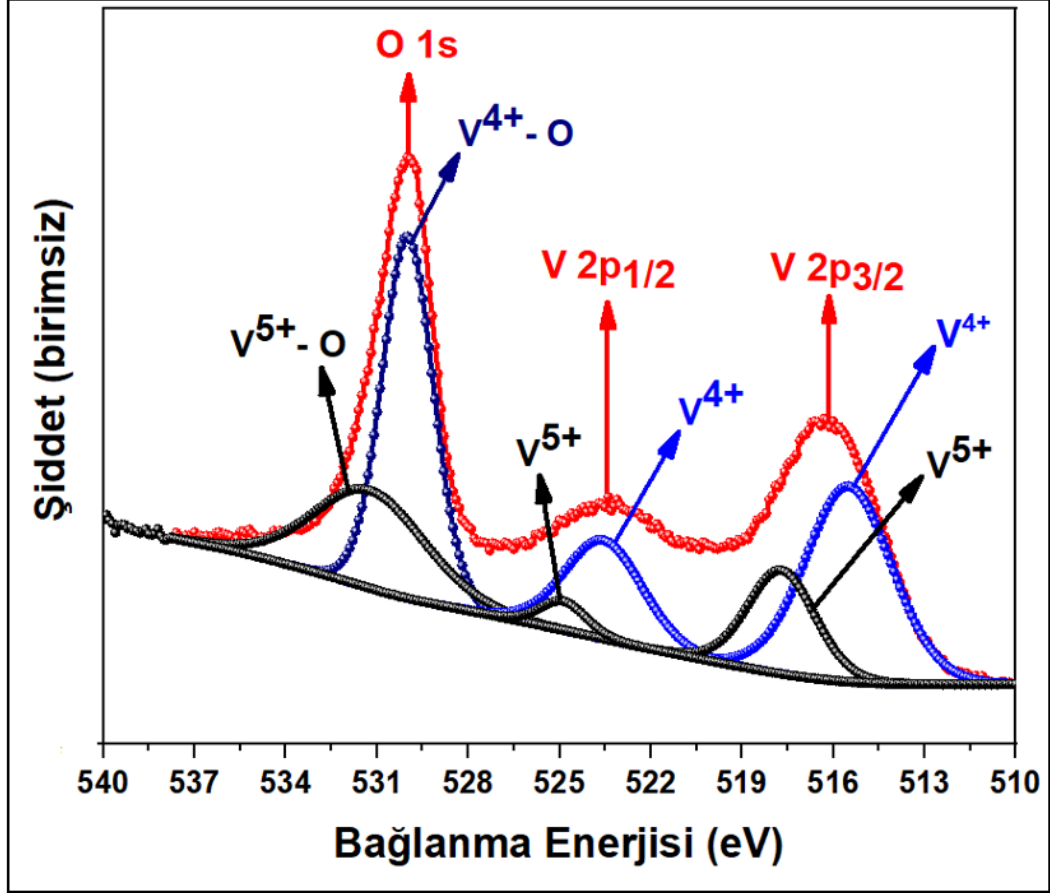
Bu tez çalışması kapsamında Si/SiO₂/Pt/VO_x/Pt yığın yapısındaki memristör cihazlar 10⁻⁹ mbar taban basıncında Darbeli Lazer Biriktirme (PLD) ve DC Magnetron Püskürtme sistemleri kullanılarak üretildiler. Ticari olarak temin edilebilen ve kendi kendine oksitlenebilen Si(100) alttaşının kimyasal ve termal temizliğinden sonra, bir DC magnetron püskürtme odasında bu alttaşlar üzerine 30 nm kalınlığında alt Pt elektrotlar büyütüldü. Daha sonra bu yapılar PLD odasına aktarıldı ve darbeli lazer biriktirme (PLD) yöntemi kullanılarak alt elektrotlar üzerine 25 nm, 13 nm ve 3 nm kalınlığındaki VO_x ince film yapıları biriktirildi. Bu iki büyüme odası, vakum koşullarının korunduğu bir bağlantı sistemi aracılığıyla birbirlerine bağlantılıdır. PLD sisteminde VO_x oksit katmanlarının büyümesi süresince, VO₂ PLD hedefi ile alttaş arasındaki mesafe 24,8 mm' de sabit tutuldu. PLD sisteminde KrF excimer lazer ($\lambda=248$ nm) 350 mJ' de çalıştırıldı ve lazerin tekrarlama oranı 10 Hz olarak ayarlandı. Oksit katmanlarının büyümesi süresince tüm PLD parametreleri aynı kaldı ve tüm alttaşlar bu süre boyunca düşük bir hızda döndürüldüler. Son olarak 30 nm Pt üst elektrotlar oksit katmanların üzerine biriktirildiler. Büyütmeler süresince alt ve üst elektrotlar aracılığıyla elektrik bağlantısını sağlayacak yüzey alanları için metalik maske kullanıldı. Üst elektrotlar yaklaşık 1 mm²' lik yüzey alanına sahiptiler.



Şekil 5.1: Tek hücreli memristör cihazların sistematik şekli.

Memristör cihazlardaki VO_x filminin yüzeyinin bileşim oranlarını ve vanadyum elementinin oksidasyon durumlarını incelemek için, büyütülmüş VO_x ince filmleri üzerinde X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) ölçümleri yapıldı. Şekil 5.2 oda sıcaklığında 540 ve 510 eV bağlanma enerjisi aralığında VO_x ince film için yüksek çözünürlüklü XPS spektrumlarını ve ayrıca CasaXPS yazılımı kullanılarak deneysel XPS spektrumlarının simülasyonunu göstermektedir. Bu enerji aralığında oksijen (sol taraftaki pik) ve vanadyum (sağ taraftaki pik) iyonlarından kaynaklanan pikler bir arada görülmektedir. V metalinin pikleri spin-yörünge etkileşmesinden dolayı tipik iki pik ($2p_{1/2}$ ve $2p_{3/2}$) yapısını gösterir. V $2p_{3/2}$ ve V $2p_{1/2}$ piklerinin bağlanma enerjileri sırasıyla 516,3 ve 523,4 eV değerlerine karşılık gelmiştir. Fit işlemi sırasında V $2p_{3/2}$ ve V $2p_{1/2}$ arasındaki alan oranı 2:1 olarak sabitlenmiştir. XPS spektrumunda V^{+4} e ait piklerin, V iyonunun daha yüksek valans durumuna katkı nedeniyle genişlediği görülmektedir. Spektrumdaki V^{+4} nın göreceli tepe yoğunluğu, V^{+5} ya karşılık gelen tepelerin yoğunluğundan daha büyüktür. Yüksek yoğunluklu zirveler(V^{+4}) stokiyometrik duruma yakın VO_2 ye, düşük yoğunluklu zirveler ise VO_2 nin V_2O_5 fazlarına atfedilebilir. Spektrum V^{+4} nın $2p_{3/2}$ ve $2p_{1/2}$ si için deneysel verilerin fit edilmesinden elde edilen bağlanma enerjilerinin sırasıyla 515,8 eV ve 523,3 eV' ye denk geldiğini göstermiştir. Benzer şekilde, V^{+5} nın $2p_{3/2}$ ve $2p_{1/2}$ si için deneysel verilerin fit edilmesinden elde edilen bağlanma enerjileri ise sırasıyla 517,8 eV ve 524,9 eV' ye denk gelmiştir. Elde edilen bu bağlanma enerji değerleri literatürle

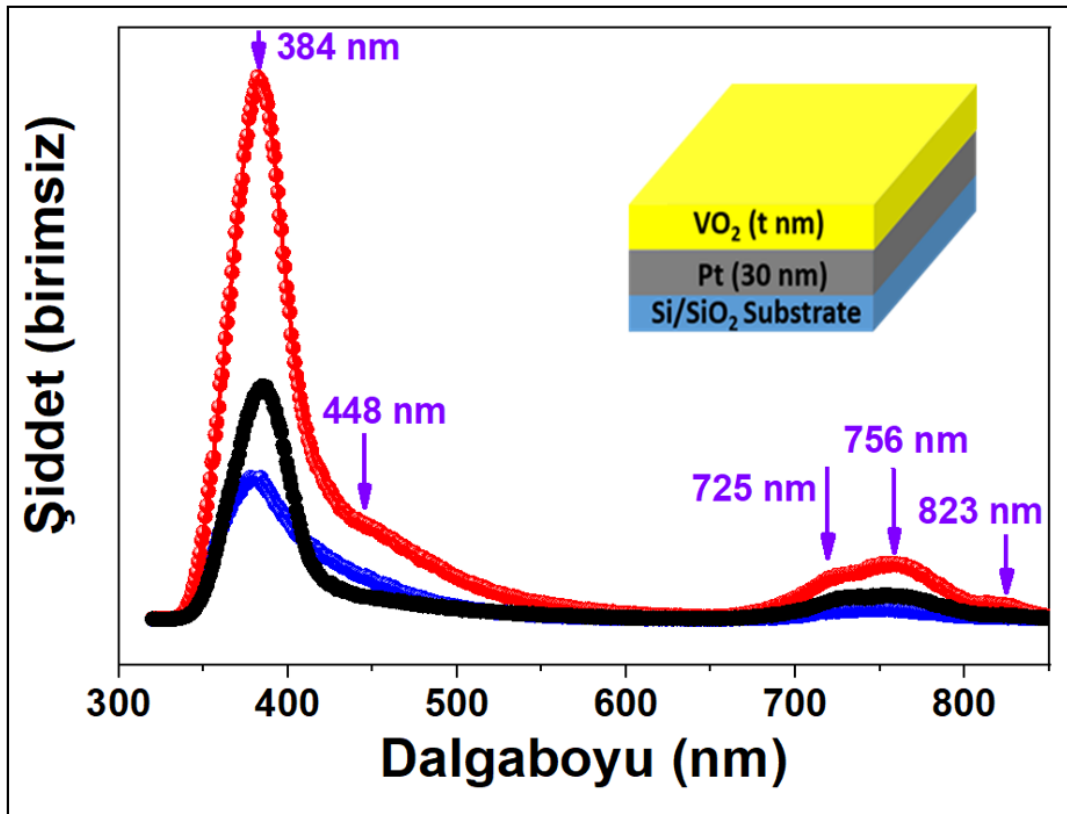
oldukça uyumludur. Buradaki V^{+5} piki film yüzeyinin oksidasyonundan kaynaklanır. Bununla birlikte, V^{+4} ya kıyasla nispeten düşük V^{+5} içeriği, VO_2 yapısındaki oksijenin yalnızca film yüzeyinin oksidasyonundan kaynaklanmadığını, aynı zamanda esas olarak Vanadyum' un oksijenle güçlü bağlanmasından kaynaklandığını gösterir. Değişen oksit film kalınlıklarındaki cihazların XPS spektrumlarında bağlanma enerjilerinde önemli bir değişiklik gözlenmedi [139], [140], [141].



Şekil 5.2: Memristör cihaz bileşenindeki oksit katmanın O 1s ve V 2p ortamının deneysel yüksek çözünürlüklü XPS spektrumu ve deneysel verilerin simülasyon sonuçları.

PL yöntemi, çeşitli sistemlerdeki oksijen boşlukları gibi içsel kusurları keşfetmek için kullanılan yaygın bir tekniktir. Çünkü oksijen boşlukları, metal oksitlerde uygulanan elektrik alanla iletkenliğin değişmesinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, bu tez çalışmasında üretilen VO_x tabanlı memristör cihazlarında oksijen boşluklarının varlığını sağlamak için VO_x ince filmleri üzerinde PL ölçümleri yaptık. Şekil 5.3 farklı kalınlıktaki VO_x ince filmler için oda sıcaklığında gerçekleştirilen Fotolüminesans

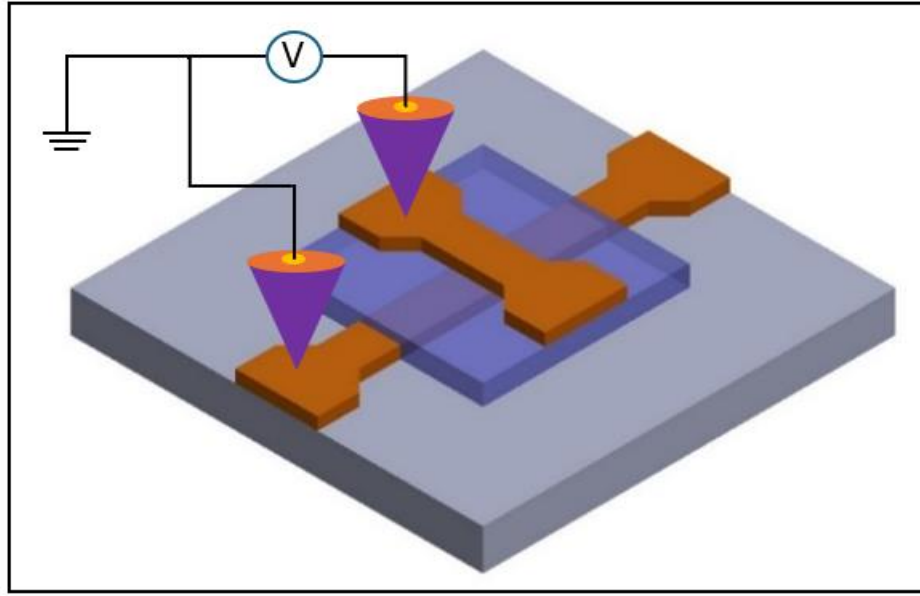
(PL) ölçümlerinin sonuçlarını göstermektedir. Literatürde PL ölçümleri nadir olmasına rağmen, onlara benzer PL spektrumları gözlemlenmiştir. Spektrumda görüldüğü gibi sırasıyla 384, 448, 725, 756 ve 823 nm’ de merkezlenmiş beş emisyon zirvesi meydana geldi. 384 nm’ deki en yoğun uyarım zirvesi, serbest uyarılma emisyonundan kaynaklanabilir. 448 nm civarındaki uyarılma zirveleri ise O=V ve O-V-O bağlarının bağlanma enerjisine karşılık gelen elektrik yükü transferine atfedilebilir. 750 nm civarındaki emisyon zirveleri, Vanadyum’ un d elektronlarının Oksijen’ in p yörünge deliklerine iletilmesiyle ilgilidir veya VO_x ince film yapılarındaki oksijen boşluklarından kaynaklanıyor olabilir. Film kalınlığının artmasıyla birlikte uyarılma pikleri daha dar bir dalga boyunda meydana gelirken, film kalınlığının artmasıyla birlikte oksijen boşluğundan kaynaklanan emisyon pikleri daha belirgin hale geldi. Sonuç olarak, PL spektrumu, memristör cihaz bileşenindeki VO_x ince filmlerinde oksijen boşluklarının bulunduğunu ve bu oksijen boşluklarının film kalınlığının artmasıyla artma eğiliminde olduğunu açıkça ortaya koydu [128], [142].



Şekil 5.3: Memristör cihaz bileşenindeki oksit katmanın PL spektrumu.

5.2. VO_x Tek Hücreli Memristör Cihazların DC Elektriksel Karakterizasyonu

Elektriksel karakterizasyonlarda alt elektrotlar daima topraklanmış, üst elektrotlara ise DC gerilimler uygulanmıştır. Tüm DC elektriksel ölçümler atmosferik koşullarda, oda sıcaklığında gerçekleştirildi. DC karakterizasyonlar için Keithley 2450 kaynak ölçer kullanıldı. Elektriksel ölçümler LabVIEW yazılım arayüzü kullanılarak oluşturulan ölçüm düzenekleri ile gerçekleştirilmiştir.



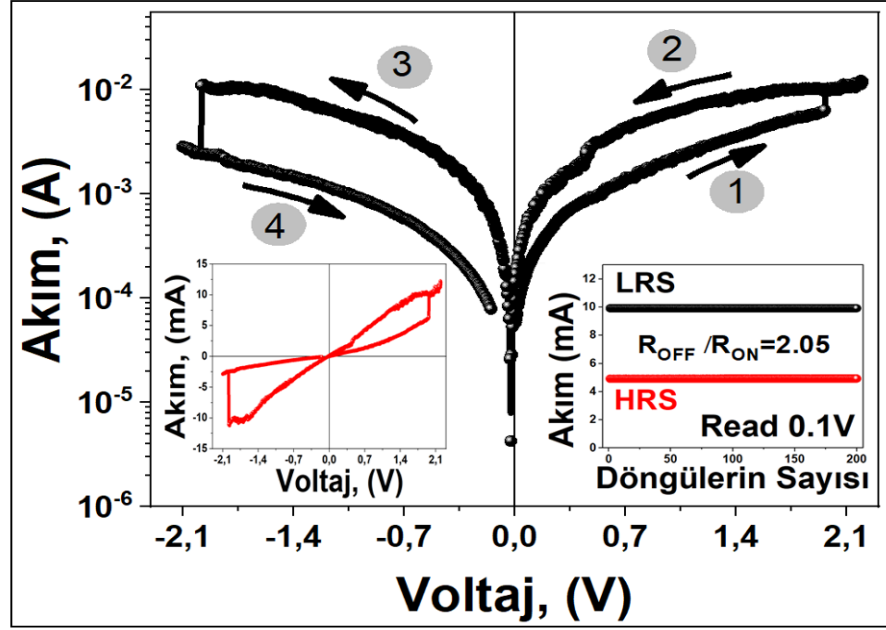
Şekil 5.4: Memristör cihazın fiziki yapısı ve elektriksel ölçüm düzeneği.

Şekil 5.5, 5.6 ve 5.7 farklı oksit kalınlıklarına sahip VO_x tabanlı tek hücreli memristör cihazların karakteristik akım-gerilim ölçümlerini ve dayanıklılık davranışını göstermektedir. Tüm cihazlar için elde edilen akım-gerilim grafikleri memristör cihazların parmak izi olarak kabul edilen sıkıştırılmış histerisis döngüsünü sergiledi. Cihazların üst elektrotlarına pozitif voltaj uygulandığında akımlarda kademeli bir artış meydana geldi ve bu durum SET işlemi olarak bilinen cihazlarda yüksek direnç durumundan düşük direnç durumuna geçişe neden oldu. Bu değişiklikler cihazların başlangıçta yüksek direnç durumlarında olduğunu göstermiştir. Bunun tersine üst elektrotlara negatif voltaj uygulandığında akımlarda kademeli bir azalma meydana geldi ve SET işlemin tam tersi olan RESET işlemi gerçekleşti. Yani cihazların direnci düşük dirençten yüksek dirence doğru değişti. Tüm cihazlar için elde edilen akım-gerilim özelliklerine göre, uygun pozitif ve negatif gerilimler uygulanarak cihazların

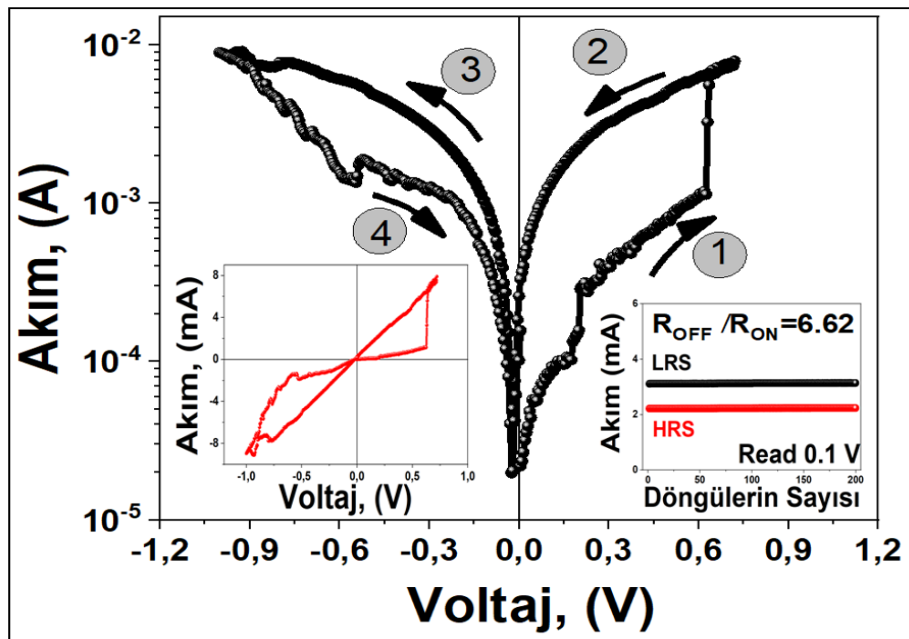
iletkenliğinin değiştirilebildiği ve tüm cihazların iki kutuplu direnç-anahtarlama özelliğine sahip olduğu görülmüştür. Farklı kalınlıktaki VO_x yapılarından oluşan cihazların SET ve RESET gerilimlerinde bazı farklılıklar gözlemlendi. Karakteristik SET ve RESET gerilimleri I-V eğrisinin türevinin maksimumu değeri ile belirlenmiştir. 25 nm VO_x oksit katmanına sahip memristör cihaz için SET ve RESET voltaj değerleri yaklaşık ± 2 V olmuştur. 3 nm VO_x oksit katmana sahip cihazın akım-voltaj davranışı aşamalı bir süreç göstermiştir ve kademeli de olsa I-V eğrisinin türevinin maksimum değeri SET ve RESET gerilimlerinin büyüklüğünü yaklaşık $\pm 0,94$ V civarında göstermiştir. Aksine, 13 nm oksit kalınlığa sahip memristör cihazın I-V eğrisindeki keskin değişiklikler nedeniyle SET voltaj 0,64 V ve RESET voltajı yaklaşık 0,85 V olmuştur. SET ve RESET gerilimlerine benzer şekilde, farklı VO_x kalınlıklarına sahip cihazların maksimum akım değerlerinde de farklılıklar gözlenmiştir. 25 nm kalınlığındaki cihazın ulaşabileceği maksimum akım değeri 9,6 mA iken bu değer 13 nm kalınlığındaki cihaz için yaklaşık 6,6 mA ve 3 nm kalınlığındaki cihaz için ise 4,2 mA olmuştur. Kalınlığın fonksiyonuna göre elde edilen bu değerler, cihazın maksimum akım değerlerinde, ve SET ve RESET gerilim değerlerinde film kalınlığının belirleyici faktör olduğunu göstermiştir. Pozitif ve negatif tarama işlemleri sırasında tüm cihazların bireysel maksimum akımları neredeyse eşit olmuştur. Hem bu durum hem de akımların kademeli olarak değişmesi, anahtarlamanın ağırlıklı olarak VO_x oksit yapısındaki oksijen boşluklarının oluşturduğu iletken filament yapılarından kaynaklandığını ortaya koymaktadır [143].

Sonuç olarak elde edilen anahtarlama davranışları, üretilen memristör yapıların memristif özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Direnç-anahtarlama davranışı gösteren memristör cihazların diğer önemli parametrelerinden biri de daha büyük histerisis döngü alanına sahip olmak için daha büyük R_{OFF}/R_{ON} oranına sahip olmalarıdır. Bu doğrultuda 25 nm VO_x oksit katmana sahip cihaz için uygulanan 1,675 V voltajda R_{OFF}/R_{ON} oranı 2,05 olmuştur. 13 nm VO_x oksit katmanlı cihaz için 0,525 V uygulanan voltajda bu oran 6,62 ve 3 nm VO_x oksit katmanlı cihazda ise uygulanan 0,835 V voltajda 1,32 değerinde R_{OFF}/R_{ON} oranı elde edilmiştir. Şekillerin sağdaki ekleri, farklı kalınlıklara sahip VO_x tabanlı memristör cihazlarının dayanıklılık davranışını göstermektedir. Bu dayanıklılık grafiklerinde cihazların yüksek direnç durumu ve düşük direnç durumu için karşılık gelen akım değerleri, akım-gerilim grafiklerinde karşılık gelen SET ve RESET gerilim değerleriyle incelenmiştir. Memristör cihazları için elde edilen dayanıklılık davranışları bu cihazların yüksek ve

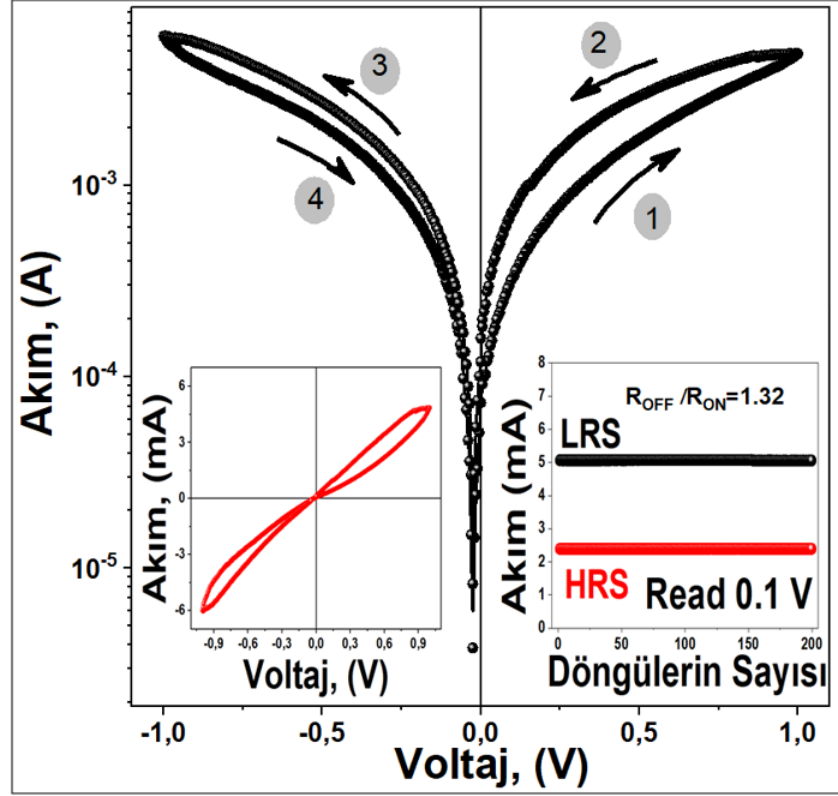
düşük direnç durumları arasında oldukça kararlı bir şekilde çalışabileceklerini göstermiştir. Ayrıca, VO_x kalınlığının azalmasıyla birlikte yüksek ve düşük direnç durumları için karşılık gelen akımların 25 nm kalınlığındaki cihaza göre azalma eğiliminde olduğu gözlemlendi. Dolayısıyla VO_x film kalınlığının azalmasıyla cihazların direncinin arttığı ve VO_x yapılarındaki oksijen boşluğu miktarının azaldığı düşünülmektedir.



Şekil 5.5: 25 nm VO_x kalınlıklı memristör cihazın direnç-anahtarlama davranışı.



Şekil 5.6: 13 nm VO_x kalınlıklı memristör cihazın direnç-anahtarlama davranışı.

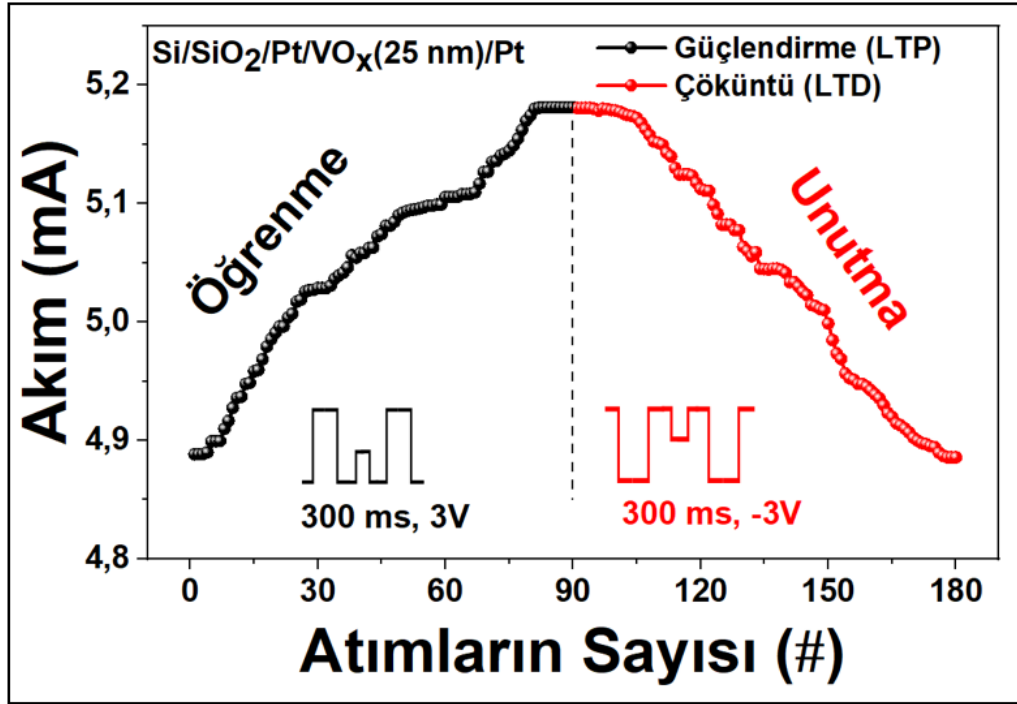


Şekil 5.7: 8 nm VO_x kalınlıklı memristör cihazın direnç-anahtarlama davranışı.

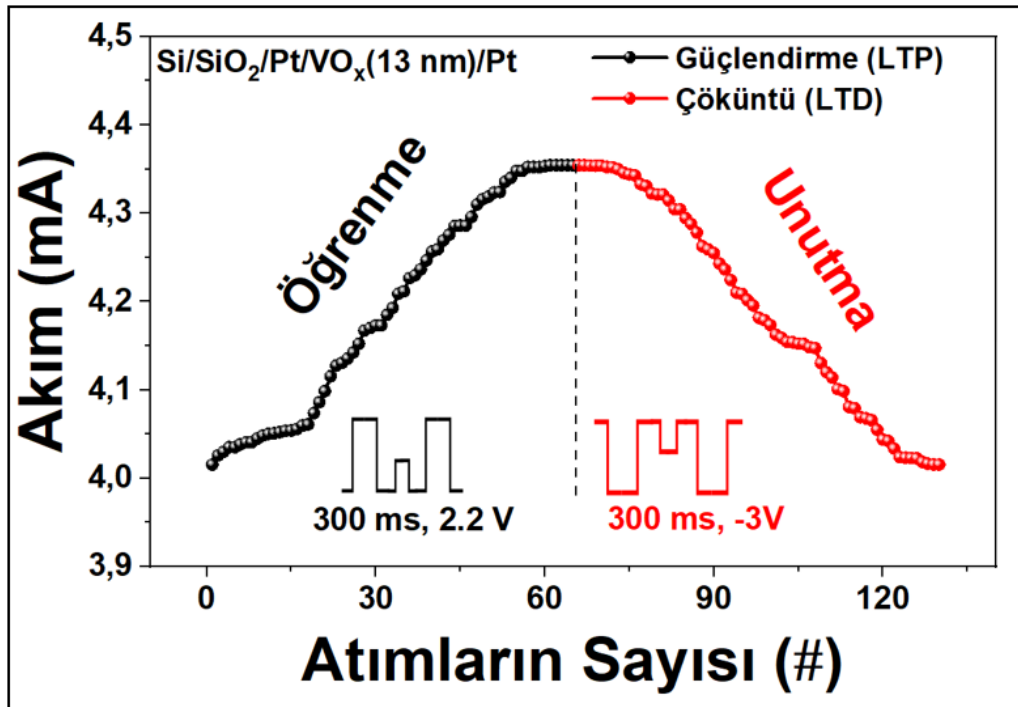
5.3. VO_x Tek Hücreli Memristör Cihazların AC Elektriksel Karakterizasyonu

AC elektriksel karakterizasyonlarda alt elektrotlar daima topraklanmış, üst elektrotlara AC darbe gerilimleri uygulanmıştır. Tüm elektriksel ölçümler atmosferik koşullarda, oda sıcaklığında gerçekleştirildi. AC elektriksel karakterizasyonlar için Keithley 2450 kaynak ölçer ve Tektronix AFG 3100 serisi fonksiyon üretici kullanıldı. LabVIEW yazılımı kullanılarak oluşturulan ölçüm düzenekleri ile elektriksel ölçümler başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Nöromorfik sistemlerde gözlenen karakteristik sinaptik esneklik, öğrenme ve hafıza yeteneklerinin temel bileşenidir. Dikkat çekici bir şekilde, biyolojik sinapslarda gözlemlenen güçlenme ve çöküntü yetenekleri genellikle ardışık uyarıcı ani artışlarla elde edilir [8]. Biyolojik sistemlerdeki bu mekanizmaya benzetme yaparak tez çalışması kapsamında üretilen memristör cihazlarımıza ardışık pozitif ve negatif darbeler uygulayarak biyolojik sistemlerdekine benzer güçlenme ve çöküntü yapıları elde etmeye çalıştık. Şekil 5.8, 5.9 ve 5.10 ardışık pozitif ve negatif darbelerin uygulanmasıyla memristör cihazlarındaki kademeli akım değişikliklerini göstermektedir. Sonuçlar kademeli akım değişikliklerinin biyolojik sinapslardaki gibi

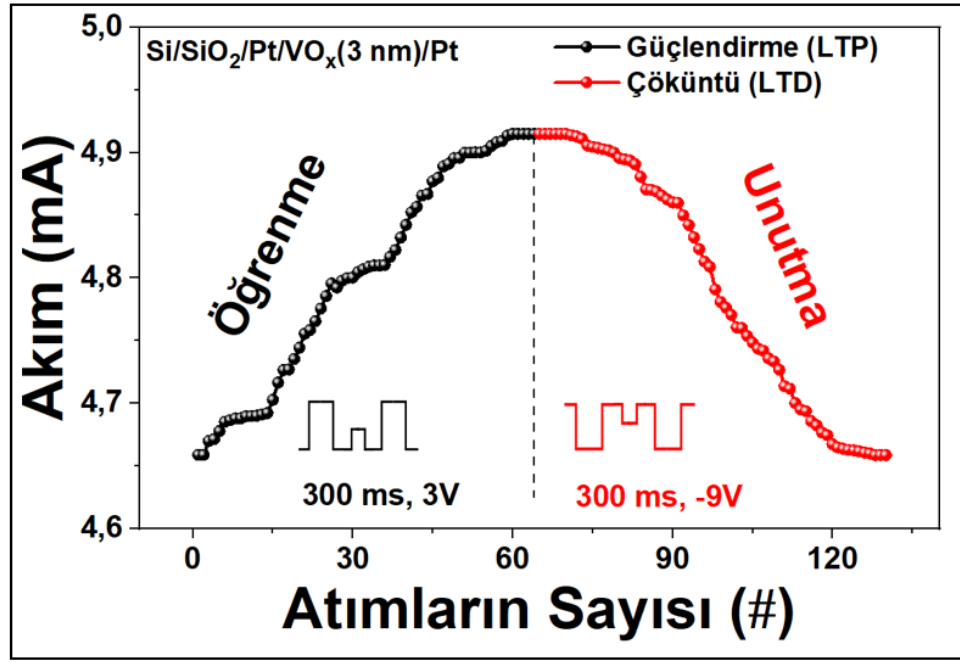
güçlenme ve çöküntü şeklinde meydana geldiğini gösterdi. Şekil 5.8' de görüldüğü gibi 25 nm kalınlığında VO_x filmden oluşan cihaza 3 V genlik ve 300 ms darbe genişliğinde 90 adet pozitif darbe uygulanarak güçlendirme yanıtları elde edildi. Benzer şekilde 25 nm kalınlığında VO_x filmden oluşan cihaza 3 V genlik ve 300 ms darbe genişliğinde 90 adet negatif darbe uygulanarak çöküntü mekanizması elde edildi. 13 nm kalınlığındaki VO_x katmanından oluşan cihazda güçlendirme tepkisini elde etmek için, aynı darbe genişliğine sahip 2,2 V genlikli ardışık darbeler uygulandı. Bu cihazda çöküntü mekanizması elde etmek için ise 300 ms genişliğinde ve 3 V genliğinde darbeler uygulandı. 3 nm kalınlığında VO_x katmanına sahip cihaz için ise 3 V 300 ms darbeler uygulanarak güçlendirme yanıtı, 9 V 300 ms değerinde darbeler uygulanarak ise çöküntü yanıtı elde edildi. Ayrıca ardışık tüm darbelerin aralıkları 5 ms olup, darbeler sonrasındaki akım değişimleri 0,1 V gibi düşük okuma gerilimi ile ölçülmüştür. Ölçümlerimizde, biyolojik sinapslardakine benzer şekilde doyum noktasındaki güçlenme tepkisinden çöküntü tepkisine geçiş yapmak için farklı genliklerdeki darbeleri kullanmak zorunda kaldık. Bu durumun tamamen film kalınlığından kaynaklandığını düşünmekteyiz. Ayrıca elde edilen kademeli akım tepkilerinde her cihazın akım değişimleri ve akım doygunluk değerleri birbirinden farklı olmuştur ve tam güçlendirme ve çöküntü tepkilerini elde etmek için her cihazın darbe sayıları da farklı olmuştur. Örneğin 25 nm oksit kalınlığına sahip cihaz için daha fazla uyarıcı darbeler uygulanmıştır. Tüm bu farklılıklar bize cihazlardaki oksit tabakasının kalınlığının cihazların sinaptik özelliklerini etkileyebilen önemli bir faktör olduğunu göstermiştir. Tüm bu kademeli akım tepkilerinden, güçlendirme ve çöküntü olarak adlandırılan ardışık darbeler sonucunda ortaya çıkan kademeli akım değişikliklerinin, yapay sinapslarda gözlenen uzun dönem güçlendirme ve uzun dönem çöküntü mekanizmalarına karşılık geldiğini söyleyebiliriz [144]. Normalde aynı gerilim genlikleri ile güçlendirme sonrasında eşdeğer bir çöküntü davranışı elde etmek her zaman mümkün olmuyor ve akım değişimi istenilen düzeyde sağlanamıyor. Bu yüzden literatürde örnekleri görüldüğü gibi farklı gerilim değerlerine sahip genlikler uygulanarak uygun çöküntü mekanizmaları elde edilmiştir [119].



Şekil 5.8: 25 nm VO_x kalınlıklı memristör cihazın uygulanan ardışık atımlara karşı kademeli akım değişimleri.



Şekil 5.9: 13 nm VO_x kalınlıklı memristör cihazın uygulanan ardışık atımlara karşı kademeli akım değişimleri.



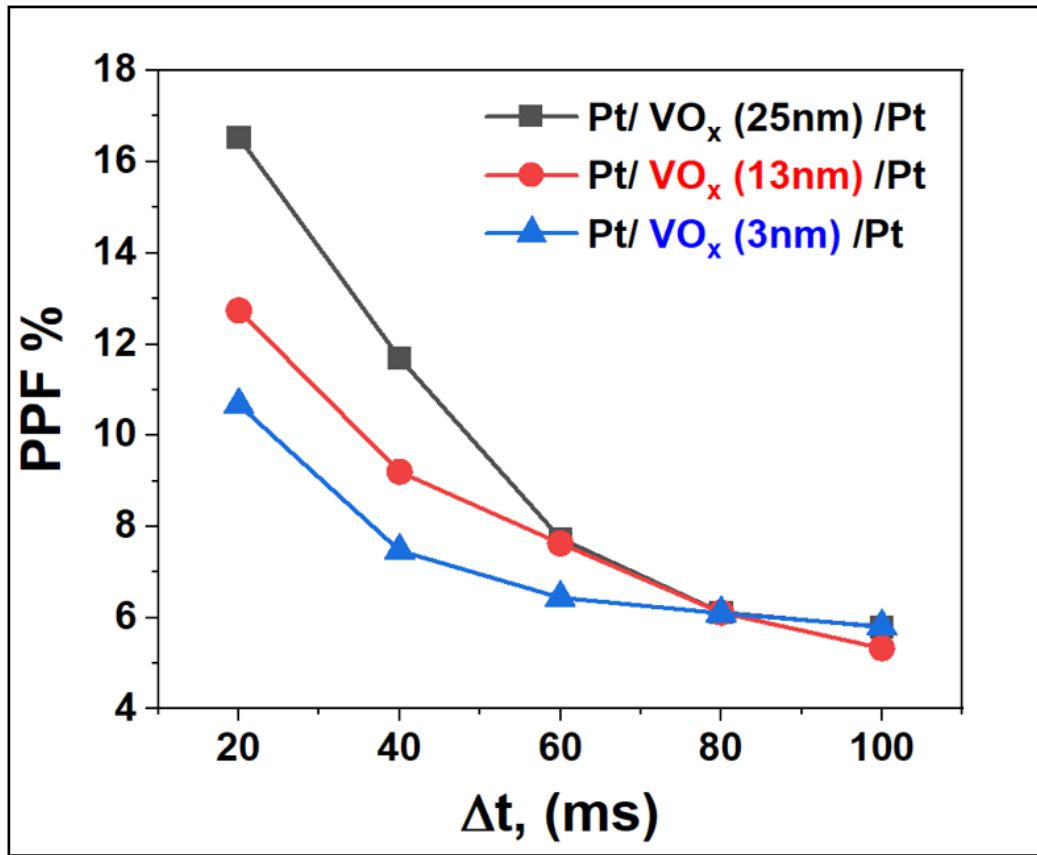
Şekil 5.10: 3 nm VO_x kalınlıklı memristör cihazın uygulanan ardışık atımlara karşı kademeli akım değişimleri.

Şekil 5.11 VO_x tabanlı tek hücreli memristör cihazlarına art arda iki voltaj darbesi uygulandığında meydana gelen akım değişikliklerini göstermektedir. Uygulanan bu darbelerin etkisi ile gözlemlenen akım değişiklikleri, biyolojik sinapslardaki eşleştirilmiş darbe kolaylaştırma (PPF) ilişkisine benzemektedir. Yapılan çalışmalar direnç-anahtarlama davranışı gösteren memristör cihazlarının uygun darbe çiftleriyle uyarılarak ve iletkenlikleri değiştirilerek önemli sinirsel görevleri yerine getirebildiklerini göstermiştir [16]. Gerçekleştirdikleri bu görevler arasında PPF fonksiyonu önemli bir kısa zaman aralıklı mantık fonksiyonudur. Bu fonksiyon, biyolojik sistemlerde iki sinaptik öncesi sivri uçun sıralı uygulanmasıyla elde edilir. Bu durumda uygulanan ikinci ani artış, birinciden daha dikkate değer bir tepki üretir [145]. Tez çalışmamızda biyolojik sinapslardaki PPF mekanizmasından esinlenerek memristör cihazlarımıza farklı atım aralıklarına sahip ardışık atım çiftleri uygulayarak PPF fonksiyonunu taklit etmeyi amaçladık. Burada özellikle biyolojik sistemlerdeki yapılarla tam bir benzerlik oluşturmak amacıyla darbe çiftleri arasındaki zaman aralığını farklı değerler vererek değiştirdik. Bu şekilde yapmamızın amacı, darbe çiftleri arasındaki zaman aralığının akım değişimleri üzerindeki etkisini derinlemesine incelemektir. İncelemelerimizde PPF karakteristiğini aşağıda verilen özel bir denklem kullanarak belirledik.

$$PPF = \left(\frac{I_2 - I_1}{I_1} \right) \times 100 \% \quad (5.1)$$

Burada I_1 ve I_2 sırasıyla birinci ve ikinci atımların oluşturduğu akım yanıtlarıdır [44]. Şekil 5.11 de görüldüğü gibi, PPF fonksiyonundaki değişiklikler, atım çiftleri arasındaki aralığın bir fonksiyonu olarak gözlemlenmiştir. Bu ölçümlerde birinci ve ikinci atım uygulandıktan sonra akımlar ölçüldü. Her cihaz için farklı atım aralıklarında 2 V darbe genliğine ve 300 ms darbe genişliğine sahip darbeler uygulandı. Elde edilen yüzde PPF değerleri biraz düşük olmasına rağmen, genellikle daha küçük bir darbe aralığı ile daha büyük bir PPF indeksi elde edilmiştir. Artan zaman aralıklarıyla birlikte PPF fonksiyonu azalma eğiliminde olmuştur. Fakat zaman aralığının fonksiyonuna bağlı olarak cihazların davranışları ve doyum noktaları oldukça farklı oldu. Özellikle oksit tabakasının kalınlığının azalmasıyla birlikte PPF' nin ilk zaman aralığı değerlerinde önemli düşüşler gözlemlendi. Genel olarak film kalınlığı azaldıkça daha düşük PPF değerleri elde edildi. PPF' nin azalmasında film kalınlığının azalmasıyla birlikte oksijen boşluklarının azalmasının etkili olduğunu düşünmekteyiz. Ancak yine de tüm cihazlar için elde edilen PPF değerleri her zaman pozitif çıktı. Bu durum bize, ikinci darbe uyarımı sonucunda elde edilen akım değerlerinin, uygulanan ilk darbe sonucunda elde edilen akım değerlerinden her zaman daha büyük olduğunu göstermiştir. Gözlemlenen bu davranış açısından tez çalışması kapsamında ürettiğimiz memristör cihazları ile biyolojik sinapslardaki PPF davranışı arasında bir benzerlik kurabiliriz. Elde edilen sonuçlar, cihazların iletkenlik değişiklikleri ile darbe çiftleri arasındaki zaman aralığı arasında derin bir ilişki olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Bu ilişki önemli bir avantaj sağlamaktadır. Eğer güçlü bir tetikleyici uyarıma sahip değilseniz çok dar zaman aralığına sahip darbe uyarımı kullanarak cihazın iletkenliğinde önemli bir değişiklik yapabilirsiniz [8], [71], [118], [145]. Ayrıca literatürde PPF davranışına yönelik çalışmaları detaylı olarak incelediğimizde tez çalışmamız kapsamında elde edilen PPF davranışına uygun modelin iletken filament modeli olduğunu söyleyebiliriz. Çünkü elde edilen yanıtlar incelendiğinde ikinci darbe uyarımının etkisi her zaman birinci darbe uyarımının etkisinden daha büyük olmuştur [146]. Bizde elde ettiğimiz sonuçlar kapsamında bu etkiyi yaratan faktörün VO_x yapısındaki oksijen boşlukları olduğunu düşünmekteyiz. Yukarıda açıkladığımız iletken filament modeline dayanarak PPF' nin mekanizmasını şu şekilde açıklayabiliriz. İlk darbe uyarımının uygulanmasıyla hareket eden oksijen boşlukları

iletken filamentleri oluşturur. Daha sonra ikinci darbe uyarımı ile bu iletken filament yapılarının sayısı artar ve bu da iletkenliğin daha da artmasına neden olur. Ancak düşük oranlarda elde edilen PPF fonksiyonları için bu darbelerle yeterli sayıda iletken filament yapılarının oluşmadığı anlaşılmaktadır. Ayrıca iletken filament modelini kullanarak azalan PPF fonksiyonunu artıran darbe aralığıyla da açıklayabiliriz. Çünkü darbe aralığının artmasıyla birlikte başlangıç durumunda oluşan iletken filament yapıları bozulup eski durumuna dönebilmektedirler. Böylece düşük darbe aralığına göre cihaz iletkenliğinde azalma meydana gelmektedir.



Şekil 5.11: 25, 13 ve 3 nm VO_x oksit kalınlığına sahip memristör cihazlarının PPF göstergeleri.

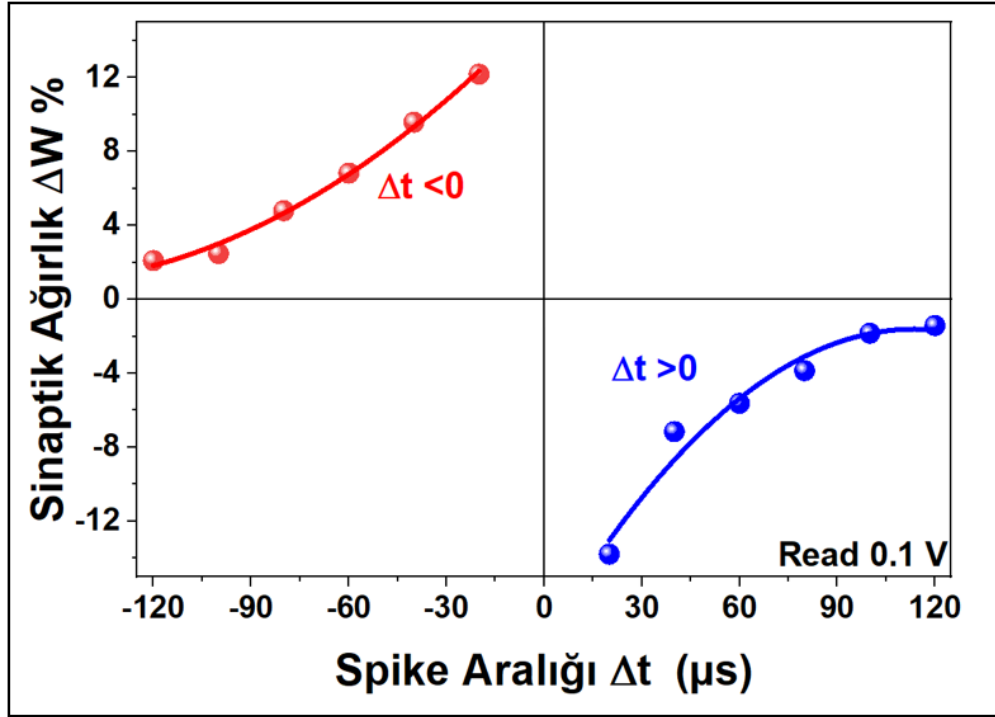
Tez çalışması kapsamında direnç-anahtarlama davranışlarını incelediğimiz memristör cihazlarımızda ayrıca literatür kısmında bildirdiğimiz SDTP davranışını da ürettiğimiz memristör cihazlarımızda ayrıntılı bir şekilde inceledik. Bu amaç doğrultusunda olağan STDP mekanizmasını memristör tabanlı yapay sinaptik cihazlarımıza uyguladık. Eğer öncül sinaptik sinyal, sonraki sinaptik sinyalden önce memristöre ulaşırsa cihazın mevcut tepkisi artar ve $\Delta t < 0$ olur. Böyle bir durum biyolojik

sistemlerde iki nöron arasındaki bağlantı gücünün güçlendiğini ifade eder. Tersine, eğer öncül sinaptik sinyal, sonraki sinaptik sinyalden daha sonra memristöre ulaşırsa cihazın mevcut tepkisi azalır ve $\Delta t > 0$ olur. Bu, biyolojik sistemlerde iki nöron arasındaki bağlantı gücünün zayıfladığını gösterir [57], [147]. Bu iki süreçteki öncül ve sonraki ateşleme sinyali (spikes) arasındaki zamanın göreceli değişimi, sinaptik ağırlık değişiminin doğasını belirler. Bu sinaptik ağırlık değişimini yüzdesel olarak matematiksel bir ifadeyle temsil edersek aşağıdaki gibi bir denklem kullanabiliriz.

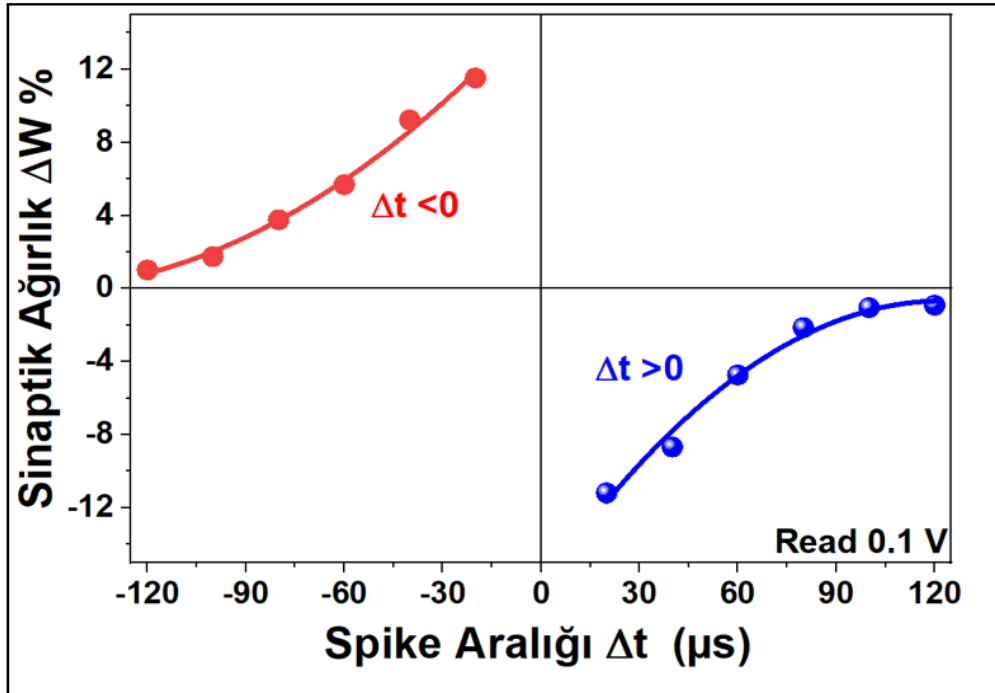
$$\Delta W = \left(\frac{G_a - G_b}{G_b} \right) \times 100 \% \quad (5.2)$$

Burada G_b , uyarımdan önce ölçülen iletkenliktir ve G_a , spike öncesi ve spike sonrası çiftlerin uyarılmasından sonra ölçülen iletkenliktir. Bu tez çalışmasında biz atım çiftlerini VO_x tabanlı memristör cihazlarına uygulayarak biyolojik sistemlerdeki STDP kuralıyla benzerlikler kurmak istedik. Memristör cihazlarımız için, sırasıyla öncül ve sonraki ateşleme sinyallerine karşılık gelen 120 μs darbe genişliğine sahip 2 V ve -2 V darbelerden oluşan atım çiftlerini uyguladık. Şekil 5.12, 5.13 ve 5.14 farklı kalınlığa sahip memristör cihazlarındaki sinaptik ağırlık değişimlerini göstermektedir. Sonuçlar açık bir şekilde ΔW ile Δt arasında güçlü bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Tüm cihazlarda $\Delta t > 0$ olduğunda Δt azaldıkça ΔW değerinde artış gözlemlendi. ΔW değerindeki bu artış doğal olarak iki nöron arasındaki bağlantı kuvvetinin azaldığını göstermektedir. Ancak cihazların maksimum ΔW değerleri oksit tabakasının kalınlığına bağlı olarak farklılık göstermektedir. $\Delta t > 0$ olduğunda 25 nm kalınlığındaki VO_x tabanlı cihazda maksimum ΔW değerine ulaşıldı. Bu durumda sinaptik yapı görevi gören oksit tabakasının kalınlığının etkili olduğu düşünülmektedir. $\Delta t < 0$ olduğunda da ΔW ile Δt arasında benzer bir ilişkiden bahsedebiliriz. Bu durumda ΔW değerindeki bu artış, ilk durumdan farklı olarak iki nöron arasındaki bağlantı gücünün arttığını göstermektedir. Maksimum ΔW değeri ilk durumda olduğu gibi yine 25 nm kalınlığındaki oksit tabakasına sahip cihazda gözlemlendi. Ancak 3 nm kalınlığında oksit tabakasına sahip cihazın ΔW değerleri diğer iki cihaza göre görece daha düşük oldu. Cihazlardaki oksit film kalınlığının göreceli değişimine göre gözlemlediğimiz sinaptik ağırlık değişimleri, oksit tabakasının kalınlığının ve özellikle oksit tabakasının kalınlığına bağlı olarak değişen oksijen boşluğu miktarının cihazların sinaptik performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak sinaptik ağırlık değişimlerine dayanarak,

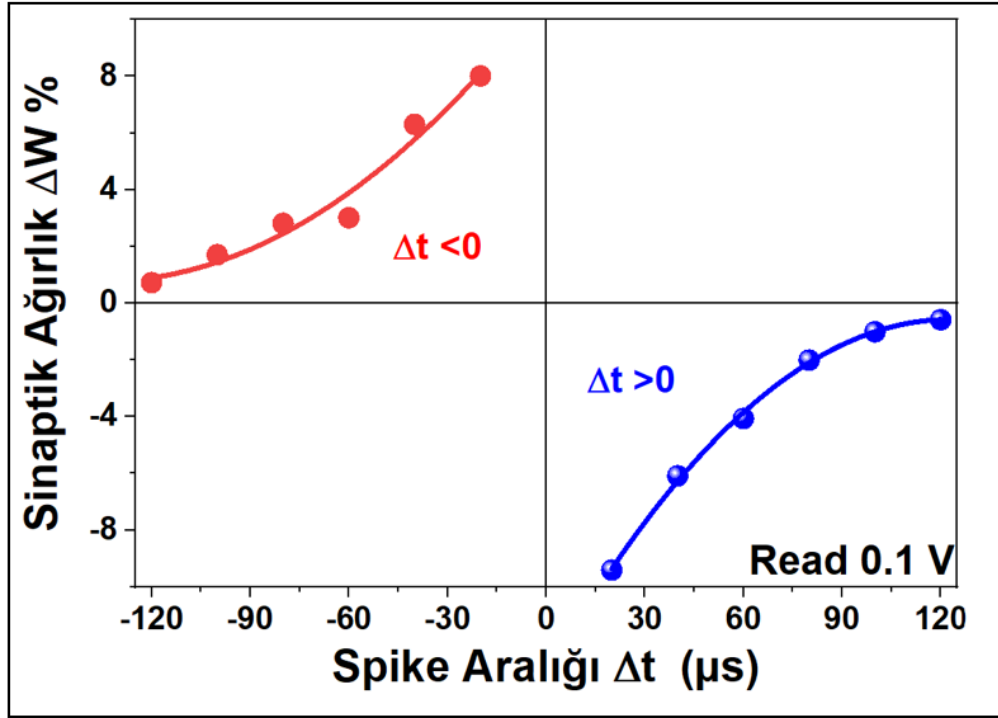
bu çalışmada üretilen ve direnç- anahtarlama davranışı gösteren VO_x tabanlı memristör cihazların yapay sinaps olarak kullanılabileceğini göstermiştir.



Şekil 5.12: 25 nm VO_x oksit kalınlığına sahip memristör cihazının sinaptik ağırlık değişimi.



Şekil 5.13: 13 nm VO_x oksit kalınlığına sahip memristör cihazının sinaptik ağırlık değişimi.

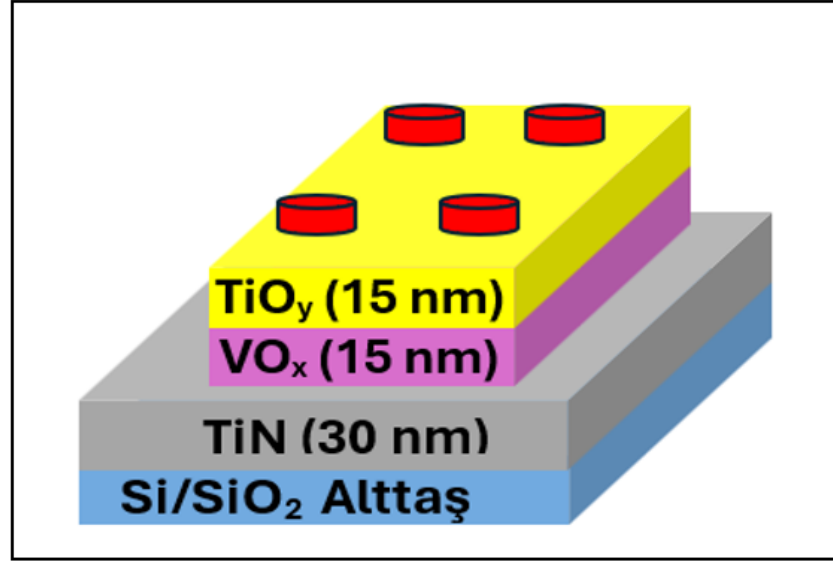


Şekil 5.14: 3 nm VO_x oksit kalınlığına sahip memristör cihazının sinaptik ağırlık değişimi.

5.4. VO_x/TiO_y Tek Hücreli Memristör Cihazların Üretilmesi ve Karakterizasyonu

Bu tez çalışmasında ayrıca, 10^{-9} mbar gibi ultra yüksek vakum koşulları altında Darbeli Lazer Biriktirme (PLD) ve DC Magnetron Püskürtme ince film büyütme sistemlerini kullanarak Si/SiO₂ alt tabaka üzerinde TiN/VO_x/TiO_y/Cu yığın yapısına sahip iki oksit tabakalı memristör cihazları üretildi. Ticari olarak temin edilebilen ve kendiliğinden oksitlenen Si(100) alt tabaka önce kimyasal olarak temizlendi ve ardından bu alt tabaka üzerinde 30 nm kalınlığında bir alt TiN elektrot PLD odasında büyütüldü. Daha sonra VO₂ ve TiO₂ PLD hedefleri kullanılarak aynı PLD sisteminde sırasıyla 15 nm kalınlıklı VO_x/TiO_y oksit tabakaları yüksek vakum koşulları altında alt kontak üzerinde büyütülmüştür. PLD sisteminde VO_x ve TiO_y oksit katmanlarının büyütülmesi sırasında VO₂ ve TiO₂ PLD hedefleri ve alt tabakalar arasındaki mesafe sırasıyla 24,8 ve 34,3 mm' de sabit tutulmuştur. PLD sisteminde, KrF excimer lazer ($\lambda=248$ nm) VO_x oksit tabakası için 350 mJ de ve TiO_y oksit tabakası için de 250 mJ' de 10 Hz lazer tekrarlama hızıyla çalıştırılmıştır. Ayrıca alt tabakalar biriktirme sırasında düşük hızda döndürülmüştür. Son olarak, Magnetron Püskürtme sistemi kullanılarak TiO_y oksit

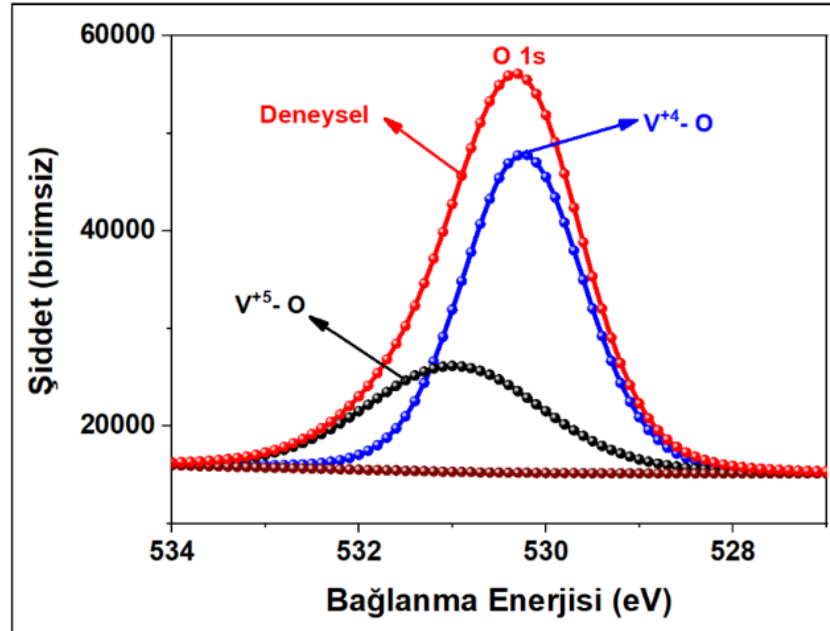
tabakası üzerinde 30 nm Cu üst elektrot büyütülmüştür. Elektriksel ölçüm aşamalarında alt ve üst elektrotlar aracılığıyla elektriksel bağlantıyı sağlamak için biriktirme işlemlerinde metalik maske kullanıldı. Cihaz üzerindeki Cu üst elektrot yaklaşık 1 mm² yüzey alanına sahipti.



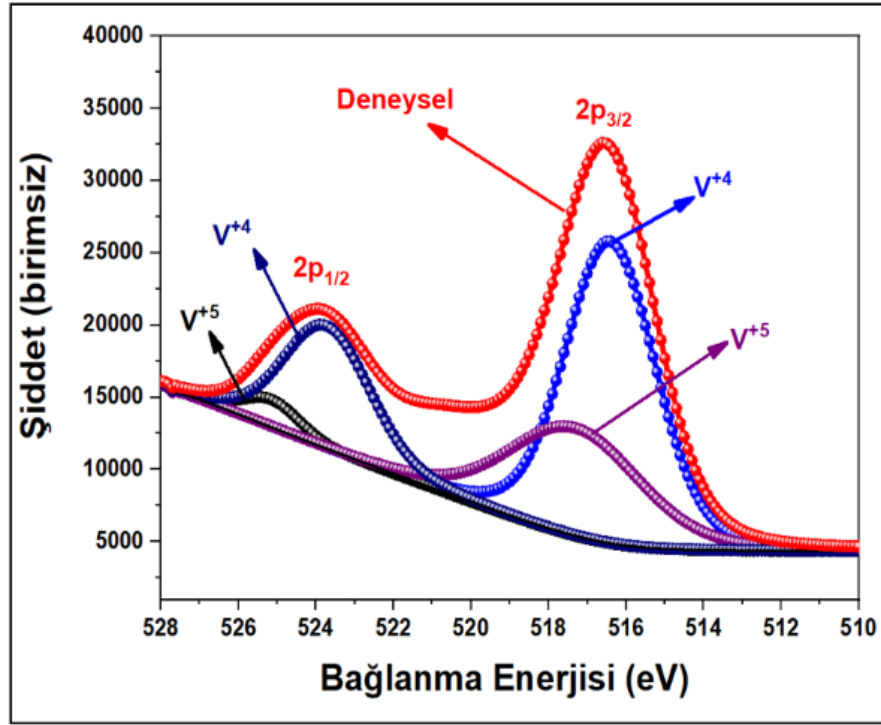
Şekil 5.15: TiN/VO_x/TiO_y/Cu Memristör cihazın fiziki yapısı.

VO_x, TiO_y fonksiyonel katmanlarının hem kimyasal bağ durumlarını hem de V, Ti elementlerinin oksidasyon durumlarını incelemek ve özellikle VO_x ve TiO_y yapılarının oluşumunu doğrulamak için X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) ölçümleri gerçekleştirdik. Bu ölçümler oda sıcaklığında ve yüksek vakum koşulları altında gerçekleştirilmiştir. VO_x ve TiO_y ince filmleri için Şekil 5.16, 5.17, 5.18 ve 5.19 yüksek çözünürlüklü XPS spektrumlarını ve bu spektrumların simülasyonlarını göstermektedir. Simülasyonlar için CasaXPS yazılımı kullanılmıştır. Şekil 5.16 ve 5.18’deki pikler oksijen iyonlarından kaynaklanan pikleri, Şekil 5.17 ve 5.19’deki pikler ise Ti ve V iyonlarından kaynaklanan pikleri göstermektedir. V ve Ti pikleri, spin-yörünge eşleşmesi nedeniyle tipik 2 pik (V2p_{1/2}, 2p_{3/2} ve Ti2p_{1/2}, 2p_{3/2}) gösterir. V2p_{3/2}, V2p_{1/2}, Ti2p_{3/2}, Ti2p_{1/2} pikleri için bağlanma enerjileri sırasıyla 516.5, 524, 459.5 ve 465.25 eV’ye karşılık gelmiştir. Spektrumda görüldüğü gibi, V⁺⁴’e ait piklerin bağıl yoğunluğu, V iyonunun yüksek değerlik durumuna eğilimi nedeniyle V⁺⁵’e karşılık gelen piklerin yoğunluğundan daha fazladır. V⁺⁴’ün 2p_{3/2} ve 2p_{1/2}’si için deneysel verilerin uydurulmasıyla elde edilen bağlanma enerjileri sırasıyla 516,4

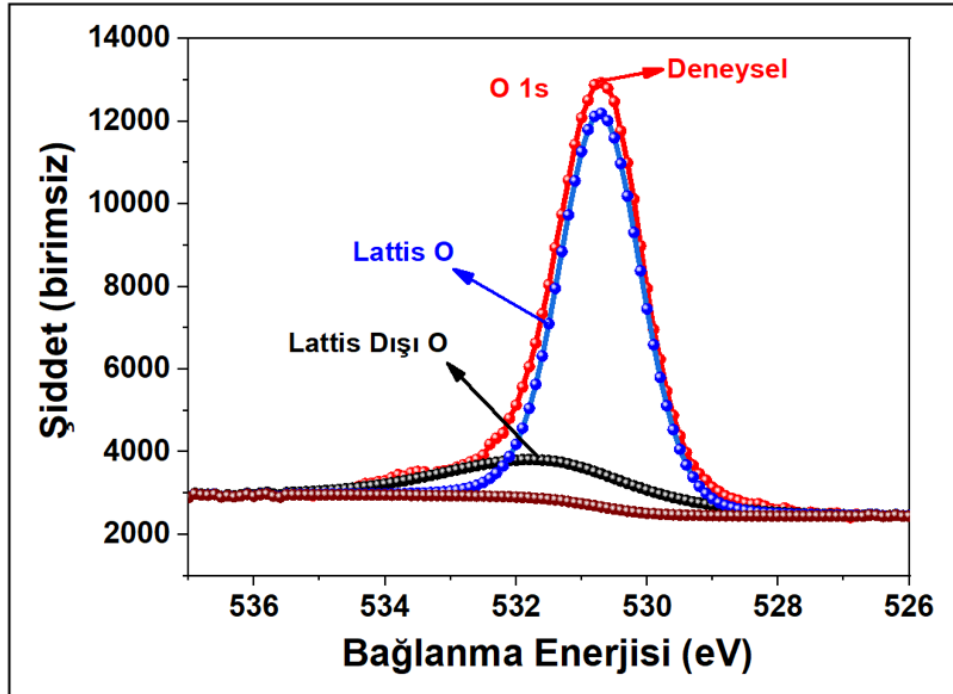
ve 523,9 eV olmuştur. Benzer şekilde, V^{+5} için bu değerler sırasıyla 517,5 ve 525,2 eV' a karşılık gelmiştir. Fit edilen değerler ile birlikte V elementi için elde edilen bağlanma enerjileri literatür ile iyi bir uyum içindedir. VO_x bileşimindeki oksijen içeriği hem film yüzeyinin oksidasyonundan hem de esas olarak vanadyum metalinin oksijen ile güçlü bağından kaynaklanmaktadır. Bu durum, V^{+5} ' in film yüzeyinin oksidasyonundan kaynaklanmasından, ve ayrıca onun V^{+4} ' ye kıyasla nispeten düşük konsantrasyona sahip olmasından da anlaşılmaktadır [139]. Ayrıca TiO_x bağ yapısını detaylı olarak incelediğimizde O 1s spektrumunun 2 ayrı pike sahip olduğu görüldü. Oradaki 530.7' deki zirve latis yapısındaki bağ durumundan kaynaklanırken, 531.7' deki diğer zirve yüzey kusurlarından veya emilen oksijen iyonundan kaynaklanmaktadır [83]. O 1 spektrumunda gözlemlenen bu pikler, Ti elementinin 2 oksidasyon durumuyla (Ti^{+4} ve Ti^{+3}) ilişkilidir. Ti^{+4} ' ün $2p_{3/2}$ ve $2p_{1/2}$ spektrumları için deneysel verilerin fit edilmesiyle elde edilen bağlanma enerjileri sırasıyla 459,45 ve 464,9 eV olmuştur. Benzer şekilde Ti^{+3} için de bu değerler sırasıyla 460,2 ve 465,3 eV olarak elde edilmiştir. Ti elementi için elde edilen fit değerlerinin tamamı literatürle oldukça uyumludur [148]. Ayrıca elde edilen tüm XPS sonuçları, uygun bağ yapılarıyla VO_x ve TiO_x fonksiyonel katmanlarının oluştuğunu gösterdi.



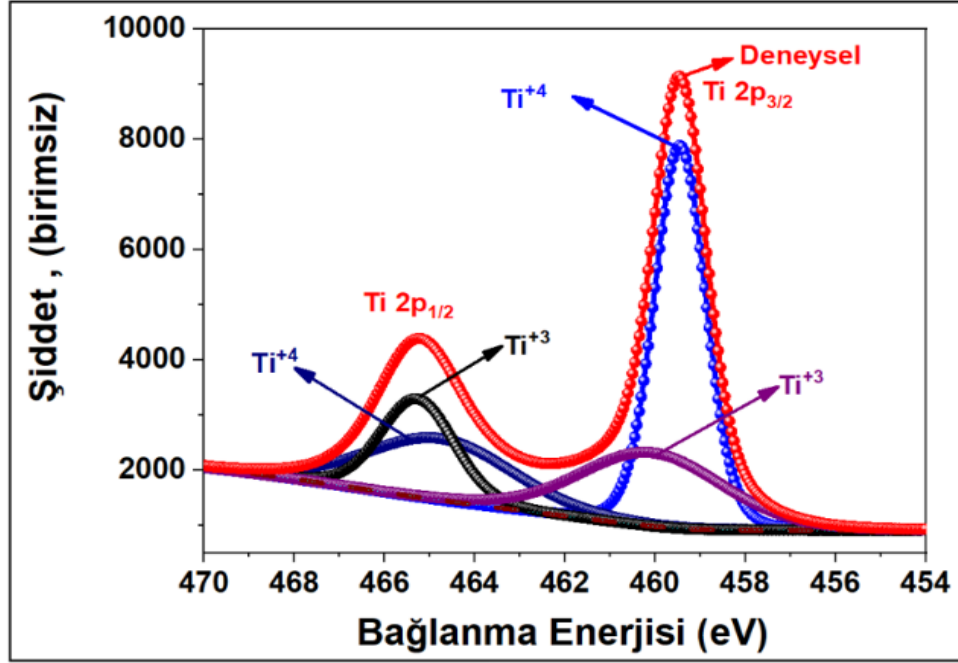
Şekil 5.16: VO_x/TiO_y Memristör cihaz bileşenindeki VO_x oksit katmanının O 1s ortamının deneysel yüksek çözünürlüklü XPS spektrumu ve deneysel verilerin simülasyon sonuçları.



Şekil 5.17: VO_x/TiO_y Memristör cihaz bileşenindeki VO_x oksit katmanının V 2p ortamının deneysel yüksek çözünürlüklü XPS spektrumu ve deneysel verilerin simülasyon sonuçları.



Şekil 5.18: VO_x/TiO_y Memristör cihaz bileşenindeki TiO_y oksit katmanının O 1s ortamının deneysel yüksek çözünürlüklü XPS spektrumu ve deneysel verilerin simülasyon sonuçları.

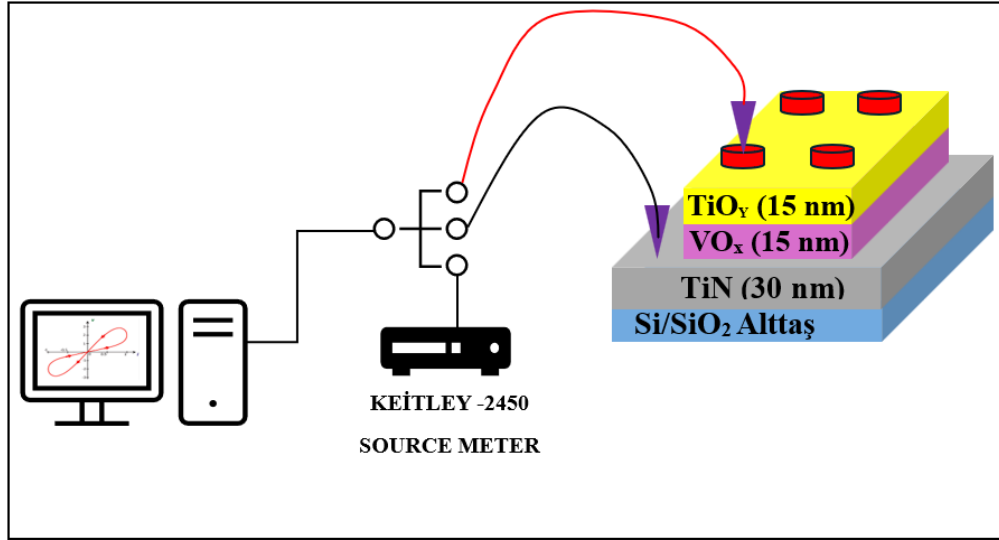


Şekil 5.19: VO_x/TiO_y Memristör cihaz bileşenindeki VO_x oksit katmanının Ti 2p ortamının deneysel yüksek çözünürlüklü XPS spektrumu ve deneysel verilerin simülasyon sonuçları.

Ayrıca cihaz bileşimindeki VO_x/TiO_y oksit bileşiminin yapısal olarak elektriksel özelliklerini incelediğimizde bu yapıların n-tipi yarıiletken gibi davrandıklarını gözlemledik. Bu davranış daha önceki kısımlarda belirttiğimiz gibi onların yapısında bulunan oksijen boşluklarından kaynaklanmaktadır.

5.5. VO_x/TiO_y Tek Hücreli Memristör Cihazların DC Elektriksel Karakterizasyonu

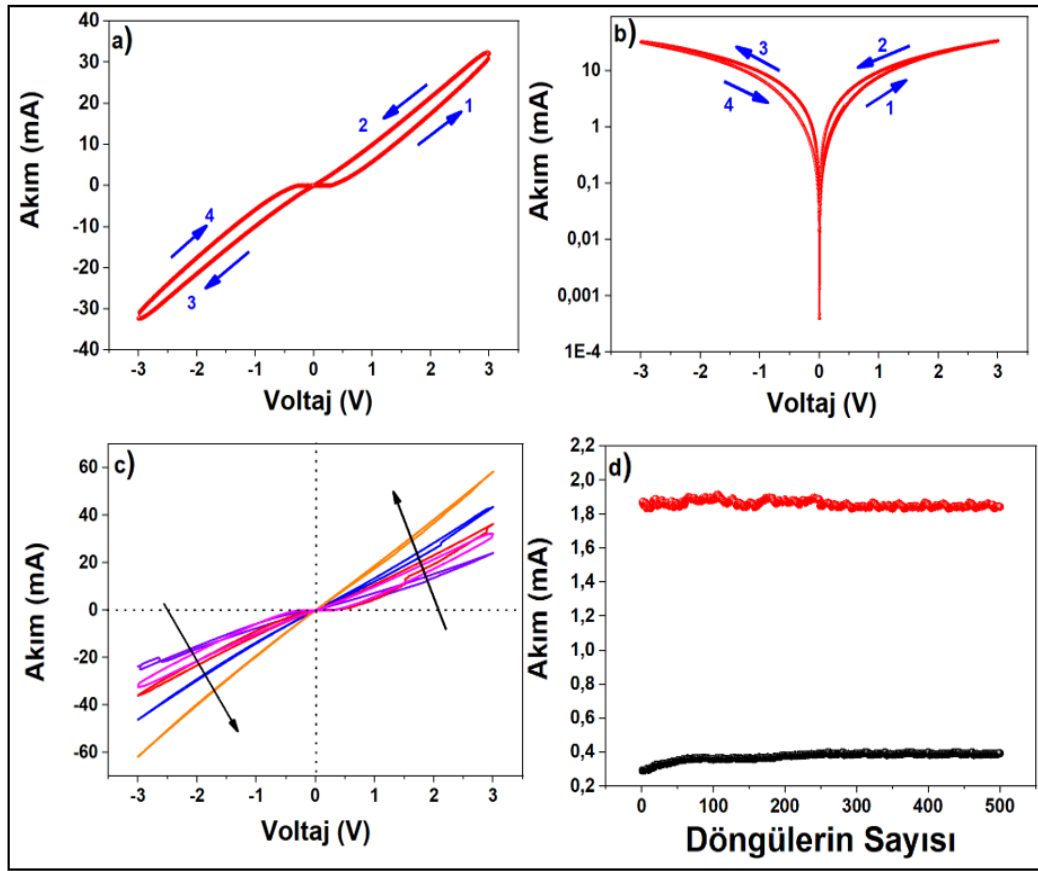
Elektriksel karakterizasyonlar sırasında, alt elektrotlar her zaman topraklanmış ve üst elektrotlara DC gerilimler uygulanmıştır. DC elektrik ölçümleri oda sıcaklığında atmosferik koşullarda gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler için Keithley 2450 kaynak-ölçer cihazı kullanılmıştır. Elektriksel ölçümleri hassas bir şekilde gerçekleştirmek için kendimizin oluşturduğu LabVIEW yazılım arayüzünü kullandık. İlgili ölçüm düzeneği şekil 5.20’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.20: TiN/VO_x/TiO_y/Cu memristör cihazın DC elektriksel ölçüm düzeneği.

Şekil 5.21 TiN/VO_x/TiO_y/Cu memristör cihazının direnç anahtarlama mekanizmalarını göstermektedir. Şekillerdeki a cihazın akım-gerilim (I-V) eğrisini, b (I-V)' ye karşılık gelen logaritmik I-V eğrisini, c kademeli iletkenlik değişimini ve d ise cihazın dayanıklılık karakteristiğini göstermektedir. Cihazın (I-V) davranışı sıkışmış bir histerisis eğrisi sergiledi ve bu davranış logaritmik olarak da elde edildi. Bu iki davranış, memristör cihazların parmak izi olarak kabul edilen memristör cihazların tanımlayıcı karakteristik davranışıdır. Cihaza pozitif voltaj uygulandığında cihaz akımında kademeli bir artış meydana geldi ve cihaz SET işlemi adı verilen yüksek direnç durumundan düşük direnç durumuna geçişi sağladı. Daha sonra negatif gerilim uygulandığında SET işleminin tersi olan ve RESET süreci olarak adlandırılan akımda kademeli bir azalma meydana geldi. Elde edilen (I-V) eğrileri, cihazın başlangıçta yüksek direnç durumunda olduğunu ve uygulanan voltaj taramasıyla cihazın iletkenliğinin değiştirilebileceğini gösterdi. Ayrıca pozitif ve negatif gerilim taramalarıyla düşük ve yüksek direnç durumları arasında elde edilen anahtarlama davranışları cihazın iki kutuplu direnç- anahtarlama davranışına sahip olduğunu gösterdi. Ayrıca şekil 5.21' c kısmında gösterildiği gibi cihaza ardışık 5 voltaj taraması uygulandığında cihazın iletkenliğinde sürekli artış/azalış değişiklikleri elde edilmiştir. Cihazda pozitif ve negatif voltaj taramaları uygulanarak elde edilen bu sürekli iletkenlik değişiklikleri, biyolojik sistemlerdeki sinaptik ağırlık değişikliklerine benzemektedir [36]. Ayrıca bu cihaz yapısının tüm akım-gerilim grafiklerinde, diğer memristörlü cihazlarda gözlemlenebilecek ani bir akım artışı veya azalması

gözlemlenmemiştir. Çünkü cihaz yapısında ağırlıklı olarak tamamen kademeli bir akım değişimi meydana geldi. Bu şekilde elde edilen değişim cihazın biyolojik sistemlerde gözlemlenen sinaptik esnekliği taklit ettiğini bir kez daha gösteriyor. Şekil 5.21’ deki d bölümündeki dayanıklılık davranışı ise (I-V) eğrisindeki SET ve RESET gerilim değerleri kullanılarak elde edilmiştir. 500 çevrime kadar neredeyse çok az değişiklikle elde edilen dayanıklılık davranışı cihazın iki direnç durumu arasında oldukça kararlı bir şekilde çalışabileceğini açıkça göstermiştir.

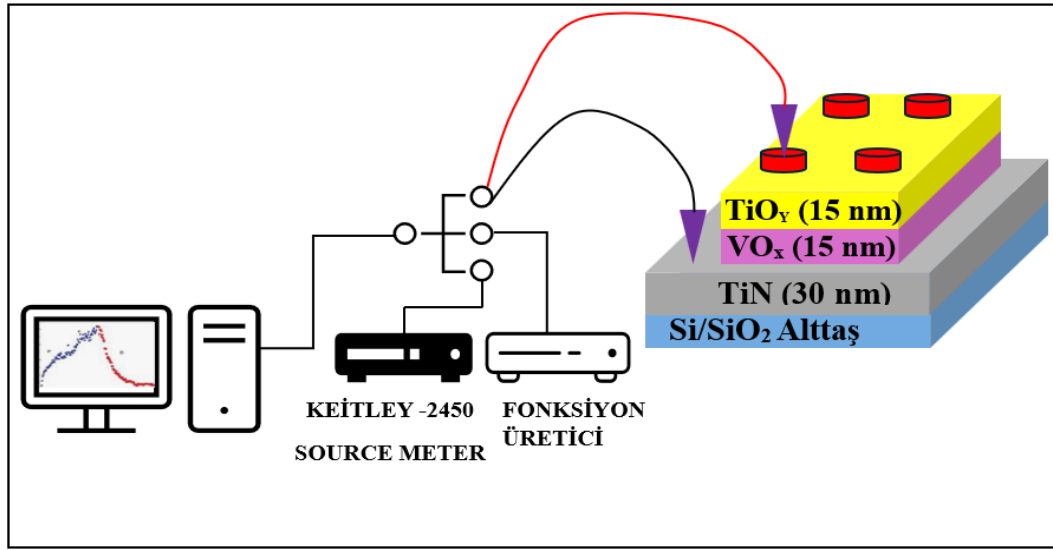


Şekil 5.21: TiN/VO_x/TiO_y/Cu memristörün dirençli anahtarlama davranışı. a) I-V karakteristiği, b) Logaritmik I-V eğrisi, c) Ardışık voltaj taramalarıyla kademeli iletkenlik değişimi, d) Memristör cihazının dayanıklılık davranışı. Grafikteki oklar voltaj-akım ilerleme yönünü ve ardışık gerilim taramalarının sırasını göstermektedir.

5.6. VO_x/TiO_y Tek Hücreli Memristör Cihazların AC Elektriksel Karakterizasyonu

AC elektriksel ölçümler sırasında alt elektrotlar daima topraklandı ve üst elektrotlara ise AC darbe voltajları uygulandı. AC elektriksel ölçümler atmosferik koşullarda, oda

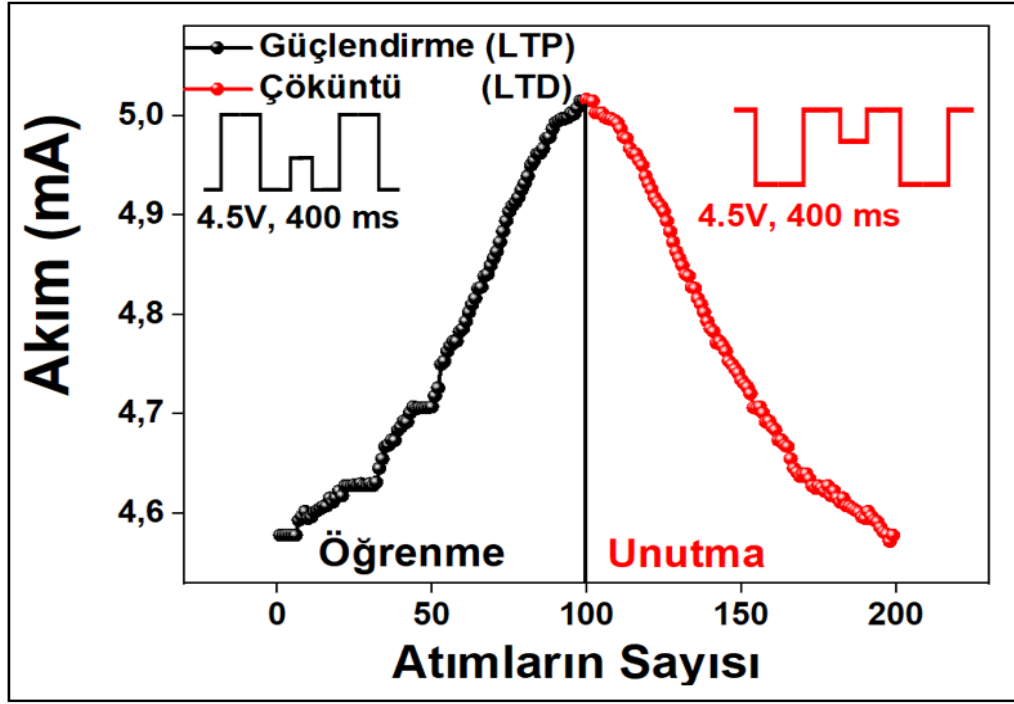
sıcaklığında yapıldı. Bu ölçümler için Keithley 2450 kaynak-ölçer ve Tektronix fonksiyon üretici cihazları kullanıldı. Uzun dönem güçlendirme, çöküntü ve sinaptik ağırlık değişimi ölçümlerinde fonksiyon üreticiden çeşitli kare dalgalar uygulanarak 0,5 V gibi düşük bir okuma voltajı ile cihaz akımındaki değişimler ölçüldü. AC elektriksel ölçümleri hassas bir şekilde gerçekleştirmek için kendi çalışmalarımız kapsamında geliştirdiğimiz LabVIEW yazılımı destekli ölçüm sistemimizi kullandık. İlgili deney düzeneği şekil 5.22’ de görsel olarakda sunulmuştur.



Şekil 5.22: TiN/VO_x/TiO_y/Cu memristör cihazın AC elektriksel ölçüm düzeneği.

Şekil 5.23 üretilen memristör cihazının sinaptik esneklik davranışını göstermektedir. Bu şekil önce 4,5 V genlikli ve 400ms darbe genişliğinde, ardından -4,5V genlikli ve 400ms darbe genişliğinde kare dalgaların art arda uygulanmasıyla cihazda oluşan kademeli akım değişikliklerini göstermektedir. Gözlemlenen kademeli akım değişiklikleri, biyolojik sistemlerde öğrenmenin gerçekleştiği sinapslarda güçlenme ve çöküntü şeklinde meydana geldi. Kademeli akım değişimlerinde ilk 100 kare dalganın uygulandığı kısım, biyolojik sistemlerde öğrenme olayının inşa edildiği uzun dönem güçlendirme adı verilen mekanizmaya karşılık gelmektedir. Sonraki 100 kare dalganın uygulandığı kısım ise uzun dönem çöküntü adı verilen mekanizmaya karşılık gelmektedir. Uzun dönem çöküntü biyolojik sistemlerde öğrenme yeteneğinin kaybolduğu ve unutkanlığın meydana geldiği kısımdır. Üretilen memristör cihaz için elde edilen kademeli akım değişiklikleri oksit bileşiklerdeki direnç-anahtarlama mekanizmasını meydana getiren oksijen boşluklarının hareketinden

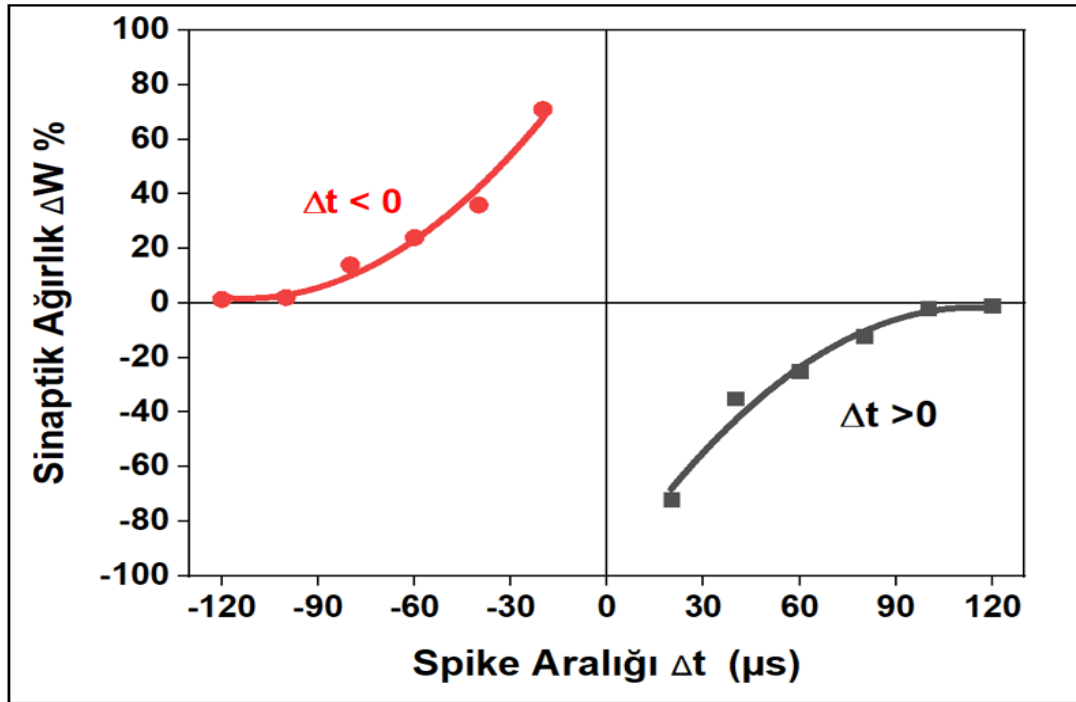
kaynaklanmaktadır. Elde edilen kademeli akım değişimleri bu cihazın biyolojik sistemlerdeki sinapsların öğrenme mekanizmalarını taklit ettiğini ve yapay bir sinaps gibi davrandığını açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle VO_x/TiO_y fonksiyonel katmanı, öğrenmede aktif rol oynayan iki nöron arasındaki sinapsın çok iyi bir performansını gösterdi.



Şekil 5.23: TiN/VO_x/TiO_y/Cu memristör cihazının uygulanan ardışık atımlara karşı kademeli akım değişimleri.

STDP biyolojik sistemlerdeki bir diğer önemli sinaptik mekanizmadır. Önemli bir öğrenme kuralı olan SDTP, biyolojik sinir sistemindeki öncül sinaptik sinyal ve sonraki sinaptik sinyalin zamansal düzenlemesine dayanan bir sinaptik ağırlık değişimidir. SDTP özellikle donanım tabanlı sinir ağlarında öğrenme yeteneği yüksek olan bir mekanizmadır [39]. Şekil 5.24 üretilen memristör cihazının sinaptik ağırlık değişimini göstermektedir. Biyolojik sinapslardaki SDTP mekanizması, üretilen memristör cihazına uygulandığında öncül sinaptik sinyal sonraki sinaptik sinyalden önce meydana gelirse, cihazın akım tepkisi artar ve $\Delta t < 0$ olur. Ancak öncül sinaptik sinyal sonraki sinaptik sinyalin gerisinde kalırsa, cihazın akım tepkisi azalır ve $\Delta t > 0$ olur. Birinci durum, sinir sistemindeki iki nöron arasındaki bağlantı gücünün arttığı bir duruma karşılık gelirken, ikinci durum, bu nöronlar arasındaki bağlantı gücünün azaldığı bir duruma karşılık gelir. Sinir sistemindeki iki nöronun bağlantı gücünün

değişimi ile ürettiğimiz memristör cihaz arasında bir benzerlik kurmak için, ürettiğimiz memristör cihazına öncül sinaptik sinyal ve sonraki sinaptik sinyal yapılarına karşılık gelen 120 μs genişliğinde 4V ve -4V genlikli dalga çiftleri uyguladık. Grafikte gözlemlendiği gibi, ΔW ile Δt arasında güçlü bir ilişki oluşmuştur. Bu ilişkide tıpkı biyolojik sinapslarda olduğu gibi, $\Delta t > 0$ olduğunda, Δt azaldıkça ΔW değeri artmıştır. ΔW 'deki bu artış iki nöron arasındaki bağlantı gücündeki azalmaya denk gelmektedir. $\Delta t < 0$ olduğunda da, ΔW ile Δt arasında benzer bir ilişkiden bahsetmek mümkündür. Bu durumda, ΔW değerindeki artış, ilk durumdan farklı olarak, iki nöron arasındaki bağlantı gücündeki artışı yansıtmaktadır. Elde edilen sinaptik ağırlık değişimleri, biyolojik sistemlerdeki sinaptik ağırlık değişimini güçlü bir şekilde taklit etmiştir. Bu, durum üretilen memristör cihazın yapay nöron ve sinaps olarak kullanılma potansiyeline sahip olduğunu ve VO_x/TiO_y fonksiyonel katmanının biyolojik sistemlerdeki sinapsların işlevini başarıyla taklit ettiğini doğruladı. Direnç-anahtarlama davranışı gösteren $\text{TiN}/\text{VO}_x/\text{TiO}_y/\text{Cu}$ memristör cihazın yapısında bulunan oksijen boşlukları sinaptik ağırlık değişimi mekanizmasının gerçekleştirilmesinde en önemli etkidir. Çünkü uygulanan sinyaller ile hareket eden oksijen boşlukları iletkenliğin kademeli bir şekilde değişmesini sağlamış ve böylece sinaptik ağırlık değişimi mekanizmasının oluşmasını sağlamıştır.



Şekil 5.24: $\text{TiN}/\text{VO}_x/\text{TiO}_y/\text{Cu}$ memristör cihazının sinaptik ağırlık değişimi.

6. SONUÇLAR VE YORUMLAR

VO₂ ince filmlerin üretimi ve yapısal karakterizasyon süresince XRD ve Raman sonuçları büyüyen filmlerin amorf yapıda olduğunu ve ayrıca ısıtma işlemleriyle onların VO₂ ve V₂O₅ karışık fazlı kristal yapılara dönüştüğünü ortaya çıkardı. Uygulanan bu ısıtma işlemleriyle filmlerin yüzey mikro yapılarında önemli değişiklikler meydana gelmiştir. En büyük değişiklikler daha yüksek sıcaklıklarda meydana geldi. Ayrıca FTIR sonuçları, VO₂ filmlerinin amorf yapıdaki bantlarına ek olarak kristal formdaki bant yapılarının da oluştuğunu gösterdi. XRD ve Raman analizleri saf VO₂ kristal yapısı ve bağ titreşimleri elde etmek için yüksek sıcaklıklarda ısıtma işlemi yapılabileceğini ancak ısıtma işlemi sırasında oksijen miktarının sınırlandırılması gerektiğini açıkça gösterdi. Hem XRD hem de Raman sonuçları VO₂ amorf yapıların kristal yapıya dönüşebilmeleri için onların yüksek enerjiye ihtiyaç duyduklarını gösterdi. Benzer şekilde PLD sisteminin yeterince yüksek sıcaklığa ulaşamaması nedeniyle TiO₂ yapılarda amorf yapıda meydana geldiler. TiO₂ yapılar da VO₂ yapılarda olduğu gibi yapılan termal işlemlerle kristal yapıya dönüştürülebilmektedir. XPS sonuçları VO_x ve TiO_y yapıların uygun bağlanma enerjileri ile iyi bir formda oluştuğunu gösterdi. Ayrıca XPS sonuçları bu yapıların içerisinde başka bir elemente rastlanmadığına da gösterdi. PL ölçümleri VO_x ve TiO_y yapılar için uygun karakteristik spektrumu meydana getirdi ve ayrıca PL spektrumu bu yapıların içerisinde oksijen boşluklarının olduğunu da gösterdi. Van Der Pauw yöntemi ile oksit yapıların elektriksel özellikleri incelendi. Artan oksit katman kalınlığı ile oksit filmlerin yüzey öz direnç değerlerinin arttığı ve onların n-tipi yarı iletken davranışa sahip oldukları anlaşıldı. Onların sahip oldukları bu n-tipi davranış onların yapılarında oksijen boşluklarına sahip olduklarını bir kere daha gösterdi.

XPS sonuçları, VO_x yapısındaki tek oksit katmanlı memristör cihazlarının oksit katmanlarının VO_x formunda ve literatürle uyumlu iyi bağlanma enerjileri ile oluştuğunu doğruladı. Oksit tabaka kalınlığının artmasıyla VO_x formunda ve bağlanma enerjilerinde bir değişiklik gözlenmedi. PL spektrum sonuçları, oksit tabakası olan VO_x yapısında oksijen boşluklarının bulunduğunu ve film kalınlığının artmasıyla birlikte oksijen boşluklarının miktarının da artma eğiliminde olduğunu açıkça gösterdi. I-V grafikleri de açık bir şekilde tüm cihazların, memristör cihazlar için parmak izi olarak kabul edilen sıkışmış histeresis eğrilerine sahip olduklarını

gösterdi. Memristör cihazların I-V eğrileri ayrıca onların iki kutuplu direnç-anahtarlama davranışına sahip olduklarını göstermiştir. Farklı kalınlıktaki oksit katmanlara sahip cihazların SET ve RESET değerleri birbirinden farklı oldu. Tüm cihazlara ardışık seri darbeler uygulanarak, biyolojik sinapslarda gözlemlenen uzun dönem güçlendirme (LTP) ve uzun dönem çöküntü (LTD) mekanizmalarına denk gelen kademeli akım değişiklikleri elde edildi. Bu ölçümlerde cihazlardaki oksit tabakasının kalınlığının, LTP ve LTD parametrelerini etkileyebilecek önemli bir faktör olduğu anlaşılmıştır. Tüm cihazlar için PPF değerleri düşük olmasına rağmen, biyolojik sistemlerdekine oldukça benzer şekilde daha küçük darbe aralıklarında daha büyük PPF indeksleri elde edildi. Özellikle elde edilen sinaptik ağırlık değişiklikleri, VO_x tabanlı bu memristör cihazlarının yapay sinapslar olarak kullanılabileceğini gösterdi.

Tek oksit katmanlı cihaza ek olarak $TiN/VO_x/TiO_y/Cu$ yığın yapısına sahip iki oksit katamandan oluşan bir memristör cihazda başarıyla üretildi. Cihaz yapısında TiN ve Cu kontak görevi görürken, VO_x/TiO_y oksit katmanları fonksiyonel katman olarak görevlerini başarıyla yerine getirmiştir. XPS sonuçları memristör cihazının oksit katmanlarının VO_x/TiO_y ikili oksit formunda ve literatürle oldukça uyumlu bağlanma enerjileri ile oluştuğunu gösterdi. Ve bu ikili oksit katmanların kimyasal bileşiminde başka bir yabancı madde gözlemlenmedi. I-V grafikleri, cihazın memristör cihazları için parmak izi olarak kabul edilen sıkışmış bir histerisis eğrisine sahip olduğunu gösterdi. Ek olarak, I-V taramaları cihazın iki kutuplu direnç-anahtarlama davranışına sahip olduğunu gösterdi. Cihaza sıralı kare darbeler uygulanarak biyolojik sinapslarda gözlemlenen ve sinaptik LTP ve LTD mekanizmalarına denk gelen kademeli akım değişiklikleri elde edildi. Ayrıca, öncül spike ve sonraki spike yapılarına karşılık gelen atım çiftleri cihaza uygulandığında, biyolojik sinapslarda meydana gelen sinaptik ağırlık değişikliklerinin taklit edildiği gözlemlendi. Elde edilen LTP, LTD ve sinaptik ağırlık değişimleri gibi sinaptik fonksiyonlar, $TiN/VO_x/TiO_y/Cu$ memristör cihazının yapay nöron ve yapay sinaps fonksiyonunu yerine getirebildiğini ve özellikle VO_x/TiO_y fonksiyonel katmanının yapay sinaps görevini başarılı bir şekilde gerçekleştirdiğini gösterdi.

Sinaptik olay başına tek bir memristördeki enerji tüketimi, uygulanan voltaj darbesinin genliğine, darbesine ve yanıt akımına bağlıdır. Cihazlarımız için bu değerler sırasıyla 3V, 0.3 mA ve 300 ms' dir. Böylece cihazlarımız için sinaptik olay başına ortalama

enerji tüketiminin $E = 270 \mu\text{J}$ olduğunu belirledik. Son zamanlarda çok düşük enerji tüketimine sahip farklı tipte memristör cihazları rapor edilmiştir. Memristör cihazlarımızda üst elektrotun yüzey alanı yaklaşık 1 mm^2 ' dir. Bu nedenle, tahmin edilen yüksek enerji tüketimi, bir sinaptik olay süresince ölçülen yüksek akımın bir sonucudur. Memristör cihazların performansını etkileyen birçok faktör vardır. Bu faktörlerden biri anahtarlama katmanının kimyasal bileşimidir. Ayrıca metal oksit filminin epitaksiyel büyümesi, arayüzler arasındaki pürüzlülük, cihazların yüzey alanı ve memristörün genel morfolojisi memristör cihazlarının performansını etkiler. Bu gibi etkiler bizim ürettiğimiz cihazların performansını da etkilemiş olabilir.

KAYNAKLAR

- [1] S. Yu, “Neuro-Inspired Computing With Emerging Nonvolatile Memorys,” *Proceedings of the IEEE*, 106, 2, 260–285, Feb. 2018.
- [2] J. del Valle, J. G. Ramírez, M. J. Rozenberg, and I. K. Schuller, “Challenges in materials and devices for resistive-switching-based neuromorphic computing,” *J Appl Phys*, 124, 21, 211101, Dec. 2018.
- [3] G. E. Moore, “Cramming More Components Onto Integrated Circuits,” *Proceedings of the IEEE*, 86, 1, 82–85, Jan. 1998.
- [4] S. J. Kim, S. Kim, and H. W. Jang, “Competing memristors for brain-inspired computing,” *iScience*, 24, 1, 101889, Jan. 2021.
- [5] W. Yi, K. K. Tsang, S. K. Lam, X. Bai, J. A. Crowell, and E. A. Flores, “Active Memristor Neurons for Neuromorphic Computing,” in *2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, IEEE, Dec. 2019, 22.7.1-22.7.4.
- [6] J. Shalf, “The future of computing beyond Moore’s Law,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378, 2166, 20190061, Mar. 2020.
- [7] D. Ielmini, “Brain-inspired computing with resistive switching memory (RRAM): Devices, synapses and neural networks,” *Microelectron Eng*, 190, 44–53, Apr. 2018.
- [8] J. Tang, F. Yuan, X. Shen, Z. Wang, M. Rao, Y. He, Y. Sun, X. Li, W. Zhang, Y. Li, B. Gao, H. Qian, G. Bi, S. Song, J. J. Yang, H. Wu, “Bridging Biological and Artificial Neural Networks with Emerging Neuromorphic Devices: Fundamentals, Progress, and Challenges,” *Advanced Materials*, 31, 49, Dec. 2019.
- [9] L. Chua, “Resistance switching memories are memristors,” *Appl Phys A Mater Sci Process*, 102, 4, 2011.
- [10] L. O. Chua, “Memristor—The Missing Circuit Element,” *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 18, 5, 1971.
- [11] D. B. Strukov, G. S. Snider, D. R. Stewart, and R. S. Williams, “The missing memristor found,” *Nature*, 453, 7191, 80–83, May 2008.
- [12] R. S. Williams, “How we found the missing Memristor,” *IEEE Spectr*, 45, 12, 2008.
- [13] S. Yu, “Neuro-Inspired Computing with Emerging Nonvolatile Memorys,” *Proceedings of the IEEE*, 106, 2, 2018.
- [14] A. Hoffmann, S. Ramanathan, J. Grollier, A. D. Kent, M. Rozenberg, I. K. Schuller, O. Shpyrko, R. Dynes, Y. Fainman, A. Frano, E. E. Fullerton, G. Galli,

- V. Lomakin, S. P. Ong, A. K. Petford-Long, J. A. Schuller, M. D. Stiles, Y. Takamura, Y. Zhu “Quantum materials for energy-efficient neuromorphic computing: Opportunities and challenges,” *APL Mater*, 10, 7, Jul. 2022.
- [15] C. Mead, “Neuromorphic electronic systems,” *Proceedings of the IEEE*, 78, 10, 1629–1636, 1990.
- [16] S. H. Jo, T. Chang, I. Ebong, B. B. Bhadviya, P. Mazumder, and W. Lu, “Nanoscale Memristor Device as Synapse in Neuromorphic Systems,” *Nano Lett*, 10, 4, 1297–1301, Apr. 2010.
- [17] F. Rahma and S. Muneam, *Memristive Nonlinear Electronic Circuits*. Cham: Springer International Publishing, 2019.
- [18] F. Qin, Y. Zhang, H. W. Song, and S. Lee, “Enhancing memristor fundamentals through instrumental characterization and understanding reliability issues,” *Mater Adv*, 4, 8, 1850–1875, 2023.
- [19] K. Atkin, “An introduction to the memristor,” *Phys Educ*, 48, 3, 317–321, May 2013.
- [20] M. Wang, S. Cai, C. Pan, C. Wang, X. Lian, Y. Zhuo, K. Xu, T. Cao, X. Pan, B. Wang, S. Liang, J. J. Yang, P. Wang, F. Miao “Robust memristors based on layered two-dimensional materials,” *Nat Electron*, 1, 2, 130–136, Feb. 2018.
- [21] S. Kumar, X. Wang, J. P. Strachan, Y. Yang, and W. D. Lu, “Dynamical memristors for higher-complexity neuromorphic computing,” *Nature Reviews Materials*, 7, 7, 2022.
- [22] Khaled Alhaj Ali, “New design approaches for flexible architectures and in-memory computing based on memristor technologies,” *THESE DE DOCTORAT DE, Information and Communication Mathematics and Science and Technologies*, 2020.
- [23] X. Duan, Z. Cao, K. Gao, W. Yan, S. Sun, G. Zhou, Z. Wu, F. Ren, B. Sun, “Memristor-Based Artificial Chips,” *ACS Nano*, 18, 1, 2024.
- [24] Y. Xiao, B. Jiang, Z. Zhang, S. Ke, Y. Jin, X. Wen, C. Ye, “A review of memristor: material and structure design, device performance, applications and prospects,” *Sci Technol Adv Mater*, 24, 1, Dec. 2023.
- [25] J. J. Yang, D. B. Strukov, and D. R. Stewart, “Memristive devices for computing,” *Nat Nanotechnol*, vol. 8, 1, 13–24, Jan. 2013.
- [26] A. Zaman, E. Shin, C. Yakopcic, T. M. Taha, and G. Subramanyam, “Experimental Study of Memristors for use in Neuromorphic Computing,” in *NAECON 2018 - IEEE National Aerospace and Electronics Conference*, IEEE, Jul. 2018, 370–374.

- [27] S. H. Jo, T. Chang, I. Ebong, B. B. Bhadviya, P. Mazumder, and W. Lu, "Nanoscale Memristor Device as Synapse in Neuromorphic Systems," *Nano Lett*, 10, 4, 1297–1301, Apr. 2010.
- [28] B. Sun, S. Ranjan, G. Zhou, T. Guo, Y. Xia, L. Wei, Y.N. Zhou, Y.A. Wu, "Multistate resistive switching behaviors for neuromorphic computing in memristor," *Mater Today Adv*, 9, 2021.
- [29] B. Hayes, "The Memristor," *Am Sci*, vol. 99, 2, 106, 2011.
- [30] H. Zhao, Z. Liu, J. Tang, B. Gao, Y. Zhang, H. Qian, H. Wu, "Memristor-based signal processing for edge computing," *Tsinghua Sci Technol*, 27, 3, 455–471, Jun. 2022.
- [31] W. Yi, K. K. Tsang, S. K. Lam, X. Bai, J. A. Crowell, and E. A. Flores, "Active Memristor Neurons for Neuromorphic Computing," in *Technical Digest - International Electron Devices Meeting, IEDM*, 2019.
- [32] N. Serafino and M. Zaghloul, "Review of nanoscale memristor devices as synapses in neuromorphic systems," in *Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 2013.
- [33] D. Sarkar, J. Tao, W. Wang, Q. Lin, M. Yeung, C. Ren, R. Kapadia, "Mimicking Biological Synaptic Functionality with an Indium Phosphide Synaptic Device on Silicon for Scalable Neuromorphic Computing," *ACS Nano*, 12, 2, 2018.
- [34] N. Yang, J. Zhang, J.-K. Huang, Y. Liu, J. Shi, Q. Si, J. Yang, S. Li, "Multitasking Memristor for High Performance and Ultralow Power Artificial Synaptic Device Application," *ACS Appl Electron Mater*, 4, 6, 2022.
- [35] T. Ahmed, S. Walia, E. L. H. Mayes, R. Ramanathan, V. Bansal, M. Bhaskaran, S. Sriram, O. Kavehei, "Time and rate dependent synaptic learning in neuro-mimicking resistive memories," *Sci Rep*, 9, 1, 15404, Oct. 2019.
- [36] Y. Li, Y. Zhong, J. Zhang, L. Xu, Q. Wang, H. Sun, H. Tong, X. C. X. Miao, "Activity-dependent synaptic plasticity of a chalcogenide electronic synapse for neuromorphic systems," *Sci Rep*, 4, 2014.
- [37] J. Tang, F. Yuan, X. Shen, Z. Wang, M. Rao, Y. He, Y. Sun, X. Li, W. Zhang, Y. Li, B. Gao, H. Qian, G. Bi, S. Song, J. J. Yang, H. Wu, "Bridging Biological and Artificial Neural Networks with Emerging Neuromorphic Devices: Fundamentals, Progress, and Challenges," *Advanced Materials*, 31, 49, Dec. 2019.
- [38] V. Milo, G. Pedretti, R. Carboni, A. Calderoni, N. Ramaswamy, S. Ambrogio, D. Ielmini, "Demonstration of hybrid CMOS/RRAM neural networks with spike time/rate-dependent plasticity," in *2016 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, IEEE, Dec. 2016, 16.8.1-16.8.4.

- [39] T. S. Gotarredona, T. Masquelier, T. Prodromakis, G. Indiveri, and B. Linares-Barranco, "STDP and STDP variations with memristors for spiking neuromorphic learning systems," *Front Neurosci*, 7, 2013.
- [40] J. Zhu, T. Zhang, Y. Yang, and R. Huang, "A comprehensive review on emerging artificial neuromorphic devices," *Appl Phys Rev*, 7, 1, Mar. 2020.
- [41] M. R. Azghadi, Y. C. Chen, J. K. Eshraghian, J. Chen, C. Y. Lin, A. Amirsoleimani, A. Mehonic, A. J. Kenyon, B. Fowler, J. C. Lee, Y. F. Chang, "Complementary Metal-Oxide Semiconductor and Memristive Hardware for Neuromorphic Computing," *Advanced Intelligent Systems*, 2, 5, May 2020.
- [42] Y. Li and K.-W. Ang, "Hardware Implementation of Neuromorphic Computing Using Large-Scale Memristor Crossbar Arrays," *Advanced Intelligent Systems*, 3, 1, Jan. 2021.
- [43] Y. Li and K.-W. Ang, "Hardware Implementation of Neuromorphic Computing Using Large-Scale Memristor Crossbar Arrays," *Advanced Intelligent Systems*, 3, 1, Jan. 2021.
- [44] M. M. H. Tanim, Z. Templin, and F. Zhao, "Natural Organic Materials Based Memristors and Transistors for Artificial Synaptic Devices in Sustainable Neuromorphic Computing Systems," *Micromachines (Basel)*, 14, 2, 235, Jan. 2023.
- [45] Y. Shuai, X. Pan, and X. Sun, "Spike-Timing-Dependent Plasticity in Memristors," in *Memristor and Memristive Neural Networks*, InTech, 2018.
- [46] S. Kvatinsky, E. G. Friedman, A. Kolodny, and U. C. Weiser, "TEAM: ThrEshold Adaptive Memristor Model," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 60, 1, 211–221, Jan. 2013.
- [47] F. Miao, J. P. Strachan, J. J. Yang, M. X. Zhang, I. Goldfarb, A. C. Torrezan, P. Eschbach, R. D. Kelley, G. M. Ribeiro, R. S. Williams, "Anatomy of a nanoscale conduction channel reveals the mechanism of a high-performance memristor," *Advanced Materials*, 23, 47, 2011.
- [48] J. G. Simmons, "Generalized Formula for the Electric Tunnel Effect between Similar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film," *J Appl Phys*, 34, 6, 1963.
- [49] D. Ielmini, Z. Wang, and Y. Liu, "Brain-inspired computing via memory device physics," *APL Mater*, 9, 5, May 2021.
- [50] M. M. Waldrop, "Neuroelectronics: Smart connections," *Nature*, vol. 503, 7474, 22–24, Nov. 2013.
- [51] J. Wang and F. Zhuge, "Memristive Synapses for Brain-Inspired Computing," *Adv Mater Technol*, 4, 3, Mar. 2019.

- [52] G. Ding, Jiyu Zhao, K. Zhou, Q. Zheng, S. T. Han, X. Peng, Y. Zhou, “Porous crystalline materials for memories and neuromorphic computing systems,” *Chem Soc Rev*, 52, 20, 7071–7136, 2023.
- [53] C. Li, M. Hu, Y. Li, H. Jiang, N. Ge, E. Montgomery, J. Zhang, W. Song, N. Dávila, C. E. Graves, Z. Li, J. P. Strachan, P. Lin, Z. Wang, M. Barnell, Q. Wu, R. S. Williams, J. J. Yang, Q. Xia, “Analogue signal and image processing with large memristor crossbars,” *Nat Electron*, 1, 1, 52–59, Jan. 2018.
- [54] Q. Xia, J. J. Yang, “Memristive crossbar arrays for brain-inspired computing,” *Nat Mater*, 18, 4, 309–323, Apr. 2019.
- [55] J. J. Yang, D. B. Strukov, D. R. Stewart, “Memristive devices for computing,” *Nat Nanotechnol*, 8, 1, 13–24, Jan. 2013.
- [56] Edd Gent, “New Artificial Synapses Pave Way for Brain-Like Computers,” *Live Science*, Sep. 2016.
- [57] Y. Babacan, F. Kaçar, “Memristor emulator with spike-timing-dependent-plasticity,” *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 73, 16–22, Mar. 2017.
- [58] A. Zaman, E. Shin, C. Yakopcic, T. M. Taha, and G. Subramanyam, “Experimental Study of Memristors for use in Neuromorphic Computing,” in *Proceedings of the IEEE National Aerospace Electronics Conference, NAECON*, 2018.
- [59] “BioRender: Scientific Image and Illustration Software,” <https://www.biorender.com/>.
- [60] M. Darwish and L. Pohl, “Insulator Metal Transition-Based Selector in Crossbar Memory Arrays,” *Electronic Materials*, 5, 1, 17–29, Feb. 2024.
- [61] L. Chen, C. Li, T. Huang, X. He, H. Li, and Y. Chen, “STDP learning rule based on memristor with STDP property,” in *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, 2014.
- [62] “Understanding the building blocks for an electronic brain,” <https://phys.org/>.
- [63] W. Huang, X. Xia, C. Zhu, P. Steichen, W. Quan, W. Mao, J. Yang, L. Chu, X. Li, “Memristive Artificial Synapses for Neuromorphic Computing,” *Nanomicro Lett*, 13, 1, 85, Dec. 2021.
- [64] Z. Wu, P. Shi, R. Xing, T. Yu, L. Zhao, L. Wei, D. Wang, S. Yan, Y. Tian, L. Bai, Y. Chen, “Flexible Mott Synaptic Transistor on Polyimide Substrate for Physical Neural Networks,” *Adv Electron Mater*, vol. 8, no. 9, Sep. 2022.
- [65] P. Hu, P. Hu, T. D. Vu, M. Li, S. Wang, Y. Ke, X. Zeng, L. Mai, Y. Long, “Vanadium Oxide: Phase Diagrams, Structures, Synthesis, and Applications,” *Chem Rev*, 123, 8, 4353–4415, Apr. 2023.

- [66] J. Jiang, J. Guo, X. Wan, Y. Yang, H. Xie, D. Niu, J. Yang, J. He, Y. Gao, Q. Wan, “2D MoS₂ Neuromorphic Devices for Brain-Like Computational Systems,” *Small*, 13, 29, 2017.
- [67] W. Huang, X. Xia, C. Zhu, P. Steichen, W. Quan, W. Mao, J. Yang, L. Chu, X. Li, “Memristive Artificial Synapses for Neuromorphic Computing,” *Nanomicro Lett*, 13, 1, 85, Dec. 2021.
- [68] M. J. Lee, S. Han, S. H. Jeon, B. H. Park, B. S. Kang, S. E. Ahn, K. H. Kim, C. B. Lee, C. J. Kim, I. K. Yoo, D. H. Seo, X. S. Li, J. B. Park, J. H. Lee, Y. Park, “Electrical Manipulation of Nanofilaments in Transition-Metal Oxides for Resistance-Based Memory,” *Nano Lett*, 9, 4, 1476–1481, Apr. 2009.
- [69] Y. Yang, P. Gao, S. Gaba, T. Chang, X. Pan, and W. Lu, “Observation of conducting filament growth in nanoscale resistive memories,” *Nat Commun*, 3, 1, 732, Jan. 2012.
- [70] D. Ju, J. H. Kim, and S. Kim, “Highly uniform resistive switching characteristics of Ti/TaO_x/ITO memristor devices for neuromorphic system,” *J Alloys Compd*, 961 170920, Oct. 2023.
- [71] Q. Lu, F. Sun, L. Liu, L. Li, Y. Wang, M. Hao, Z. Wang, S. Wang, T. Zhang, “Biological receptor-inspired flexible artificial synapse based on ionic dynamics,” *Microsyst Nanoeng*, 6, 1, 2020.
- [72] J. Choi, J. S. Han, K. Hong, S. Y. Kim, and H. W. Jang, “Organic-Inorganic Hybrid Halide Perovskites for Memories, Transistors, and Artificial Synapses,” *Advanced Materials*, 30, 42, 1704002, Oct. 2018.
- [73] Y. V. D. Burgt, E. Lubberman, E. J. Fuller, S. T. Keene, G. C. Faria, S. Agarwal, M. J. Marinella, A. A. Talin, A. Salleo, “A non-volatile organic electrochemical device as a low-voltage artificial synapse for neuromorphic computing,” *Nat Mater*, 16, 4, 2017.
- [74] B. Sun, T. Guo, G. Zhou, S. Ranjan, Y. Jiao, L. Wei, Y. N. Zhou, Y. A. Wu, “Synaptic devices based neuromorphic computing applications in artificial intelligence,” *Materials Today Physics*, 18, 100393, May 2021.
- [75] K. Zhou, G. Shang, H. Hsu, S. Han, V. A. L. Roy, and Y. Zhou, “Emerging 2D Metal Oxides: From Synthesis to Device Integration,” *Advanced Materials*, 35, 21, May 2023.
- [76] W.-J. Lee and Y.-H. Chang, “Growth without Postannealing of Monoclinic VO₂ Thin Film by Atomic Layer Deposition Using VCl₄ as Precursor,” *Coatings*, 8, 12, 431, Nov. 2018.
- [77] Y. L. Wang, M. C. Li, and L. C. Zhao, “The effects of vacuum annealing on the structure of VO₂ thin films,” *Surf Coat Technol*, 201, 15, 6772–6776, Apr. 2007.

- [78] Z. Shao, X. Cao, H. Luo, and P. Jin, “Recent progress in the phase-transition mechanism and modulation of vanadium dioxide materials,” *NPG Asia Mater*, 10, 7, 581–605, Jul. 2018.
- [79] A. C. S. Figueiredo, “Growth of Vanadium Dioxide (VO₂) Nanostructures by Controlling the Hydrothermal Synthesis Parameters,” 2016.
- [80] D. Malarde, M. Afzaal, D. W. Sheel, H. M. Yates, K. Delfanazari, O. L. Muskens, “Optimized Atmospheric-Pressure Chemical Vapor Deposition Thermochromic VO₂ Thin Films for Intelligent Window Applications,” *ACS Omega*, 2, 3, 1040–1046, Mar. 2017.
- [81] S. A. Bukhari, S. A. Bukhari, S. Kumar, P. Kumar, S. P. Gumfekar, H. J. Chung, T. Thundat, A. Goswami, “The effect of oxygen flow rate on metal–insulator transition (MIT) characteristics of vanadium dioxide (VO₂) thin films by pulsed laser deposition (PLD),” *Appl Surf Sci*, 529, 146995, Nov. 2020.
- [82] T. Christmann, B. Felde, W. Niessner, D. Schalch, and A. Scharmann, “Thermochromic VO₂ thin films studied by photoelectron spectroscopy,” *Thin Solid Films*, 287, 1–2, 134–138, Oct. 1996.
- [83] A. S. Bakri, M. Z. Sahdan, F. Adriyanto, N. A. Raship, N. D. M. Said, S. A. Abdullah, M. S. Rahim, “Effect of annealing temperature of titanium dioxide thin films on structural and electrical properties,” 2017.
- [84] E. Kumi-Barimah, R. Penhale-Jones, A. Salimian, H. Upadhyaya, A. Hasnath, and G. Jose, “Phase evolution, morphological, optical and electrical properties of femtosecond pulsed laser deposited TiO₂ thin films,” *Sci Rep*, 10, 1, 10144, Jun. 2020.
- [85] S. A. Rawool, K. K. Yadav, and V. Polshettiwar, “Defective TiO₂ for photocatalytic CO₂ conversion to fuels and chemicals,” *Chem Sci*, 12, 12, 4267–4299, 2021.
- [86] S. A. Abdullah, M. Z. Sahdan, N. Nafarizal, H. Saim, A. S. Bakri, C. H. C. Rohaida, F. Adriyanto, and Y. Sar, “Photoluminescence study of trap-state defect on TiO₂ thin films at different substrate temperature via RF magnetron sputtering,” *J Phys Conf Ser*, 995, 012067, Apr. 2018.
- [87] M. Mhadhbi, H. Abderazzak, and B. Avar, “Synthesis and Properties of Titanium Dioxide Nanoparticles,” in *Updates on Titanium Dioxide*, Intech Open, 2023.
- [88] M. Jerman and D. Mergel, “Structural investigation of thin TiO₂ films prepared by evaporation and post-heating,” *Thin Solid Films*, 515, 17, 6904–6908, Jun. 2007.
- [89] M. Walczak, E. L. Papadopoulou, M. Sanz, A. Manousaki, J. F. Marco, and M. Castillejo, “Structural and morphological characterization of TiO₂

nanostructured films grown by nanosecond pulsed laser deposition,” *Appl Surf Sci*, 255, 10, 5267–5270, Mar. 2009.

- [90] S. S. Alobaidi, A. A. Yousif, “Synthesis Of Nanostructured TiO₂ Thin Films By Pulsed Laser Deposition (PLD) And The Effect Of Annealing Temperature On Structural And Morphological Properties,” *Ibn Al-Haitham Jour. for Pure & Appl. Sci.* , 26, 3, 143–152, Dec. 2013.
- [91] S. Hong, S. H. Chang, C. Phatak, B. M.Kope, Y. Nishi, S. Chattopadhyay, and J. H. Kim, “(Invited) Mechanism Study of Reversible Resistivity Change in Oxide Thin Film,” *ECS Meeting Abstracts*, MA2015-02, 16, 2015.
- [92] J. Lee, K. Yang, J. Y Kwon, J. E. Kim, D. I. Han, D. H. Lee, J. H. Yoon, M. H. Park, “Role of oxygen vacancies in ferroelectric or resistive switching hafnium oxide,” *Nano Convergence*, 10, 1, 2023.
- [93] H. Meng, S. Huang, and Y. Jiang, “The role of oxygen vacancies on resistive switching properties of oxide materials,” *AIMS Mater Sci*, 7, 5, 2020.
- [94] H. Meng, S. Huang, and Y. Jiang, “The role of oxygen vacancies on resistive switching properties of oxide materials,” *AIMS Mater Sci*, 7, 5, 665–683, 2020.
- [95] O. A. Novodvorsky, L. S. Parshina, A. A. Lotin, V. A. Mikhalevsky, O. D. Khramova, E. A. Cherebylo, and V. Ya. Panchenko, “Vanadium- and Titanium Dioxide-Based Memristors Fabricated via Pulsed Laser Deposition,” *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 12, 2, 322–327, Mar. 2018.
- [96] L. Hu, W. Han, and H. Wang, “Resistive switching and synaptic learning performance of a TiO₂ thin film based device prepared by sol–gel and spin coating techniques,” *Nanotechnology*, 31, 15, 155202, Apr. 2020.
- [97] D.W. Tao, Z.J. Jiang, J.B. Chen, B.J. Qi, K. Zhang, and C.W. Wang, “Stable resistive switching characteristics from highly ordered Cu/TiO₂/Ti nanopore array membrane memristors,” *Appl Surf Sci*, 539, 148161, Feb. 2021.
- [98] A. J. Haider, T. Alawsi, M. J. Haider, B. A. Taha, and H. A. Marhoon, “A comprehensive review on pulsed laser deposition technique to effective nanostructure production: trends and challenges,” *Opt Quantum Electron*, vol. 54, 8, 488, Aug. 2022.
- [99] G. Ekinici, B. Özkal, N. A. A. S. Al-Jawfi, and S. Kazan, “Investigation of Optical and Structural Properties of VO₂ Thin Films by Thermal Treatment,” *Journal of Advanced Applied Sciences*, 2, 2, 57–63, Dec. 2023.
- [100] D. Benetti, R. Nouar, R. Nechache, H. Pepin, A. Sarkissian, F. Rosei, J. M. MacLeod “Combined magnetron sputtering and pulsed laser deposition of TiO₂ and BFCO thin films,” *Sci Rep*, 7, 1, 2503, May 2017.

- [101] J. Li, G. K. Ren, J. Chen, X. Chen, W. Wu, Y. Liu, X. Chen, J. Song, Y. H. Lin, Y. Shi, "Facilitating Complex Thin Film Deposition by Using Magnetron Sputtering: A Review," JOM, 74, 8, 2022.
- [102] J. T. Gudmundsson, "Physics and technology of magnetron sputtering discharges," Plasma Sources Sci Technol, 29, 11, 113001, Nov. 2020.
- [103] M. C. Biesinger, L. W. M. Lau, A. R. Gerson, and R. St. C. Smart, "Resolving surface chemical states in XPS analysis of first row transition metals, oxides and hydroxides: Sc, Ti, V, Cu and Zn," Appl Surf Sci, 257, 3, 887–898, Nov. 2010.
- [104] A. A. Bunaciu, E. G. Udriștioiu, and H. Y. Aboul-Enein, "X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications," Critical Reviews in Analytical Chemistry, 45, 4, 2015.
- [105] "Unmasking Microabsorption: Why Fluorescence Suppression in Powder XRD Does More Harm Than Good," <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=20003>.
- [106] J. Serafińczuk, J. Pietrucha, G. Schroeder, and T. P. Gotszalk, "Thin film thickness determination using X-ray reflectivity and Savitzky-Golay algorithm," in Optica Applicata, 2011.
- [107] M. Tebyetekerwa, J. Zhang, Z. Xu, T. N. Truong, Z. Yin, Y. Lu, Seeram Ramakrishna 5, Daniel Macdonald 1, Hieu T Nguyen, "Mechanisms and applications of steady-state photoluminescence spectroscopy in two-dimensional transition-metal dichalcogenides," ACS Nano, 14, 11. 2020.
- [108] Vallikkodi Mahalingam, "Synthesis, Growth And Characterization Of Piperazinium P-Aminobenzoate And Piperazinium P-Chlorobenzoate Nonlinear Optical Single Crystals April 2018," Alagappa University, 2018.
- [109] A. Orlando, F. Franceschini, C. Muscas, S. Pidkova, M. Bartoli, M. Rovere, A. Tagliaferro "A comprehensive review on Raman spectroscopy applications," Chemosensors, 9, 9. 2021.
- [110] "What is Raman Spectroscopy?", <https://www.horiba.com/esp/scientific/technologies/raman-imaging-and-spectroscopy/raman-spectroscopy/>.
- [111] M. Distaso, V. Lautenbach, M. J. Uttinger, J. Walter, C. Lübbert, T. Thajudeen, W. Peukert "A widely applicable method to stabilize nanoparticles comprising oxygen-rich functional groups," Powder Technol, 407, 2022.
- [112] S. A. Khan, S. B. Khan, L. U. Khan, A. Farooq, K. Akhtar, and A. M. Asiri, "Fourier transform infrared spectroscopy: Fundamentals and application in functional groups and nanomaterials characterization," in Handbook of Materials Characterization, 2018.

- [113] “Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) Service,” <https://www.creative-biostructure.com/fourier-transform-infrared-spectroscopy-ftir-service.htm>.
- [114] A. Abdullah and A. Mohammed, “Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review,” Proceedings of 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics - HERVEX, 2019.
- [115] “Scanning Electron Microscopy,” https://myscope.training/SEM_SEM_Basics.
- [116] L. J. V. V. Pauw, “A Method Of Measuring Specific Resistivity And Hall Effect Of Discs Of Arbitrary Shape,” in *Semiconductor Devices: Pioneering Papers*, World Scientific, 1991, 174–182.
- [117] A. J. Allison, D.C. Barnwell, J.R. Colon, “Determining Carrier Concentration of Si-doped GaN using DC Hall Effect,” Student Publications > Undergraduate Theses and Capstone Projects > 206, Apr. 2022.
- [118] S. G. Hu, Y. Liu, T. P. Chen, Z. Liu, Q. Yu, L. J. Deng, Y. Yin, S. Hosaka, “Emulating the paired-pulse facilitation of a biological synapse with a NiO_x-based memristor,” *Appl Phys Lett*, 102, 18, May 2013.
- [119] C. Liu, Y. Q. Cao, D. Wu, and A. D. Li, “Simulation of Biologic Synapse Through Organic-Inorganic Hybrid Memristors Using Novel Ti-Based Maleic Acid/TiO₂ Ultrathin Films,” *IEEE Electron Device Letters*, 41, 1, 155–158, Jan. 2020.
- [120] C. Chen, Y. Zhao, X. Pan, V. Kuryatkov, A. Bernussi, M. Holtz, Z. Fan, “Influence of defects on structural and electrical properties of VO₂ thin films,” *J Appl Phys*, 110, 2, Jul. 2011.
- [121] Z. Huang, S. Chen, C. Lv, Y. Huang, and J. Lai, “Infrared characteristics of VO₂ thin films for smart window and laser protection applications,” *Appl Phys Lett*, 101, 19, 191905, Nov. 2012.
- [122] J. A. Koza, Z. He, A. S. Miller, and J. A. Switzer, “Resistance Switching in Electrodeposited VO₂ Thin Films,” *Chemistry of Materials*, 23, 18, 4105–4108, Sep. 2011.
- [123] H. Liu, D. Wan, A. Ishaq, L. Chen, B. Guo, S. Shi, H. Luo, Y. Gao, “Sputtering Deposition of Sandwich-Structured V₂O₅ /Metal (V, W)/V₂O₅ Multilayers for the Preparation of High-Performance Thermally Sensitive VO₂ Thin Films with Selectivity of VO₂ (B) and VO₂ (M) Polymorph,” *ACS Appl Mater Interfaces*, 8, 12, 7884–7890, Mar. 2016.
- [124] Y. Y. Luo, L. Q. Zhu, Y. X. Zhang, S. S. Pan, S. C. Xu, M. Liu, G. H. Li, “Optimization of microstructure and optical properties of VO₂ thin film prepared by reactive sputtering,” *J Appl Phys*, 113, 18, May 2013.

- [125] X. Guo, Y. Tan, Y. Hu, Z. Zafar, J. Liu, and J. Zou, “High quality VO₂ thin films synthesized from V₂O₅ powder for sensitive near-infrared detection,” *Sci Rep*, 11, 1, 21749, Nov. 2021.
- [126] V. P. Prasad, B. Dey, S. Bulou, T. Schenk, and N. Bahlawane, “Study of VO₂ thin film synthesis by atomic layer deposition,” *Mater Today Chem*, 12, 332–342, Jun. 2019.
- [127] P. Shvets, O. Dikaya, K. Maksimova, and A. Goikhman, “A review of Raman spectroscopy of vanadium oxides,” *Journal of Raman Spectroscopy*, 50, 8, 1226–1244, Aug. 2019.
- [128] O. A. Novodvorsky, L. S. Parshina, A. A. Lotin, V. A. Mikhalevsky, O. D. Khramova, E. A. Cherebylo, V. Y. Panchenko, “Vanadium- and Titanium Dioxide-Based Memristors Fabricated via Pulsed Laser Deposition,” *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 12, 2, 322–327, Mar. 2018.
- [129] S. Joshi, N. Smieszek, and V. Chakrapani, “Effects of charge fluctuation and charge regulation on the phase transitions in stoichiometric VO₂,” *Sci Rep*, 10, 1, 17121, Oct. 2020.
- [130] D. Zomaya, W. Z. Xu, B. Grohe, S. Mittler, and P. A. Charpentier, “Bimodal Size Distribution of VO₂ Nanoparticles in Hydrophilic Polymer Films for Temperature-Triggered Infrared Transmission Control,” *ACS Appl Nano Mater*, 3, 7, 6645–6653, Jul. 2020.
- [131] M. Li, Y. Cheng, C. Fang, J. Chen, X. Zhang, and M. Wang, “Thermochromic performances and structure controlling of self-assembled novel SiO₂@CQDs/VO₂(M) powders,” *J Solgel Sci Technol*, 104, 1, 116–124, Oct. 2022.
- [132] H. Ji, D. Liu, H. Cheng, C. Zhang, L. Yang, and D. Ren, “Infrared thermochromic properties of monoclinic VO₂ nanopowders using a malic acid-assisted hydrothermal method for adaptive camouflage,” *RSC Adv*, 7, 9, 5189–5194, 2017.
- [133] T. Yamaki, T. Sumita, S. Yamamoto, and A. Miyashita, “Preparation of epitaxial TiO₂ films by PLD for photocatalyst applications,” *J Cryst Growth*, 237–239, 574–579, Apr. 2002.
- [134] D. Rafieian, W. Ogieglo, T. Savenije, and R. G. H. Lammertink, “Controlled formation of anatase and rutile TiO₂ thin films by reactive magnetron sputtering,” *AIP Adv*, 5, 9, 097168, Sep. 2015.
- [135] S. Sankar and K. G. Gopchandran, “Effect of annealing on the structural, electrical and optical properties of nanostructured TiO₂ thin films,” *Crystal Research and Technology*, 44, 9, 989–994, Sep. 2009.

- [136] M. H. Habibi, N. Talebian, and J.-H. Choi, "The effect of annealing on photocatalytic properties of nanostructured titanium dioxide thin films," *Dyes and Pigments*, 73, 1, 103–110, Jan. 2007.
- [137] X. Peng, Y. Yang, Y. Hou, H. C. Travaglini, L. Hellwig, S. Hihath, K. V. Benthem, K. Lee, W. Liu, and D. Yu "Efficient and Hysteresis-Free Field Effect Modulation of Ambipolarly Doped Vanadium Dioxide Nanowires," *Phys Rev Appl*, 5, 5, 2016.
- [138] V. C. Anitha, A. N. Banerjee, and S. W. Joo, "Recent developments in TiO₂ as n- and p-type transparent semiconductors: synthesis, modification, properties, and energy-related applications," *Journal of Materials Science*, 50, 23, 2015.
- [139] F. U. Begara, A. Crunteanu, and J.P. Raskin, "Raman and XPS characterization of vanadium oxide thin films with temperature," *Appl Surf Sci*, 403, 717–727, May 2017.
- [140] J. Martinez, S. Dionizio, N. Gutierrez, E. Mosquera, J. E. Diosa, G. Bolaños, O. Moran, "General aspects of the physical behavior of polycrystalline BiFeO₃/VO₂ bilayers grown on sapphire substrates," *Applied Physics A*, 128, 8, 720, Aug. 2022.
- [141] X. Liu, S.W. Wang, F. Chen, L. Yu, and X. Chen, "Tuning phase transition temperature of VO₂ thin films by annealing atmosphere," *J Phys D Appl Phys*, 48, 26, 265104, Jul. 2015.
- [142] M. Saini, B. S. Dehiya, A. Umar, and M. S. Goyat, "Phase modulation in nanocrystalline vanadium di-oxide (VO₂) nanostructures using citric acid via one pot hydrothermal method," *Ceram Int*, 45, 15, 18452–18461, Oct. 2019.
- [143] M. Xiao, K. P. Musselman, W. W. Duley, and Y. N. Zhou, "Reliable and Low-Power Multilevel Resistive Switching in TiO₂ Nanorod Arrays Structured with a TiO_x Seed Layer," *ACS Appl Mater Interfaces*, 9, 5, 4808–4817, Feb. 2017.
- [144] J. Guo, L. Liu, B. Bian, J. Wang, X. Zhao, Y. Zhang, Y. Yan, "Ligand Exchange Reaction Enables Digital-To-Analog Resistive Switching and Artificial Synapse within Metal Nanoparticles," *Adv Funct Mater*, 33, 16, Apr. 2023.
- [145] Z. Xu, F. Li, C. Wu, F. Ma, Y. Zheng, K. Yang, W. Chen, H. Hu, T. Guo, T. W. Kim, "Ultrathin electronic synapse having high temporal/spatial uniformity and an Al₂O₃/graphene quantum dots/Al₂O₃ sandwich structure for neuromorphic computing," *NPG Asia Mater*, 11, 1, 18, Dec. 2019.
- [146] S. G. Hu, Y. Liu, T. P. Chen, Z. Liu, M. Yang, Q. Yu, S. Fung, "Effect of Heat Diffusion During State Transitions in Resistive Switching Memory Device Based on Nickel-Rich Nickel Oxide Film," *IEEE Trans Electron Devices*, 59, 5, 1558–1562, May 2012.
- [147] P. S. Subin, A. S. Asha, K. J. Saji, and M. K. Jayaraj, "Spike-dependent plasticity modulation in TiO₂-based synaptic device," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 10, 13051–13061, May 2021.

- [148] T. Mabilia Masiala, "Influence of pH Preparation on the Photo-Response of Electrodeposited Titanium Dioxide (TiO_2) Thin Films," International Journal of Materials Science and Applications, 5, 5, 207, 2016.

ÖZGEÇMİŞ

Gökhan EKİNCİ. İlköğrenimi ve orta öğrenimini Tezer Taşkiran İÖO’nda tamamladı. 2005 yılında Tuğrul Bey Lisesinden mezun olduktan sonra 2008 yılında başladığı Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünden 2013 yılında başarıyla mezun oldu. 2014 yılında yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında başladı ve 2016 yılında bu eğitimini tamamladı. 2019 yılında aynı üniversite ve bölümde doktora eğitimine başladı.

TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR

G. Ekinici, B. Özkal, NAAS Al-Jawfi, S. Kazan, Investigation of Optical and Structural Properties of VO₂ Thin Films by Thermal Treatment, Journal of Advanced Applied Sciences 2 (2), 57-63, (2023)

G. Ekinici, B. Özkal and S. Kazan, Investigation of Resistance Switching and Synaptic Properties of VO_x for Neuromorphic Applications, ACS Omega, 5, 2024, <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c02001>

G. Ekinici, B. Özkal, N. Ali. A. S. Al-jawfi, S. Kazan, Synthesis and Structural Survey of VO₂ Thin Films for Memristive Systems, 17th Nanoscience & Nanotechnology Conference, 27-29 August 2023, İzmir-Turkey

G. Ekinici, B. Özkal, N. Ali. A. S. Al-jawfi, S. Kazan Investigation of Optical and Structural Properties of VO₂ Thin Films by Thermal Treatment, 1 st International Conference On Sensor, Detector, Materials Science And Technologies, October 05-07, 2023, Bolu-Türkiye

G. Ekinici, B. Özkal, N. Ali. A. S. Al-jawfi, S. Kazan, Growth and Characterization of VO₂ Thin Films for Memristor Devices, 7 Th Graduate Researchs Symposium 2023, 31- May-1 June 2023, Kocaeli- Turkey