



**MEMRİSTÖR'ÜN ÜRETİM PARAMETRELERİNİN
DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞINA ETKİSİ**

Erkan CENGİZ

Yüksek Lisans Tezi

Nanobilim ve Nanomühendislik Ana Bilim Dalı

Doç. Dr. Tevhit KARACALI

2016

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MEMRİSTÖR'ÜN ÜRETİM PARAMETRELERİNİN
DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞINA ETKİSİ**

Erkan CENGİZ

NANOBİLİM ve NANOMÜHENDİSLİK ANA BİLİM DALI

**ERZURUM
2016**

Her hakkı saklıdır



TEZ ONAY FORMU

**MEMRİSTÖR'ÜN ÜRETİM PARAMETRELERİNİN DOĞRUSAL OLMAYAN
DAVRANIŞINA ETKİSİ**

Doç. Dr. Tevhit KARACALI danışmanlığında, Erkan CENGİZ tarafından hazırlanan bu çalışma, 08/06/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı Nanelektronik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU

İmza :

Üye : Doç. Dr. Tevhit KARACALI

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Çağlar DUMAN

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun **09.06/2016** tarih ve **.24...../..15.....** nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Ertan YILDIRIM
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MEMRİSTÖR'ÜN ÜRETİM PARAMETRELERİNİN DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞINA ETKİSİ

Erkan CENGİZ

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Nanobilim ve Nano Mühendislik Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Tevhit KARACALI

Bu çalışmada 111T217 nolu Tübitak projesi kapsamında büyütülen farklı Memristör yapılarının fabrikasyon parametrelerine bağımlılığı incelenmiştir. Bu yapıların akım-gerilim ölçümleri ile literatürde önerilen doğrusal olmayan model kullanılarak MATLAB ortamında her bir Memristör için R_{ON} ve R_{OFF} değerleri hesaplanmıştır. Bu değerlere fabrikasyon parametrelerinin etkisi araştırılmıştır.

2016, 62 sayfa

Anahtar Kelimeler: Memristör, Memristif Sistemler, ReRAM

ABSTRACT

Master Thesis

THE EFFECT TO THE NON-LINEAR BEHAVIOR OF THE PRODUCTION PARAMETERS OF MEMRISTOR

Erkan CENGİZ

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Nanoscience and Nano Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Tevhit KARACALI

In this study we examined dependence of different memristor structures grown within the Tubitak project 111T217. In study we calculated values of R_{ON} and R_{OFF} for each memristor in MATLAB via the nonlinear model proposed in literature by using current-volt measures of these fabrication parameters. At the end of the study we investigated effect of fabrication parameters to these values.

2016, 62 pages

Keywords: Memristor, Memristive Systems, ReRAM

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı Nanoelektronik Bilim Dalında yapılmıştır.

Öncelikle bu çalışmanın planlanması ve yürütülmesinde tecrübelerini ve birikimlerini esirgemeyen hocam sayın Doç. Dr. Tevhit KARACALI'ya ve tez çalışmasında desteğini esirgemeyen sayın Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU'na en içten şükranlarımı arz ederim.

Ayrıca çalışmalarım sırasında desteklerini esirgemeyen aileme, her türlü sıkıntılara katlanan, sürekli yanımda olan eşime ve kızıma sonsuz şükranlarımı sunarım.

Erkan CENGİZ

Haziran 2016

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı.....	1
1.2. ReRAM (Rezistif Rastgele Erişilebilir Hafıza) Teknolojileri	1
1.3. Memristör ve Memristif Sistemler.....	3
2. KAYNAK ÖZETLERİ	6
2.1. Literatürde Memristör Çalışmaları	6
2.2. Metal Oksit Nano Yapılar.....	9
2.3. TiO_2 'in Yapısı ve Özellikleri.....	11
2.3.1. TiO_2 'in kristal yapısı.....	11
2.3.2. TiO_2 'nin elektriksel iletkenliği	15
2.3.3. TiO_2 'in elektriksel iletkenliğine oksijen boşluklarının etkisi	15
2.4. Elektriksel Rezistif Anahtarlama (Electrical Resistive Switching, ERS).....	17
2.4.1. Rezistif anahtarlama mekanizmalarının sınıflandırılması	18
2.5. Elektroforming Teorisi	19
2.5.1. Bipolar rezistif anahtarlama yapılarında elektroforming süreci	19
2.5.2. $\text{Pt/TiO}_2/\text{Pt}$ yapısında elektroforming süreci.....	20
2.5.3. Elektroforming süreci ile $\text{Pt/TiO}_2/\text{Pt}$ yapısında anahtarlama durumları	22
2.6. Memristör'ün Yapısı ve Özellikleri.....	24
2.6.1. Memristör'ün yapısı.....	25
2.6.2. Memristör'ün kontak yapıları ve özellikleri	28
2.6.3. Memristör'de yük akış mekanizmaları ve özellikleri	29
2.6.4. Memristör'de yük akışına farklı bir bakış açısı	31
2.6.5. Memristör'ün akım-gerilim karakteristiği	32

2.7. Saçtırma (Sputter) Tekniği.....	34
2.7.1. DC diyot saçtırma tekniği	35
2.7.2. DC triyot saçtırma tekniği.....	36
2.7.3. Manyetik alanda saçtırma (Magnetron saçtırma)	37
2.7.4. Yüksek frekansta saçtırma (RF saçtırma).....	38
3. MATERİYAL ve YÖNTEM.....	39
3.1. R_{ON} Direncinin Hesabı.....	39
3.2. En Küçük Kareler Yöntemi	39
3.3. Matlab Programında Resnorm ve Lsqcurvefit Komutları	41
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	42
4.1. Araştırma Bulguları	42
4.2. Tartışma	59
5. SONUÇ	61
KAYNAKLAR	62
ÖZGEÇMİŞ	65

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Å	Angstrom
A	Amper
Al	Alüminyum
°C	Celcius Derece
Cal	Kalori
Cd	Kadmiyum
Ce	Seryum
Cl	Klor
Cu	Bakır
eV	Elektro Volt
Eg	Bant Aralığı Enerjisi
Fe	Demir
Ga	Galyum
Ge	Germanyum
In	İndiyum
K	Kelvin
Kcal	Kilo Kalori
I	Akım
Mg	Magnezyum
Na	Sodyum
Ni	Nikel
nm	Nanometre
Ni	Niobyum
O ₂	Oksijen
Q	Elektron Yüğü
Sb	Antimon
Sn	Kalay
Te	Tellür
Ti	Titanyum

TiO ₂	Titanyum Dioksit
V	Volt
W	Volfram (Tungsten)
Zn	Çinko
ZnO	Çinko Oksit
ø	Manyetik Alan
µs	Mikro Saniye
µm	Mikro Metre

Kısaltmalar

AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
BRS	Bipolar (Çift Kutup) Rezistif Anahtarlama Durumu
CBD	Kimyasal Banyo Biriktirme
CMOS	Tümleyici Metal Oksit Yarıiletken
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
ECD	Elektro Kimyasal Biriktirme
ERS	Elektriksel Rezistif Anahtarlama
HRS	Yüksek Direnç Durumu
LRS	Düşük Direnç Durumu
MIM	Metal Yalıtkan Metal
MOM	Metal Oksit Metal
PCVD	Foto Kimyasal Buhar Biriktirme
RAM	Rastgele Erişim Hafıza
PcRAM	Faz Değişim Rastgele Erişim Hafıza
ReRAM	Rezistif Rastgele Erişim Hafıza
RF	Radyo Frekans
SP	Sprey Payrolizi
URS	Unipolar (Tek Kutup) Direnç Durumu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. ReRAM teknolojilerinin basit yığın yapıları	3
Şekil 1.2. Chua'nın pasif devre elemanları için oluşturduğu tablonun basit hali	4
Şekil 1.3. Memristif sistemlerde aygıtların sembolleri.....	5
Şekil 2.1. Polimorf TiO_2 'in temel hücre yapısı	12
Şekil 2.2. TiO_2 'in rutil ve anataz fazlarının kristal yapıları	13
Şekil 2.3. Titanyum-Oksijen faz diyagramı	14
Şekil 2.4. TiO_2 'te bir oksijen boşluğunun oluşumu	16
Şekil 2.5. TiO_2 'in kristal yapısında oksijen boşluklarının dizilimi.....	17
Şekil 2.6. Rezistans anahtarlama durumunda aygıtların akım-gerilim eğrileri	18
Şekil 2.7. $Pt/TiO_2/Pt$ yapıda yük akışı ve oksijen gazının ortaya çıkışı.....	21
Şekil 2.8. Metal/Yalıtkan/Metal yapılarında yük akışının sağlandığı filament yapıda iletim kanalı.....	21
Şekil 2.9. TiO_2 'in pozitif ve negatif gerilimler altında oluşan filamentli iletim yolu	23
Şekil 2.10. $Pt/TiO_2/Pt$ yapının elektroforming sonrasında fiziksel yapısında oluşan deformasyon.....	26
Şekil 2.11. Harici potansiyel altında $Pt/TiO_2/TiO_{2-x}/Pt$ yapının yüzeyi.....	27
Şekil 2.12. Memristör'ün yapısı	27
Şekil 2.13. $Pt/TiO_2/TiO_{2-x}/Pt$ yapının çapraz nokta (cross-point) anahtarlama.....	28
Şekil 2.14. $Pt/TiO_2/TiO_{2-x}/Pt$ yapının kontak özellikleri	29
Şekil 2.15. Memristör'ün yük iletim durumları	30
Şekil 2.16. Memristör'ün kontak yapısı.....	31
Şekil 2.17. $Pt/TiO_2/TiO_{2-x}/Pt$ yapının rezistans durumları.....	32
Şekil 2.18. Memristör'ün çalışma karakteristiği.....	34
Şekil 2.19. Saçtırma tekniğinin şematik gösterimi	35
Şekil 2.20. a) DC diyot saçtırma b) RF saçtırma	36
Şekil 2.21. DC triyot saçtırma tekniği	37
Şekil 4.1. 3a_08 proses kodlu numunenin akım-gerilim eğrisi	43
Şekil 4.2. 3a_08 proses kodlu numunenin normalize gerilim, akım ve yük eğrileri	44
Şekil 4.3. 3a_08 proses kodlu numunenin döngülerinde R_{ON} değerleri	44

Şekil 4.4. 3a_08 proses kodlu numunenin döngülerinde R_{OFF} değerleri	45
Şekil 4.5. 3a_8_01 proses kodlu numunenin akım-gerilim eğrisi	45
Şekil 4.6. 3a_8_01 proses kodlu numunenin normalize gerilim, akım ve yük eğrileri ..	46
Şekil 4.7. 3a_8_01 proses kodlu numunenin döngülerinde R_{ON} değerleri	46
Şekil 4.8. 3a_8_01 proses kodlu numunenin döngülerinde R_{OFF} değerleri	47
Şekil 4.9. 3c_R07_02 proses kodlu numunenin akım-gerilim eğrisi.....	47
Şekil 4.10. 3c_R07_02 proses kodlu numunenin normalize gerilim, akım ve yük eğrileri	48
Şekil 4.11. 3c_R07_02 proses kodlu numunenin döngülerinde R_{ON} değerleri.....	49
Şekil 4.12. 3c_R07_02 proses kodlu numunenin döngülerinde R_{OFF} değerleri.....	49
Şekil 4.13. 4a_R05_2e proses kodlu numunenin akım-gerilim eğrisi	50
Şekil 4.14. 4a_R05_2e proses kodlu numunenin normalize gerilim, akım ve yük eğrileri	50
Şekil 4.15. 4a_R05_2e proses kodlu numunenin döngülerinde R_{ON} değerleri.....	51
Şekil 4.16. 4a_R05_2e proses kodlu numunenin döngülerinde R_{OFF} değerleri.....	51
Şekil 4.17. 4a_R05_2f proses kodlu numunenin akım-gerilim eğrisi	52
Şekil 4.18. 4a_R05_2f proses kodlu numunenin normalize gerilim, akım ve yük eğrileri	53
Şekil 4.19. 4a_R05_2f proses kodlu numunenin döngülerinde R_{ON} değerleri	53
Şekil 4.20. 4a_R05_2f proses kodlu numunenin döngülerinde R_{OFF} değerleri	54
Şekil 4.21. S100_2c proses kodlu numunenin akım-gerilim eğrisi	54
Şekil 4.22. S100_2c proses kodlu numunenin normalize gerilim, akım ve yük eğrileri	55
Şekil 4.23. S100_2c proses kodlu numunenin döngülerinde R_{ON} değerleri	55
Şekil 4.24. S100_2c proses kodlu numunenin döngülerinde R_{OFF} değerleri	56
Şekil 4.25. S100_3c proses kodlu numunenin akım-gerilim eğrisi	56
Şekil 4.26. S100_3c proses kodlu numunenin normalize gerilim, akım ve yük eğrileri	57
Şekil 4.27. S100_3c proses kodlu numunenin döngülerinde R_{ON} değerleri	57
Şekil 4.28. S100_3c proses kodlu numunenin döngülerinde R_{OFF} değerleri	58
Şekil 4.29. 3_a_08_01 proses kodlu numune	59

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Artan değerine göre bazı <i>lsqcurvefit</i> kullanımları	41
Çizelge 4.1. Numunelerin fabrikasyon parametreleri	42
Çizelge 4.2. S100_2c proses kodlu numunenin fabrikasyon parametreleri.....	42
Çizelge 4.3. Numunelere uygulanan akım-gerilim değerleri.....	42
Çizelge 4.4. S100_2c proses kodlu numuneye uygulanan akım-gerilim değerleri.....	43



1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Amacı

Dördüncü pasif devre elemanı olarak bilinen Memristör'ün doğrusal olmayan davranışının R_{ON} , R_{OFF} ve $Q(t)$ (Elektrik Yükü) gibi parametreler yardımı ile incelenerek fabrikasyon parametrelerinin kestirimi bu çalışmanın odak noktasını oluşturmaktadır. 111T217 nolu Tübitak projesi kapsamında üretilen TiO_2 tabanlı Memristör aygıtların Akım-Gerilim ilişkisi ölçüm sonuçları ile literatürde önerilen modeller yardımıyla MATLAB ortamında gerekli hesaplamalar yapılarak Oksijen-Direnç ilişkisinin bulunması amaçlanmaktadır.

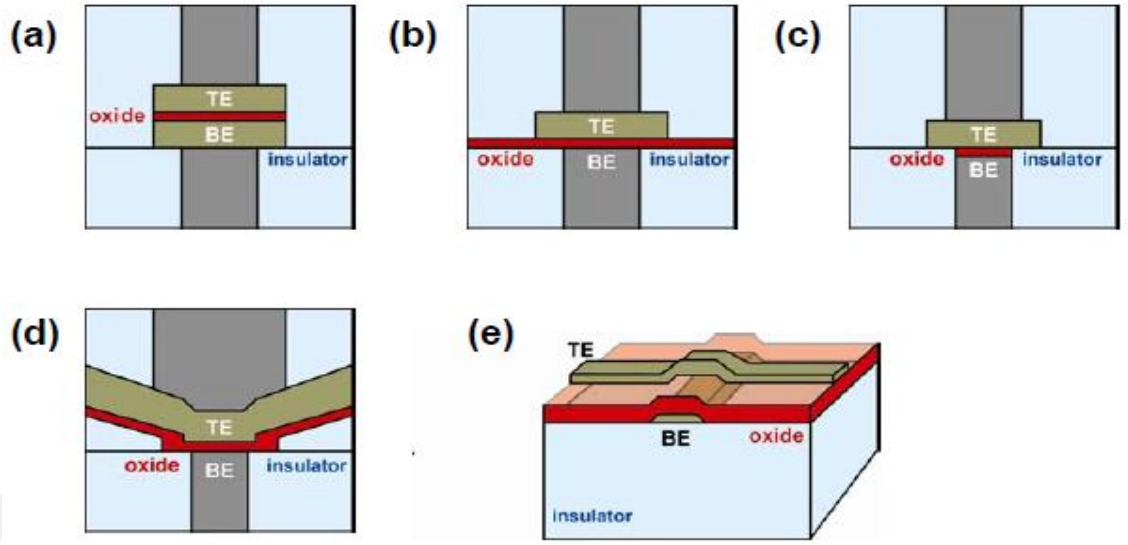
1.2. ReRAM (Rezistif Rastgele Erişilebilir Hafıza) Teknolojileri

ReRAM teknolojileri mevcut hafıza aygıtların en fazla gelecek vaat edenlerin başında gelmektedir. ReRAM teknolojilerinin kalıcı hafıza (non-volatile) fonksiyonlarında elektronik ve elektrokimyasal süreçler önemli rol oynamaktadır. ReRAM aygıtların önemli özelliklerinden biri olan negatif rezistans durumu ilk olarak SiO_x , Al_2O_3 , Ta_2O_5 , ZrO_2 ve TiO_2 olmak üzere beş metal oksitte görülmüştür. Bu metal oksitler 5µs den daha düşük anahtarlama hızlarına sahiptir. ReRAM aygıtların ilk pratik uygulaması 2002 yılında gerçekleştirilmiştir. 0.5 µm CMOS (Tümleyici Metal Oksit Yarıiletken) kullanılarak peroksit tabanlı 64 bit ReRAM fabrikasyonu gerçekleştirilmiştir. 2004 yılında binary (ikili) geçiş metal oksit tabanlı ReRAM fabrikasyonu Samsung Gelişmiş Teknoloji Enstitüsü'nde gerçekleştirilmiştir. ReRAM teknolojilerinde gerçekleşen rezistans anahtarlama olayı metal oksit malzemeler ile birlikte VI., III. ve V. grup yarıiletkenler ve organik bileşiklerde de görülmüştür. Oksit materyallerin en önemli özelliği, rezistansları, oksit materyalin oksijen yoğunluğuyla kontrol edilebilmesidir.

ReRAM teknolojilerin en önemli avantajı CMOS teknoloji ile olan iyi uyumudur. ReRAM teknolojilerin temel mantığı, elektriksel rezistans anahtarlama'dır. ReRAM

aygıtları Bipolar (çift kutup) ve Unipolar (tek kutup) olmak üzere iki farklı anahtarlama durumuna sahiptir. Bipolar (Çift kutup) anahtarlama, aygıtın yüksek rezistans durumundan düşük rezistans durumuna ve düşük rezistans durumundan yüksek rezistans durumuna geçmesi aygıtta uygulanan voltajın polaritesine bağlı değişmektedir. Unipolar (tek kutup) anahtarlama ise aygıtın rezistans durumu uygulanan voltajın polaritesine bağlı değildir. ReRAM teknolojilerinde aygıtın boyutu ile uygulanan voltaj arasında doğrusal bir ilişki vardır. Aygıtın boyutu küçüldükçe, yük akışını başlatan elektroforming süreci için gerekli olan voltaj da azalır.

ReRAM hafıza hücrelerin Şekil 1.1. a' da temel yapısı görülmektedir. Bu yapıda alt ve üst elektrot arası oksit materyalden oluşur. ReRAM fabrikasyon süreçlerini basitleştirmek için materyal üzerinde oksidasyon önemlidir. Oksit materyal seçim aralığı dar olmasına rağmen mükemmel rezistans anahtarlamanın CuO_x ve WO_x yapılarında gerçekleştiği bilinmektedir (Akinaga and Shima 2010). TiO_x yapıda ReRAM aygıtların rezistans anahtarlama performansı hafıza hücre yapısına bağlıdır. TiO_x yapıli aygıtlar çapraz nokta (cross point) ve boşluk yolu (via-hole) ile gerçekleştirilir. ReRAM aygıtlarında elektrot olarak, püskürtme ile biriktirme (sputtering deposition) yöntemiyle kolayca elde edilebildiği için genellikle Pt (platinyum) kullanılır.



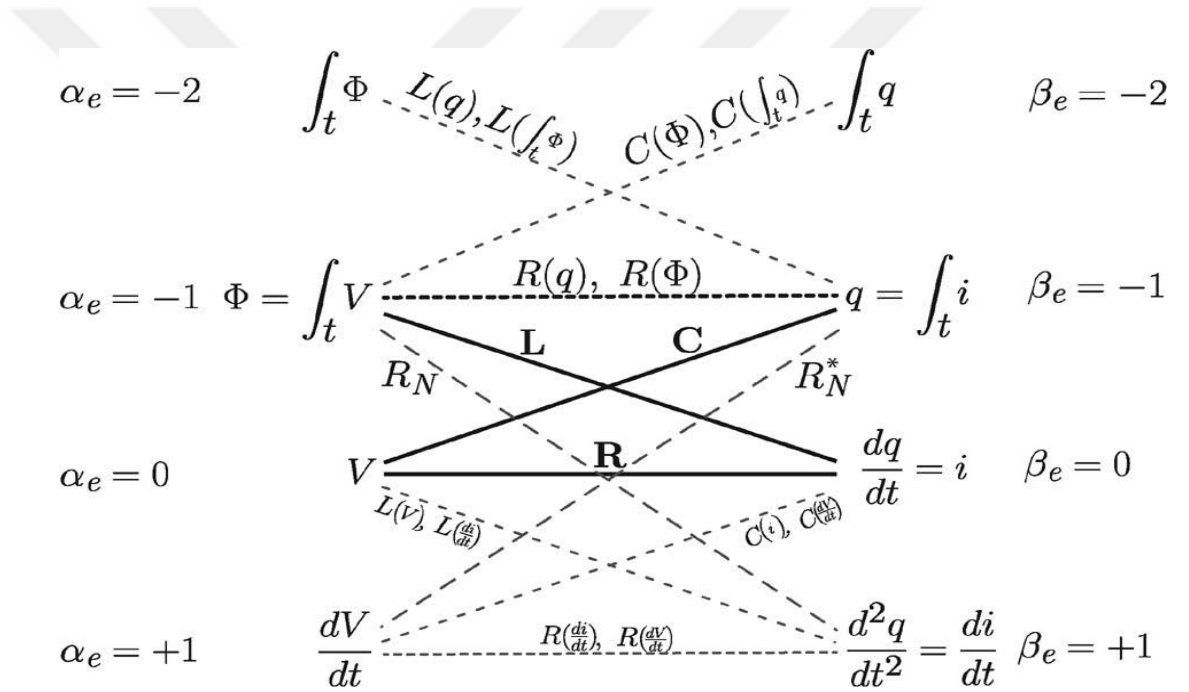
Şekil 1.1. ReRAM teknolojilerinin basit yığın yapıları a) Metal/Oksit/Metal ReRAM'in temel yığın (stack) yapısı b) alt elektrot üzerine metalik hafıza hücresi c) oksit tabaka rezistans anahtarlama için materyal üzerine oksitlenme d) içbükey ReRAM yapısı e) çapraz nokta (cross-point) ReRAM yapısı (Akinaga and Shima 2010)

Yüksek yoğunluklu elektronik uygulamalarına ilaveten, çok çeşitli elektronik uygulamalarda oksit temelli ReRAM teknolojiler esnek yapıda kalıcı hafızanın gerçekleşmesini mümkün kılmaktadır. Bazı metal oksit materyaller geniş bant aralığına sahip olduğundan metal elektrot ya da saydam elektrotların bu oksitlerin oluşturulmasıyla esnek ve saydam ReRAM aygıtları elde edilebilir. Analog rezistans değişimi ReRAM aygıtların yığın (stack) yapılarında olduğu gibi, bazı metal/yalıtkan anahtarlama hücrelerde de gözlenir. Örneğin, Pt/TiO_x/Pt Memristör'de yüklü oksijen boşlukları, yarıiletken oksitlerdeki hareketli katkılar gibi düşünülürse oksijen boşlukları kontrol edilerek aygıtın rezistans değiştirilebilir.

1.3. Memristör ve Memristif Sistemler

Geleneksel elektronik devre işlemleri, akım, gerilim, manyetik akı ve yük olmak üzere dört temel devre değişkenleri arasında ilişki kurularak gerçekleştirilir. Bu ilişkiler; akım ile gerilim ilişkisi rezistör, yük ile gerilim arasındaki ilişki kapasitör (kondansatör) ve akım ile manyetik arasındaki ilişki indüktör (bobin) olarak

tanımlanır. Ancak, devre değişkenleri arasında, manyetik akı ve yük arasındaki ilişki tanımlanmamıştır. 1976 yılında Leon O. Chua manyetik akı ve yük arasındaki ilişkiyi “Memristance” olarak tanımlamıştır. Memristans özelliği sergileyen ve matematiksel olarak varlığını tahmin ettiği ağıta “Memory Resistor” ifadelerinin kısaltılmışı olarak “Memristor” adını vermiştir. Memristör kendisine uygulanan voltajın polaritesine bağlı olarak iç direncini değiştiren ve voltaj kaldırıldıktan sonra iç direnç durumunu uzun süre muhafaza edebilen bir ağıttır.

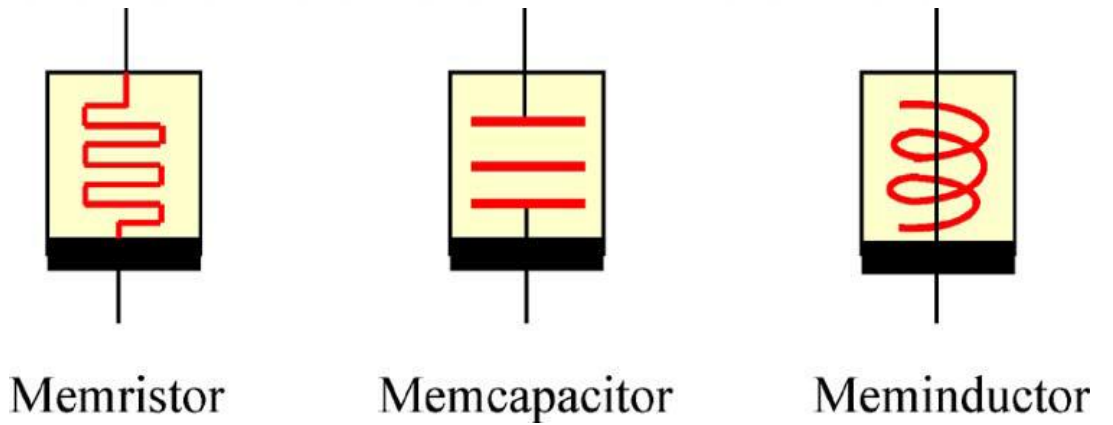


Şekil 1.2. Chua'nın pasif devre elemanları için oluşturduğu tablonun basit hali (Eshraghian *et al.* 2012)

Memristif sistemler, temel pasif devre elemanlarının doğrusal olmayan dinamik davranışlarını içeren sistemlerdir. Genel olarak, iç durum değişkeni rezistansa bağlı olan iki terminalli ağıtlar Memristif sistemler olarak tanımlanabilir (Jo 2010). Memristif sistemlerde ağıtın iç rezistans durumu, ağıtın giriş akımına bağlı değildir. Ağıtın iç rezistans durumu, geçmişteki akımın durumun bağlı olduğu için memristif sistemlerde ağıtlar histerezis davranış sergiler. Memristif sistemlerin en önemli

özellği, aygıtların pasif oluşudur. Doğrusal davranış özelliğine sahip bobin ve kondansatör gibi enerji depolamazlar.

2003 yılında Chua, devre değişkenlerinden akım (i) ve gerilim (V)'in türev ve integrallerini kullanarak temel pasif devre elemanları sınıflandırdığı Şekil 1.2'de gösterildiği gibi periyodik bir tablo oluşturmuştur (Eshraghian *et al.* 2012). Tabloda, memristörün memristans ifadesi olarak manyetik akı ve yük (Φ - q) ilişkisine bakılırsa histerezis bir düğüm olduğu görülmektedir. Benzer durum, Chua'nın periyodik tablosunda diğer devre elemanları için de geçerlidir. Chua, rezistör, kapasitör ve indüktör olmak üzere üç temel devre elemanların doğrusal olmayan (nonlinear) davranışlarını tanımlamış ve bu aygıtları bütünleştirerek memristif sistemler olarak ifade etmiştir. Chua, direnci "memristor", kapasitörü "memcapasitor" ve indüktörü "meminductor" olarak ifade etmiştir (Chua and Kang 1976).



Şekil 1.3. Memristif sistemlerde aygıtların sembolleri (Ventra *et al.* 2009)

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Literatürde Memristör Çalışmaları

Memristör ifadesi ilk defa Chua'nın çalışmasında duyulmamıştır. 1960 yılında Stanford Üniversite'sinde Widrow tarafından yapılan çalışmada, yeni bir üç terminalli devre elemanı geliştirilmiş ve Memristör olarak ifade edilmiştir. Geliştirilen bu aygıtın iki terminali arasındaki yük iletiminin kontrolü, üçüncü terminalden geçen zamana bağlı akımın kontrolü ile gerçekleştirilmiştir. Yani aygıtın direnci, aygıttan geçen yük ile kontrol edilmiştir. Gerçekleştirilen bu Memristör modeli “*Neural-Network*” mimarinin temel bileşenleriyle oluşturulmuştur ve “*ADALİNE (ADaptive Linear Neuron)*” olarak adlandırılmıştır (Widrow *et al.* 1971).

Leon Chua 1971, temel devre değişkenlerinden yük ve manyetik akı arasındaki ilişkiyi açıklamıştır. Chua, yük ve akı arasındaki ilişkiyi kullanarak dördüncü temel devre elemanının varlığını matematiksel olarak tahmin etmiştir. Chua, çalışmasında elektrolitik hücre (E-cells) gibi farklı memristör modelleride önermiştir. Chua, Memristör'ün varlığını açıklarken matematiksel olarak Maxwell formüllerinin yanı sıra farklı devre teorilerini de kullanmıştır.

Chua and Kang 1976, “Memristive Device and Systems” başlıklı çalışmada, memristif Sistemleri ve Memristör teorisini genelleştirmiştir. Memristif sistemler resistör

memristance, kapasitör memcapasitance, indüktans memductance olarak ifade edilmiş ve bu yeni aygıtların elektriksel ve karakteristik özellikleri teorik olarak açıklanmıştır.

2000 yılında IBM'in Zürih laboratuvarlarında yapılan çalışmalarda ince oksit filmlerde rezistans anahtarlama ve etkilerinin tekrar üretilebileceği gösterilmiştir. Bu anahtarlama ların histerisiz özellikleri, Chua'nın önerdiği memristöre benzerdir.

Williams *et al.* 2008, HP Bilgi ve Kuantum Sistem laboratuvarlarında Williams ve grubu tarafından Chua'nın matematiksel olarak açıkladığı memristör yapısı fiziksel olarak ilk defa gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, iki platinyum plaka arasına TiO_2 malzemesi sandviç şeklinde oluşturulmuştur. $\text{Pt/TiO}_2/\text{Pt}$ yapısına uygulanan voltaj ya da akım ile TiO_2 içinde elektroforming süreci sonucunda aygıt üzerinden yük akışı gerçekleştirilmiştir.

Yang *et al.* 2008, "memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices" başlıklı çalışmada metal/oksit sistemlerde memristif elektriksel anahtarlamanın genel bir modelinin varlığı deneysel olarak kanıtlanmıştır. Çalışmada farklı yapılarda platinyum ve TiO_2 kontak yapıları gerçekleştirilmiş ve her farklı kontak yapısının elektriksel özellikleri incelenmiştir.

Yang *et al.* 2009, 2008 yılında HP laboratuvarlarında fiziksel bir aygıt olarak ilk defa gerçekleştirilen Memristör, $\text{Pt/TiO}_2/\text{Pt}$ sandviç yapısında oluşturulmuştur. "the mechanism of electroforming of metal oxide memristive switches" başlıklı çalışmada, $\text{Pt/TiO}_2/\text{Pt}$ memristörün harici potansiyel altında, elektroforming ve Joule ısınma gibi süreçlerden kaynaklanan bir takım elektriksel ve fiziksel sorunlar gözlenmiştir. Daha sonra bu sorunları ortadan kaldırmak için aygıt içerisinde elektroforming sürecinin gerçekleşmemesini sağlayan TiO_{2-x} tabakası yapıya eklenmiştir. Eklenen bu tabaka ile ilk yapıda karşılaşılan fiziksel deformasyon ve elektriksel sorunlar giderilmiştir.

Picket *et al.* 2009, "Switching dynamics in titanium dioxide memristive devices" başlıklı çalışmada, TiO_2 kullanılmıştır.. Memristör'de anahtarlama mekanizmaları

‘Simmons tunnel barrier model’ kullanılarak açıklanmıştır. Memristör anahtarlama sırasında durum değişkeni olarak tünel bant genişliği (tunnel band gap) W (durum değişkeni) seçilmiş ve uygulanan akım ya da gerilimin polaritesi değiştirilerek W genişliği kontrol edilmiştir. Tünel bant aralığı W ’nin değişmesiyle aygıtın rezistansının değişimi gösterilmiştir

Eshraghian *et al.* 2009, the fourth element: characteristics, modeling and electromagnetic theory of the memristor” başlıklı çalışmada memristörün diferansiyel denklemleri kullanılarak memristör modelleme çalışmaları yapılmıştır. Memristör modellemede kullanılan yöntemler ve Chua’nın memristörü matematiksel olarak tanımlamada kullandığı Maxwell denklemleri (Maxwell’s Equations) kullanılarak Memristör teorisi incelemiştir.

Do *et al.* 2009, “Hysteretic bipolar resistive switching characteristics in $\text{TiO}_2/\text{TiO}_{2-x}$ multilayer homojunctions” başlıklı çalışmada $\text{Pt}/\text{TiO}_2/\text{TiO}_{2-x}/\text{Pt}$ yapıda oluşturulan memristörün üst elektrotta birden fazla Pt (Platinyum) kullanılarak $\text{TiO}_2/\text{TiO}_{2-x}$ bölgeleri arasında gerçekleşen yük akışı farklı bir şekilde yorumlanmıştır. Çalışmada oksijen boşluğunca zengin olan TiO_{2-x} bölge ile oksijence zengin olan TiO_2 bölge arasındaki yük akışı, bölgelerin jonksiyon (birleşim) bölgelerinden gerçekleşen redoks tepkimeleri sonucunda bu iki bölge arasında oluşan filament şeklinde iletim kanalı sayesinde gerçekleştiği ileri sürülmüştür.

Strachan *et al.* 2010, “direct identification of the conducting channels in a functioning memristive device” başlıklı çalışmada, TiO_2 ’in kristal yapısında, elektroforming sürecinde Joule ısınmadan dolayı farklı fazlara geçişler gerçekleşmiştir. TiO_2 ’in farklı fazlarında gözlemler yapılmış ve $\text{Pt}/\text{TiO}_2/\text{Pt}$ yapısındaki TiO_2 ’e Ti_4O_7 eklenerek aygıtın elektriksel özellikleri incelenmiştir.

Strachan *et al.* 2011, Memristör’de iletkenliği sağlayan ve elektroforming sırasında TiO_2 içerisinde ortaya çıkan iletim kanalının yapısını “the switching location of a bipolar memristor: chemical, thermal and structural mapping” başlıklı çalışmada

çeşitli mikroskopik yöntemler kullanarak incelenmiştir. Çalışmada elektroforming sırasında ortaya çıkan joule ısınma nedeniyle iletim kanalının oluşumu ve ısınmadan dolayı kristal içerisinde gerçekleşen faz değişimleri gözlenmiştir.

Xiao-Bo *et al.* 2013, “the design and simulation of a titanium oxide memristor-based programmable analog filter in a simulation program with integrated circuit emphasis” başlıklı çalışmada memristörün kalıcı hafıza (non-volatile memory) özelliği kullanılarak programlanabilir bir analog filtre tasarlanmıştır.

Biolek *et al.* 2014, Memristör farklı modelleme yöntemleri kullanılarak modellenmiştir. “Modeling of TiO_2 memristor: from analytic to numerical analysis” başlıklı çalışmada, modellemede yapılan hataların analizi ve hataların sebepleri araştırılmıştır. Özellikle modellemede kullanılan pencere fonksiyonlarında seçilen durum değişkenleri için hata analizleri yapılmıştır.

Hai-Jun *et al.* 2014, Memristör modellemede kullanılan doğrusal ve doğrusal olmayan modellerinin farklı yönlerinin ele alındığı “memristance controlling approach based on modification of linear curve” başlıklı çalışmada Memristör’ün doğrusal olmayan (nonlinear) modelinde memristans ile memristörden geçen yük arasındaki ilişkiyi, memristans ve yük (M-q) eğrisinin orta noktasını doğrusallaştırarak (linearization) açıklanmıştır.

2.2. Metal Oksit Nano Yapılar

Metal oksitler kimya, fizik ve malzeme biliminin pek çok alanında önemli rol oynamaktadır. Metal elementler oksit bileşenlerin çok farklı çeşitlerini oluşturabilir. Bunlar; metalik, yarıiletken veya yalıtkan karakter sergileyebilen elektronik yapıya sahip, yapısal geometrilerinin geniş bir sayısına uyum sağlayabilir (Fernandez *et al.* 2007). Metal oksit yapıların boyut, şekil ve bağlanma yapıları çok çeşitlilik gösterir. Metal oksitlerin, yapılarında ve bağlanmalarındaki çeşitlilik, fiziksel, manyetik ve optik özelliklerinin farklılığı bu malzemeleri oldukça ilginç kılmaktadır. Metal oksit

yapılar, düşük elektrik direncine, metalik iletkenliğe yakın iletkenliğe ve 400 nm ile 700 nm arasında görünür bölgede yüksek optik geçirgenliğe sahip özellikler sergilemektedir (Çetinkaya vd. 2011). Üzerinde en yaygın araştırma yapılan metal oksitler; SnO_2 , ZnO , Ga_2O_3 , In_2O_3 , CdO , PbO_2 , CuO , MgO , WO_3 , GeO_2 ve TiO_2 'dir (Çakmak 2011). Teknolojik uygulamalarda metal oksitler, mikro elektronik devreler, sensörler, piezoelektrik aygıtlar, yakıt hücreleri ve katalizör olarak fabrikasyonlarda kullanılır (Fernandez *et al.* 2007). Metal oksit yapılar biyoloji ve tıp alanında ilaç dağıtımı, kanser tedavisi, biyolojik etiketleme ve floresan görüntüleme gibi alanlarda kullanılmaktadır (Singh *et al.* 2014).

Metal oksit nano yapıları üretmek için, termal buharlaştırma, radyofrekans (RF) saçırma ardından oksidasyon, elektrokimyasal depolama (ECD), kimyasal banyo depolama (CBD), elektron ışını buharlaştırma, kimyasal buhar biriktirme (CVD), spreyl payrolizi (SP), fotokimyasal buhar biriktirme (PCVD) ve sol-jel kaplama gibi çok çeşitli yöntemler bulunmaktadır (Çakmak 2011).

Oksit nano parçacıklar sınırlandırılmış boyutları ve köşe ya da kenar yüzey alanlarının yüksek yoğunluklarından dolayı benzersiz özelliklere sergileyebilirler. Yapısal karakteristiğin oluşumlarından ilki, kafes (lattice) ve hücre parametreleridir. Boyutla ilişkili termodinamik kararlılıktaki değişiklikler, hücre parametrelerini ya da yapısal dönüşümlerinin modifikasyonunu azaltabilen ve beklenmeyen durumlarda nano parçacığı kuşatan çevresel serbest yüzey enerjisi etkileşimlerden dolayı ortaya çıkabilir. Parçacık boyutu azaldıkça ve yüzey sınırının artmasıyla, atomlar arasındaki gerilme, stres ve yapısal titreşimler artar. Boyutun ikinci önemli etkisi, oksitlerin elektronik özellikleri ile ilgilidir. Yapıdaki oksijen, iyonikten kovalente ve metalik bağlara kadar geniş bir spektrumda metal oksit yapıya çok çeşitlilik katmaktadır. Metal oksit bir bağda iyoniklik ya da kovalentlik derecesi, kısmen iyonik ya da kovalent karakter ile sistemin boyutuna güçlü bir şekilde bağlıdır. Boyutun azalmasına paralel olarak metal oksit bağda iyonik bileşenlerde artış olduğu gözlenir. Oksit parçacığın ortalama boyutundaki bir azalma aynı zamanda parçacığın bant aralığının büyüklüğünü

değiştirir, bu durum oksit malzemenin iletkenliğini ve kimyasal reaktivliğini güçlü bir şekilde etkiler (Fernandez *et al.* 2007).

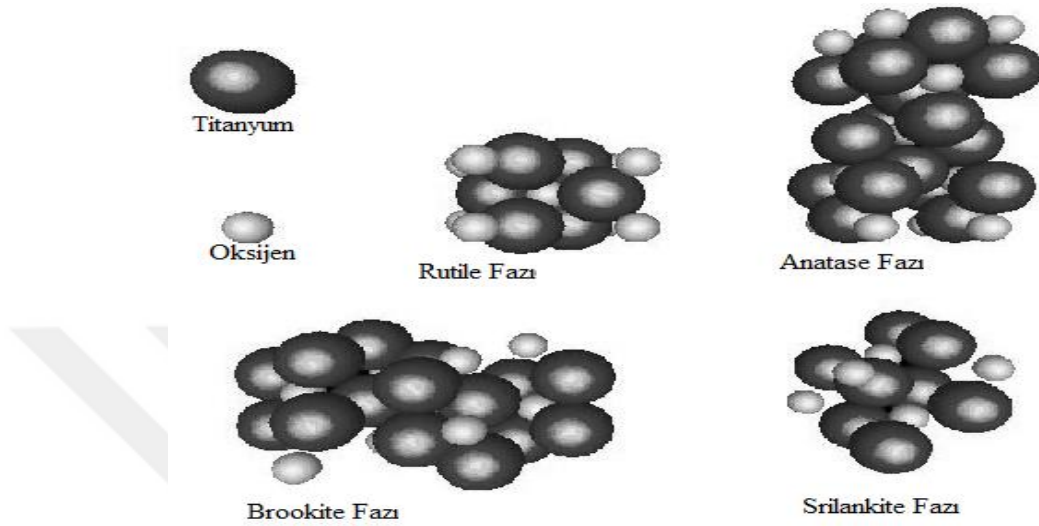
2.3. TiO₂'in Yapısı ve Özellikleri

TiO₂ (Titanya) ilk olarak 1971 yılında siyah kum taneciklerinden beyaz renkte metal oksit yapıda William Gregor tarafından elde edilmiştir (Anonim 2015c). TiO₂ beyaz renk pigmenti olarak boya endüstrisinde, dielektrik materyal, foto katalizör, seramik ve cam üretiminde, uzay ve havacılık endüstrisinde, askeri amaçlı sanayi ve tıp alanlarında kullanılır (Kobayashi *et al.* 2013). Metal oksit malzemeler arasında TiO₂ sahip olduğu yüksek dielektrik sabiti (110,00), büyük kırılma indisi (2,4), görünür bölgedeki (400-700 nm) yüksek geçirgenliği gibi optik ve elektriksel iletkenlik özelliklerinden dolayı en çok çalışılan ve araştırma yapılan malzemedir. TiO₂ görünür bölgede olduğundan foto katalizör olarak kullanılan en yaygın malzemedir ve foto katalizörler yarıiletken özellik sergilediklerinden dolayı, TiO₂'in yarıiletken formu kullanılır. TiO₂ yapıları ince filmlerin gaz algılama özelliği sayesinde indirgeme veya yükseltgenme tepkimeleri ile filminin yüzeyinin etkileşmesi sonucunda ince filmin elektriksel iletkenliği değişmektedir (Şahin 2010).

2.3.1. TiO₂'in kristal yapısı

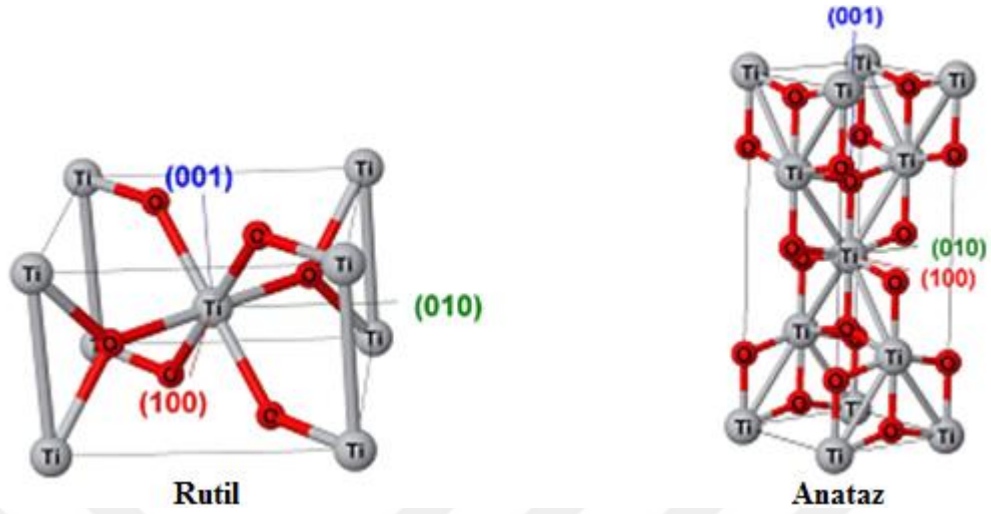
TiO₂, kristal ve amorf fazların karışımlarının toz şeklinden elde edilir (Fernandez *et al.* 2007). TiO₂ çevresel şartlar altında sekiz polimorf yapıda bulunmaktadır ve en bilinen yapıları rutil, anataz ve brokittir. Bu yapılar; rutil (tetragonal, a=b=4,584 Å, c=2,953 Å), anataz (tetragonal, a=b=3,782 Å, c=9,502 Å) ve brokit (ortorombik, a=5,436 Å, b=9,166 Å, c=5,135 Å) yapıları doğal polimorf ve TiO₂ (B) (Bronz), TiO₂ (H) (Hollandite), diğer üç polimorf yapı laboratuvar ortamında elde edilir (Kobayashi *et al.* 2013). TiO₂'in en kararlı yapıları rutil ve anataz yapılarıdır ve rutil yapı anataz yapıdan 1,2-2,8 kcal/mol daha karardır. Rutil ve anataz fazları elektroaktiftir ancak brokit yapı elektroaktif değildir. Rutil yapı, kristal yüzeylerinden oksijen kopararak indirgendiği

için elektriksel iletkenlik açısından daha elverişlidir. Anataz yapı, katalitik olarak rutil yapıdan daha aktiftir (Şahin 2010).



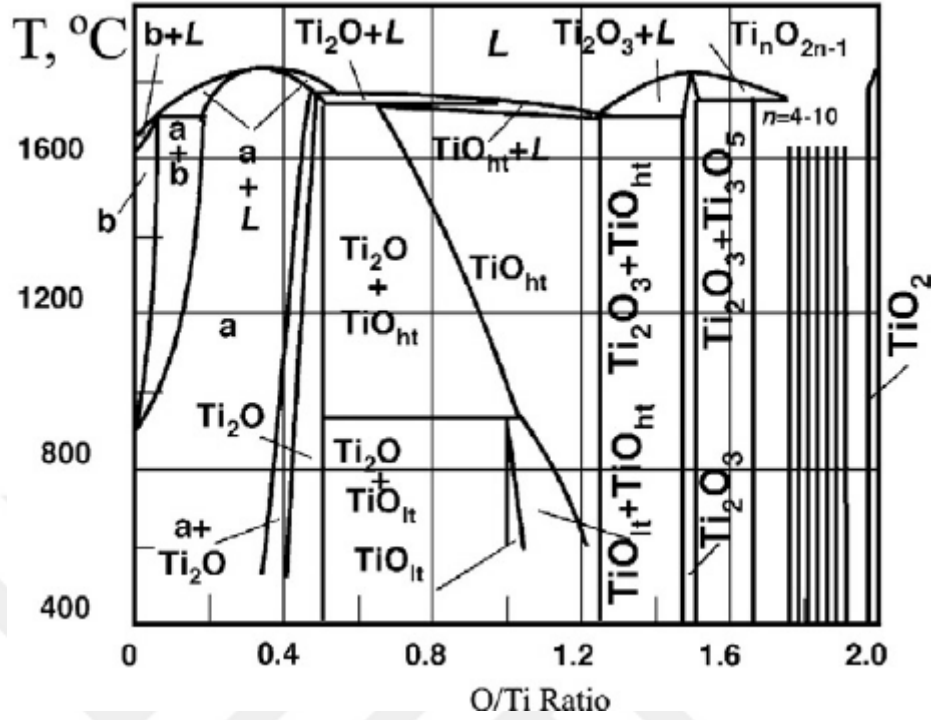
Şekil 2.1. Polimorf TiO₂'in temel hücre yapısı (Bally 1999)

TiO₂'in rutil ve anataz yapıları kolay elde edildikleri ve daha kararlı yapıya sahip olduklarından geniş kullanım alanlarına sahiptir. Anataz yapı en az yoğunluklu yapıya sahiptir ve eksenler arasında boşluklar bulunmaktadır (Singh *et al.* 2014). Anataz fazın yasak enerji aralığı (E_g) 3.2 eV iken rutil fazın yasak enerji aralığı 3.0 eV'tur (Şahin 2010).



Şekil 2.2. TiO₂'in rutil ve anataz fazlarının kristal yapıları (Şahin 2010)

TiO₂'in boyutu, şekli ve kristal yapısı değiştikçe yüzey kararlılığı değişmez. Basınç ve boyuta bağlı olarak ısı altında TiO₂'in farklı fazları arasında geçişler meydana gelmektedir (Singh *et al.* 2014). Nano yapıda TiO₂'in termal kararlılığın ayarlanması ve polimorfların yapısal dönüşümleri, TiO₂'in faz davranışını güçlü bir şekilde etkiler (Fernandez *et al.* 2007). TiO₂ 700°C üstündeki sıcaklıklarda, TiO₂'in anataz fazı, ısısal açıdan daha kararlı bir yapı olan rutil faza dönüşür.



Şekil 2.3. Titanyum-Oksijen faz diyagramı (Anonim 2015d)

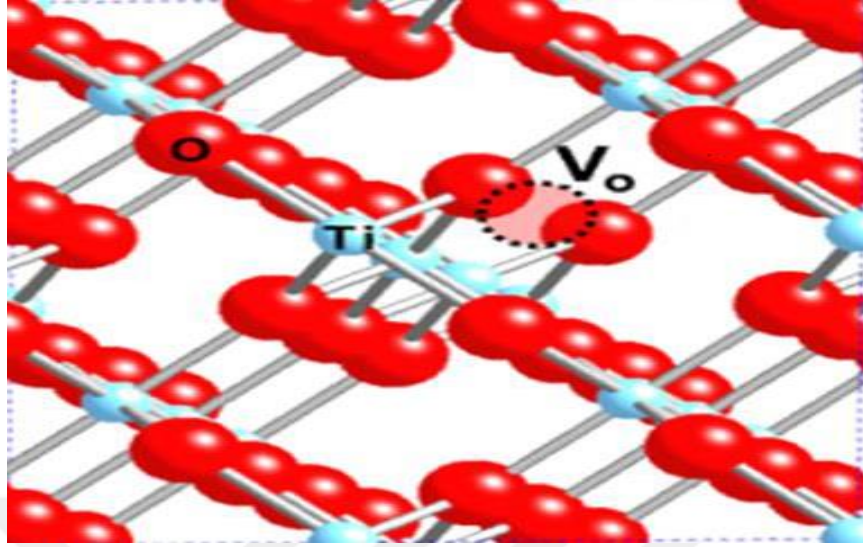
TiO₂'in faz diyagramı çok çeşitli kristal yapıları sahip sabit fazları ile çok zengindir. Örneğin n-tipi katkılama ve yüksek iletkenlik ile ilgili sonuçlar, yığın (Bulk) kusurları ve çift yüklenmiş oksijen boşlukları gibi çeşitli tipleri, Ti³⁺/Ti⁴⁺ çatlakları, kristalografik makaslama uzayları gibi uzaysal kusurlar, yüzeysel kusurları ve çoğunlukla koordine altında Ti anyonlarına atfedilir (Fernandez *et al.* 2007). Ayrıca nano yapıda kristal örgü içerisinde bulunan tane sınırlarının varlığı materyalin elektriksel iletkenliğini etkiler. Nano yapıda TiO₂'in kafes ve yüzey kusurlarının yoğunluğu, elde edilme metoduna, katkılama yapılmasına ve katkılama miktarına bağlıdır. TiO₂ ince filmleri kategorize etmek için kimyasal analiz, elektro-prob içeren mikro analiz, x-ray foto emisyon spektroskopisi ve ikincil iyon kütle spektrometri analiz yöntemleri ile gerçekleştirilir. Kristal yapı analizi x-ray kırınımı (diffraction) ve atomik kuvvet mikroskopisi (AFM) ile yapılmaktadır (Bally 1999).

2.3.2. TiO_2 'nin elektriksel iletkenliği

TiO_2 'in elektriksel iletkenliğini etkileyen faktörler; kristal yapısının yoğunluğu, katkılanan materyalin kimyasal doğası ve ince filmin morfolojik yapısıdır. TiO_2 'in elektriksel iletkenliği, tane yüzeylerinde bulunan doymamış Ti atomları tarafında kristal örgü içerisine verilen serbest elektronlar hareketiyle sağlanır. TiO_2 'e Seryum katkılama ile TiO_2 daha yalıtkan ($\text{TiO}_2\text{:Ce}$) ve Niobyum katkılama ile n-tipi elektriksel iletkenlik ($\text{TiO}_2\text{:Nb}$) ya da demir katkılama ile p-tipi elektriksel iletkenlik ($\text{TiO}_2\text{:Fe}$) yapılarak daha iletken yapılabilir (Bally 1999). TiO_2 'e katkılanan malzemeler kristal yapı içerisinde nokta, kenar ve çizgisel gibi elektriksel iletkenliği etkileyen kusurlara sebep olur. TiO_2 'in yapısında bulunan oksijen atomlarının azlığı, malzeme içerisinde serbest halde elektron sağladığından dolayı TiO_2 'in elektriksel iletkenliğini artırır. TiO_2 'in en dikkat çeken nokta kusurları oksijen boşlukları ve arayer titanyum atomlarıdır (Bally 1999). Ortaya çıkan bu nokta kusurları TiO_2 'in elektriksel iletkenliğine iki şekilde katkı sağlayabilir. Nokta kusurları, mobil yük taşııcıları (iyonlaşma) ya da bir elektrik alana yanıt vererek hareket edebilir ve böylece TiO_2 içerisinde iyonik bir akım oluşturulur.

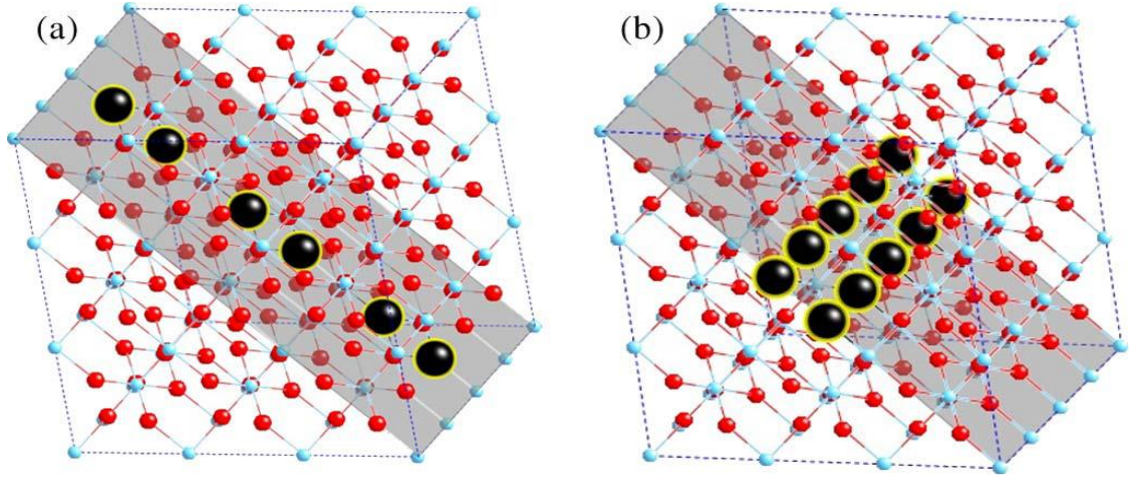
2.3.3. TiO_2 'in elektriksel iletkenliğine oksijen boşluklarının etkisi

TiO_2 içinde oksijen boşlukları (TiO_{2-x}) elektron donörleri gibi hareket eder ve TiO_2 'e oksijen boşluklarının katkılanması TiO_2 'in n-tipi katkılı yarıiletken özellik göstermesine sebep olur. TiO_2 'den bir oksijen atomu kaldırıldığında materyal içerisinde serbest halde hareket edebilen iki elektron bırakılır. Bu elektronlar TiO_2 'in elektriksel özelliğini etkili bir şekilde değiştirir.



Şekil 2.4. TiO_2 'te bir oksijen boşluğunun oluşumu (Park 2011)

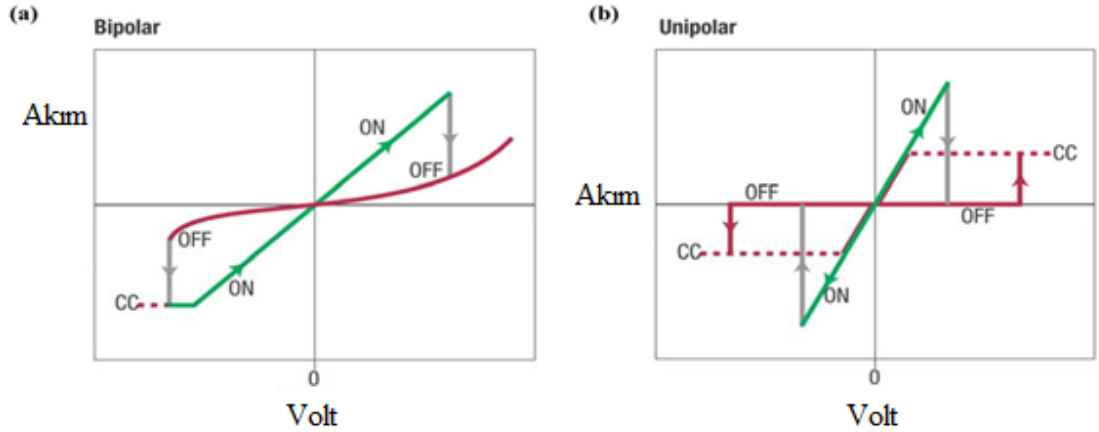
Kristal yapı içerisinde alınıp oksijen atomunun bıraktığı boşluk Ti atomları tarafından kuşatılır. TiO_2 'den bir oksijen atomunun koparılmasıyla oksijen boşlukları kristal yapı içerisinde örgü kusurları ortaya çıkararak bir band içi enerji seviyesine sebep olur. Bu örgü kusurları, yerini terk eden oksijen atomuna en yakın Ti atomları civarında oluşur. Oksijen atomunun koparılmasıyla serbest hale gelen elektronlar, Ti atomunun 3d yörüngelerine yerleşir (Park 2011). TiO_2 'in düşük direnç durumuna geçtiği durumda, yük iletim yolu oksijen boşluklarının katkılanmasıyla oluşur ve elektriksel iletkenliğin azalması ve artması bu iletim yolunun değişimiyle gerçekleşir. İletim yolunun genişliği, kristal örgü içerisindeki doğrultuya bağlı olarak farklılıklar gösterir. Şekil 2.5'de görüldüğü gibi oksijen boşluklarının oluşturdukları iletim kanalı [001] düzleminde [110] düzlemine göre daha geniş bir boşluk zinciri oluşturmuştur (Park *et al.* 2011).



Şekil 2.5. TiO₂'in kristal yapısında oksijen boşluklarının a) [110] Düzleminde dizilimi, b) [001] Düzlemindeki dizilimi (Park *et al.* 2011)

2.4. Elektriksel Rezistif Anahtarlama (Electrical Resistive Switching, ERS)

ReRAM (Resistive Random Access Memory) teknolojileri, ReRAM'lerin sahip olduğu, yüksek anahtarlama yoğunluğu, düşük işlem güçleri, basit yapıları, düşük maliyetleri ve yüksek anahtarlama hızları gibi özellikleriyle son yıllarda dikkatleri üzerine çekmiştir. ReRAM teknolojileri kalıcı hafıza aygıtların geleceği için umut vadeden bir aday olarak düşünülmektedir. Anahtarlama materyalinin yapısı en basit haliyle; iki terminal elektrot arasında direnci değişebilen bir materyalin sandviç yapıda oluşumudur. Elektriksel direnç anahtarlama, elektrotlara uygulanan akım ya da gerilim ile anahtarlama materyalinin direncinin değiştirilmesi temeline dayanmaktadır. Çeşitli metal oksitler ve peroksit tipi oksitlerde direnç anahtarlama görülmektedir. Bu materyallerde anahtarlama hücresinin direnci, yüksek direnç durumu (High Resistans State, HRS) ve düşük direnç durumu (Low Resistans State, LRS) olmak üzere çift kararlı (bistable) direnç durumu sergiler. Anahtarlama materyalinin yüksek direnç durumundan düşük direnç durumuna geçmesi "SET" anahtarlama ve düşük direnç durumundan yüksek direnç durumuna geçmesi "RESET" anahtarlama olarak adlandırılır. Bu direnç değişimiyle aygıt histerisiz akım-voltaj karakteristiği sergiler. Ayrıca bazı materyallerin çoklu direnç durumu sergileme özellikleriyle çoklu bit işlem yapan aygıtlara uyarlanabilmeleri mümkündür (Jeong 2008).



Şekil 2.6. Rezistans anahtarlama durumunda aygıtların Akım-Gerilim eğrileri a) harici potansiyelin polaritesine bağımlı olan Bipolar (çift kutup) rezistans anahtarlama, b) polariyete bağılı olmayan Unipolar (tek kutup) rezistans anahtarlama (Waser and Aono 2007)

2.4.1. Rezistif anahtarlama mekanizmalarının sınıflandırılması

Rezistans anahtarlama mekanizmaları, faz değişim, termokimyasal, boşluk değişimi, elektrokimyasal metalizasyon ve elektrostatik/elektronik olmak üzere beş farklı rezistif anahtarlama mekanizması bulunmaktadır. Faz değişim anahtarlama mekanizmasında direnci termal süreçler ile kontrol edilebilen anahtarlama materyalinin kristal ve amorf fazları arasında geçişler aygıtın direncini değiştirerek anahtarlama yapılır. GeSbTe, faz değişim RAM (Phase change RAM, PcRAM)’lerde en yaygın kullanılan malzemedir (Jeong 2008). Termokimyasal mekanizma “the fuse-antifuse”(sigorta-karşı sigorta) tipidir. Uygulanan voltaj ile sistemin düşük rezistans durumu yapıldığı anahtarlama materyalinin kısmen bozulması gerçekleşir. Üçüncü anahtarlama mekanizması modeli boşluk değişim mekanizmasıdır. Bu anahtarlama redoks tipi indüklenen anyon göçü olarak bilir. Bu modelde, pek çok metal oksitlerdeki anyonlar, tipik olarak oksijen boşlukları, uygulanan elektrik alan ile katoda doğru sürüklenir ve katotta birikir. Boşlukların sürüklenmesiyle oksijence fakir bölge genişlemeye başlar. Oksijen boşlukları metalik iletim kanalı oluşturur. Böylece iletim yolu, normal fazdan daha yüksek iletkenlik sergileyen ve oksijence zayıf nonstokiyometrik faz ile oluşturulur. Geçiş metal oksitlerde oksijen boşluklarının davranışı rezistans anahtarlama önemli rol oynar (Jeong 2008). Elektrokimyasal anahtarlama mekanizması, redoks

tepkimeleriyle indüklenen katyon göçü ile açıklanır. Metal elektrotların oksidasyonu anot ara yüzeyinde meydana gelir ve ardından metal katyonları katoda doğru göç ederek ara yüzeyde indirgenir. İndirgenen metal atomları anoda doğru büyür ve metalik bir iletim yolu oluşturulur. Sistemin bu durumu “ON” olarak ifade edilir. Ters polarite altında, metal atomlarının dağıtılmasıyla sistem “OFF” durumuna geçer. Elektrostatik/elektronik anahtarlama mekanizmasında elektronik yükler, ara yüzey kusur alanlarına sokulur ve tuzaklanır. Bu durum Schottky bariyeri etkiler ve anahtarlama materyalinin rezistansını değiştirir. Bazı peroksitlerdeki rezistans anahtarlama bu mekanizma ile açıklanır.

2.5. Elektroforming Teorisi

Elektroforming, elektron oluşturma ya da elektron şekillendirme anlamları taşımaktadır. Elektroforming sürecinin bilimsel ve metal malzemeleri farklı malzemeler üzerine kaplama gibi ticari uygulamaları bulunmaktadır. Makro boyutlarda elektroforming süreci tuzlu metal çözeltine daldırılan iki elektrotta uygulanan elektrik akımıyla metal elektrottan çıkan metal iyonları hedef materyalin olduğu elektrotta doğru hareket eder. İyonların çıktığı elektrot anot, hedef materyalin olduğu elektrot katot olarak ifade edilmektedir. Elektroforming süreci, ince film gibi daha düşük boyutlu malzemelerde, materyalin kimyasal ve fiziksel özelliklerinde değişimlere sebep olmaktadır.

2.5.1. Bipolar rezistif anahtarlama yapılarında elektroforming süreci

Bu kısımda elektroforming sürecinin mikro ve nano boyutlarda ince film metal oksit yapılarda davranışı ve süreç sonunda materyalde oluşan elektriksel ve yapısal değişiklikler incelenmiştir. Bipolar rezistif anahtarlama yapılarında kullanılan iki farklı elektroforming mekanizmaları bulunmaktadır.

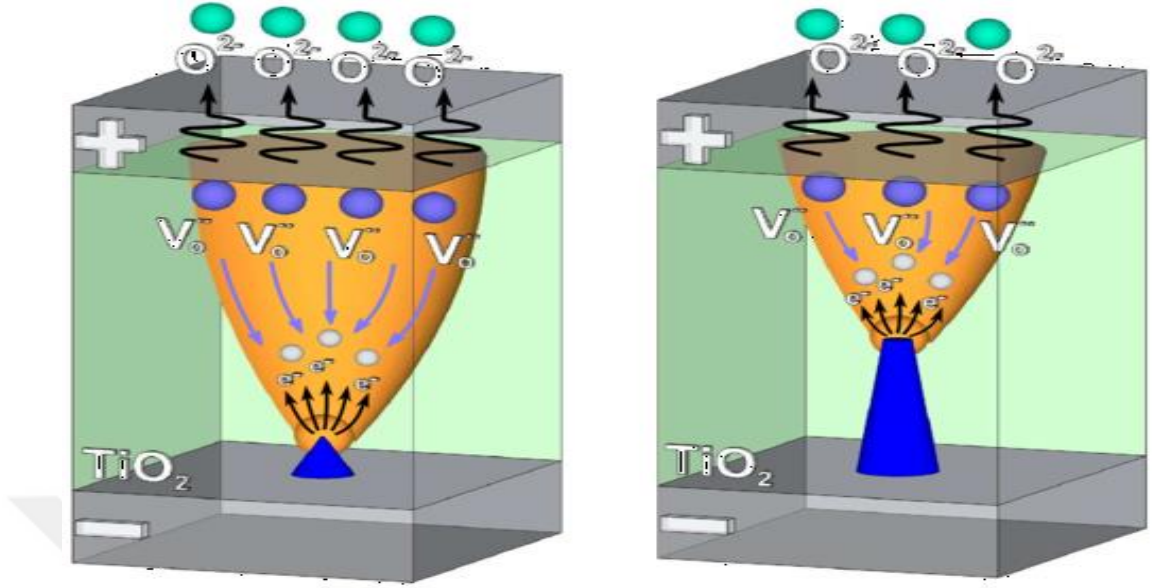
İlk modelde elektroforming, anahtarlama materyalinin bütün hacminde eşit bir şekilde meydana gelir. Bu modelde anahtarlama hücresinin direncinin bozulmasıyla tüm

hacmin direncinin bozulmasına sebep olur. Böylece bir boyutlu elektronik bant diyagramı kullanılarak elektroforming oluşumu açıklanabilir. Bu modelde, oluşan elektroformingden önce kristal yapı içerisinde elektronik enerji durumlarından dolayı var olan içyapı kusurları ile elektroforming sonrasında kristal yapı içerisinde; ara yer ve boşluk oluşumlu noktasal kusurlar ortaya çıkar. Diğer elektroforming modelinde ise anahtarlama materyalinde yerleşmiş belli hacimlerde homojen olmayan bir oluşum şeklinde medya gelir. Bu modelde, rezistansın bozulması anahtarlama materyalinin belli bölgelerinde gerçekleşir. Anahtarlama hücresinin anot kısmında elektrolitik reaksiyon gerçekleşir. Bu reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan gazlar kristal yapı içerisinde anyon boşlukları adı verilen fiziksel değişimlere sebep olur. Elektroforming oluşumu sırasında değişen rezistanstan dolayı kristal yapı içerisinde güç dağılımı değişerek kafes sıcaklığında artış gerçekleşir. Kristal yapının sıcaklığının artmasıyla materyallerde faz değişimleri ve yapısal kusurlar meydana gelir.

2.5.2. Pt/TiO₂/Pt yapısında elektroforming süreci

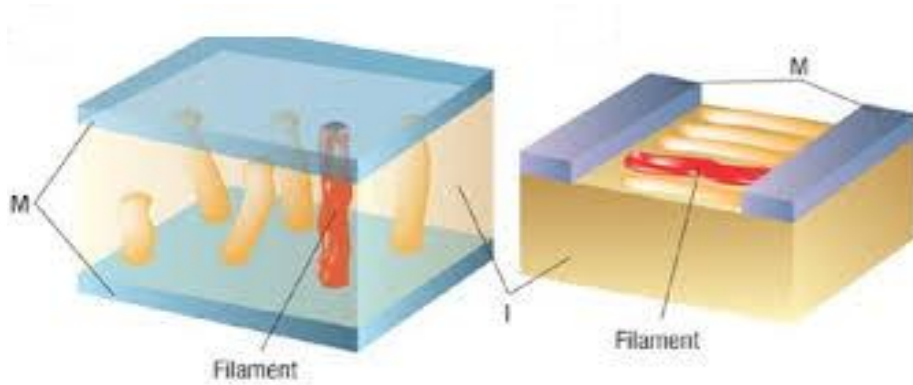
Pt/TiO₂/Pt yapısında başlangıçta yalıtkan olarak bulunan TiO₂, elektroforming sırasında uygulanan akım/gerilim ile TiO₂'in direnci büyük oranda değişimlere uğrar. Pt/TiO₂/Pt yapısının elektroforming sürecinde, TiO₂'de oksijen boşlukları ortaya çıkaran ve TiO₂'in indirgenmesi içeren elektrokimyasal bir reaksiyon gerçekleşir. Elektroforming sırasında gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyon Kröger-Vink kusur notasyonları kullanılarak aşağıdaki şekilde ifade edilir.





Şekil 2.7. Pt/TiO₂/Pt yapıda yük akışı ve oksijen gazının ortaya çıkışı (Anonim 2015a)

Elektroforming sürecinde, TiO₂ içerisinde serbest hareket edebilen oksijen iyonları ve oksijen boşlukları oluşur. Serbest oksijen iyonları uygulanan elektrik alandan dolayı anot ucuna doğru hareket eder. Oksijen iyonları anotta birikerek, elektroforming sürecinde oluşan iletim bandına her bir oksijen iyonu başına iki elektron vererek anotta oksijen gazını oluşturur.



Şekil 2.8. Metal/yalıtkan/metal yapılarda yük akışının sağlandığı filament yapıda iletim kanalı (Waser and Aono 2007)

TiO₂'de elektroforming Pt/TiO₂/Pt anahtarlama hücrelerinde TiO₂'nin yalıtkanlığının bozulması, kristal yapı ve kimyasal değişikliklerle sonuçlanır. Elektroforming

sürecinde uygulanan akım ya da gerilim ile TiO_2 'in direnci ani bir şekilde ve birkaç kat büyüklükte azalır. Anahtarlama hücresinde güç dağılımı, rezistans ile ters orantılı olduğundan, hücrenin rezistansı azaldığında güç dağılımı artar. Güç dağılımının artması kafes sıcaklığının artmasına sebep olur.

Oksijen boşluklarıyla zenginleştirilmiş bölgede serbest halde bulunan elektronlar Ti atomları tarafından yakalanır ve aşağıda verilen reaksiyona göre Ti atomlarının yük durumu değişir.

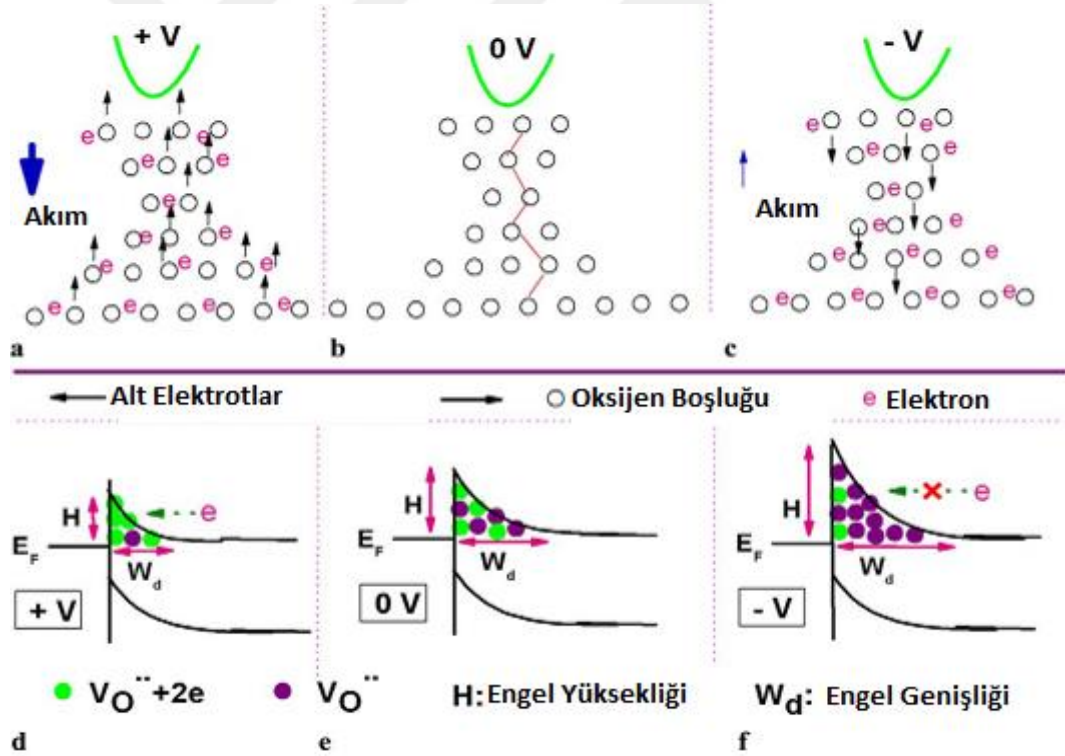


Ti atomlarının yakaladığı elektronlar Ti atomunun 3d bandını doldurur. Ti iyonlarının serbest elektronları yakalayıp daha kararlı durumlara geçmesi ve oksijen boşluklarının azalmasıyla kristal yapı metal faza doğru kaymaya başlar. Elektroforming sırasında oksijen boşluğu oluşumu anahtarlama süresi boyunca eşit değildir. Çünkü Pt/TiO_2 yüzeyleri arasındaki pürüzsüzlük ya da üst elektrotun geometrisinden dolayı TiO_2 içindeki elektrik alanı asimetrik dağılmaktadır. Tek düze olmayan oksijen boşluğu dağılımı kristal içerisinde homojen olmayan iletkenlik dağılımına sebep olur. Elektroforming süreci, TiO_2 'in akım ve gerilim karakteristiğini büyük ölçüde değiştirir. TiO_2 'in rezistansı elektroforming meydana gelirken geri döndürülemeyecek değişiklikler geçirebilir. Elektroforming sırasında anahtarlama materyalinin dielektrik bozulması meydana gelebilir. Dielektrik bozulması teorik olarak, yumuşak ve sert olmak üzere iki şekilde gerçekleşir. Yumuşak bozulma anahtarlama materyalinde geçici rezistans bozulmasına sebep olur. Sert dielektrik bozulması ise kalıcı direnç değişimine sebep olur. TiO_2 'de gerçekleştirilen elektroforming süreci yumuşak dielektrik bozulması sürecidir.

2.5.3. Elektroforming süreci ile $\text{Pt/TiO}_2/\text{Pt}$ yapısında anahtarlama durumları

Anahtarlama hücreğine bir voltaj uygulamak elektroforming oluşturabilir. Bipolar (çift kutup) rezistans anahtarlama için elektroforming, uygulanan voltajın değişken

polaritesi ile birkaç elektroforming adımıyla tamamlanır. Voltaj kontrollü elektroforming sürecinde akım sınırlama önemli bir parametredir. Elektroforming sırasında akım sınırlama olmaksızın dirençteki ani bir azalma sert dielektrik kırılmasıyla sonuçlanabilir. Aynı polaritede ardışık gerilimlerin uygulanması sert dielektrik kırılmasına ve tek kutuplu (unipolar) rezistif anahtarlamanın, düşük rezistans durumuna geçmesine neden olur. Elektroforming sürecinde rezistanstaki azalma değişken polariteli voltajlarda görülür. SET anahtarlama (yüksek rezistans durumundan düşük rezistans durumuna geçiş) voltajının polaritesi ve RESET anahtarlama (düşük rezistans durumundan yüksek rezistans durumuna geçiş) voltajının polaritesi en son elektroforming adımını takip eden ilk voltajın çevrimi tarafından belirlenir.



Şekil 2.9. TiO_2 'in pozitif ve negatif gerilimler altında oluşan filametli iletim yolu a) pozitif gerilimde yük akışı b) sıfır gerilim altında yük durumu c) negatif gerilim altında yük akışı d) pozitif gerilim altında Schottky bariyer yüksekliği e) sıfır gerilim durumunda bariyer yüksekliği f) negatif gerilim altında bariyer yüksekliği (Dong *et al.* 2008)

2.6. Memristör'ün Yapısı ve Özellikleri

Klasik devre teorileri bakımından yük (q), akım (i), voltaj (v) ve manyetik akı (ϕ) olmak üzere dört temel devre değişkeni bulunmaktadır. Bu değişkenler arasındaki ilişkiler; akım ile yük arasında ki ilişki $dq/dt=i$, manyetik akı ile voltaj arasında ki ilişki $d\phi/dt=v$, üç temel devre elemanlarının tanımlanmasında kullanılan ilişkiler; rezistör $R=dv/di$, kapasitör $C=dq/dv$ ve indüktör $L=d\phi/di$ olarak tanımlanmaktadır. Ancak manyetik akı ile yük arasındaki ilişki tanımlanmamıştır. Yaklaşık 150 yıldır pasif devre elemanları kapasitör (1745), direnç (1827) ve indüktans (1831) ile sınırlandırılmıştır (Iniewski 2011). 1971 yılında California Üniversitesinde elektrik mühendisi Prof. Dr. Leon Chua, manyetik akı ile yük arasındaki ilişkiyi açıklayarak Memristör'ün varlığını tahmin etmiştir. Chua, manyetik akı ile yük arasında ki ilişkiyi Memristans $M=d\phi/dq$ olarak tanımlamıştır. Üç temel pasif devre elemanları R , L ve C , doğrusal (Linear) davranış sergilemektedir. Ancak Chua'nın Memristör'ü doğrusal olmayan (non-linear) davranış sergilemektedir.

Memristör direnci kendisine uygulanan voltajın polaritesine, genliğine ve voltajın zaman aralığına bağlı olan iki terminalli bir ayardır. Memristörün direnç durumu ve içerisinde geçen yük durumu, plastik bir boru içerisinde akan su durumuna benzetilebilir. Plastik borunun değişken çapı memristörün değişken direncini, akan su ise memristörden geçen yük miktarını temsil etmektedir. Plastik borunun çapı azaldığında suyun akış yolu daralır bu yüzden borudan akan su miktarı azalmış olur. Azalan çap suyun akışına direnç gösterir. Aynı durum memristör için de geçerlidir. Memristör içerisinde yük akışını sağlayan iletim yolu daraldığında aygıt yüksek rezistans durumuna, iletim yolu genişlediğinde düşük rezistans durumuna geçer. Chua, memristörün varlığını fiziksel bir ayardan ziyade matematiksel olarak açıklamıştır.

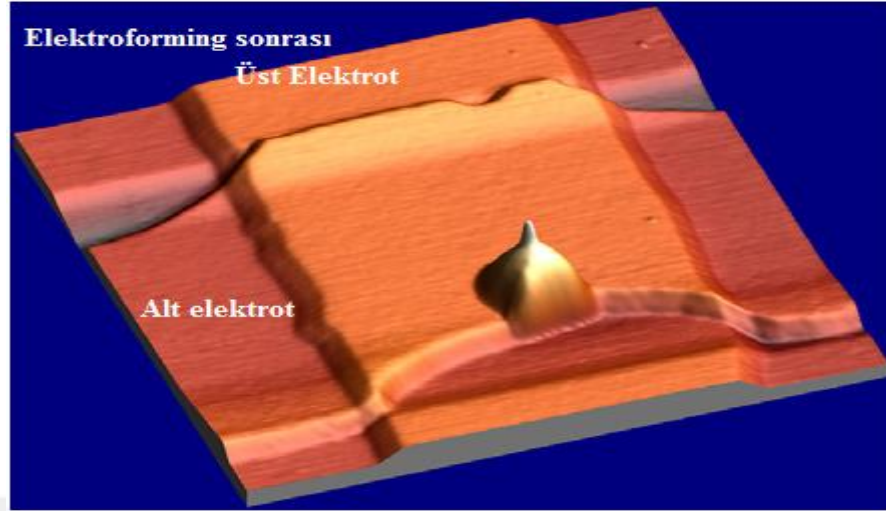
Memristör, uygulanan voltaj kesildikten belli bir süre sonra uygulanan voltaja kadar son rezistans durumunu muhafaza eder. Memristöre uygulanan voltaj kesildiğinde oksijen boşluklarının göçü durur ve TiO_2 tabakaları arasındaki sınır, bulunduğu konumda kalır. Bunun nedeni, uygulanan voltaj kaldırıldığı zaman pozitif yüklü Ti

iyonları hareketsiz kalır ya da TiO_2 tabakaları arasındaki sınırdaki herhangi bir yere hareket etmez (Iniewski 2011). Belli bir süre sonra voltaj uygulandığı zaman Ti iyonları kaldığı yerden hareketine devam eder. Memristör son rezistans durumunu hatırlaması, TiO_2 ile TiO_{2-x} tabakaları arasındaki sınırı korumasından ileri gelmektedir.

2.6.1. Memristör'ün yapısı

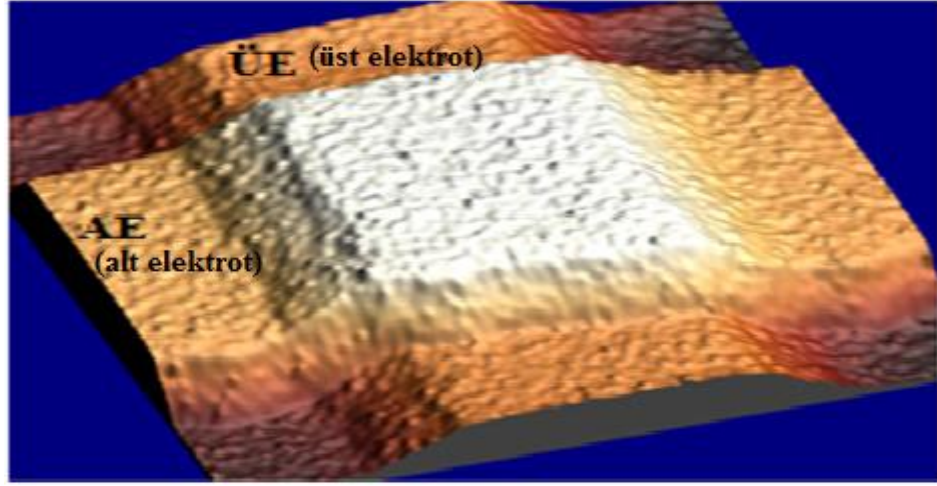
1971 yılında Chua'nın matematiksel olarak tahmin ettiği memristör, ilginç ve değerli devre özelliklerine sahip olmasına rağmen 2008 yılına kadar fiziksel bir aygıt olarak gerçekleştirilmemiştir. HP bilim adamları katıhal elektroniği ve iyonlaştırma uygulanan bir kutuplama altında çiftlenen, nano ölçekteki sistemlerde doğal olarak ortaya çıkan rezistansın basit bir analitik örneğini göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, özellikle TiO_2 çapraz nokta (cross-point) anahtarlama, yüklü atomik ya da moleküler türlerin hareketini gerektiren ve nano ölçekte pek çok aygıtta görülen, histerezis akım-voltaj eğrisinin anlaşılmasını sağlamıştır (Iniewski 2011). Sadece mobil (hareketli) taşıyıcıların taşındığı silikon gibi yarıiletken malzemelerin aksine, memristörde katkılı ya da katkısız TiO_2 tabakalar içinde hem iyonik hem de elektronların hareketi gerçekleşmektedir.

Memristör, 2008 yılında HP laboratuvarlarında R. Stanley Williams ve ekibi tarafından ilk defa fiziksel bir aygıt olarak gerçekleştirilmiştir. Memristörün ilk fabrikasyonu, iki Pt (platinyum) elektrot arasına TiO_2 büyütülerek sandviç yapıda oluşturulmuştur. Ancak, 2.5.2. ve 2.5.3. kısımlarında bahsedildiği üzere Pt/ TiO_2 /Pt yapıya akım ya da gerilim uygulandığı zaman Pt/ TiO_2 /Pt içerisinde elektroforming süreci gerçekleşmektedir. Sürecin sonunda Pt/ TiO_2 /Pt içerisinde Şekil 2.10'de görüldüğü gibi fiziksel deformasyon ortaya çıkmaktadır ve bu fiziksel deformasyonu kontrol etmek zordur (Yang *et al.* 2009).



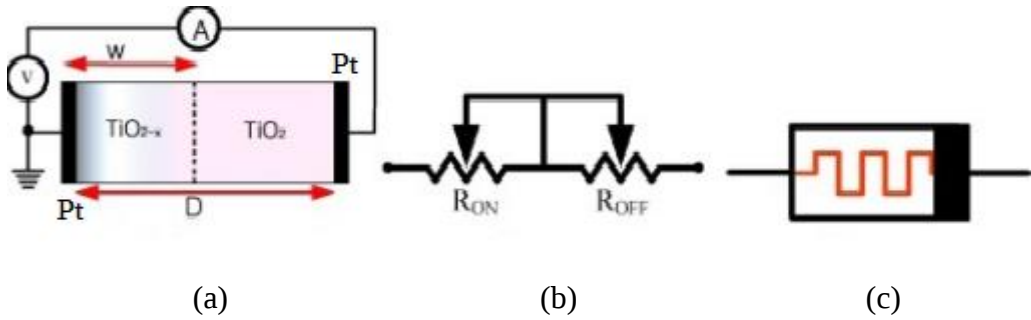
Şekil 2.10. Pt/TiO₂/Pt yapının elektroforming sonrasında fiziksel yapısında oluşan deformasyon (Yang *et al.* 2009)

Pt/TiO₂/Pt yapısı, oksijen iyonlarının ve oksijen boşluklarının tersine göçünü sağlamak için oksijen deposuna (reservoir) sahip olmadığından dolayı hem ON hem de OFF anahtarlama çevrimlerinde artan bir iletkenlik sergiler. Bu problemi çözmek ve elektroforming sürecini düzeltmek için Pt/TiO₂/Pt yapısına, oksijence fakir TiO_{2-x} tabakası eklenmiştir (Yang *et al.* 2009). TiO₂ içerisinde oksijen boşlukları n-tipi katkıları (donör) gibi hareket etmektedirler. TiO₂'in kimyasal oluşumu, 2:1 oksijen:titanyum oranı ile yalıtkan özellikler sergiler. TiO_{2-x} oluşumunda yaklaşık %5 oranında oksijen yetersizliği bulunmaktadır. TiO_{2-x} tabakasının metalik özellik sergilediği için iletkenliği yüksektir (12012). Şekil 2.11.'de görüldüğü gibi TiO_{2-x} tabakası eklendikten sonra Pt/TiO₂/TiO_{2-x}/Pt Memristör yapısında herhangi bir fiziksel deformasyon ortaya çıkmamıştır (Yang *et al.* 2009).



Şekil 2.11. Harici potansiyel altında $\text{Pt}/\text{TiO}_2/\text{TiO}_{2-x}/\text{Pt}$ yapının yüzeyi (Yang *et al.* 2009)

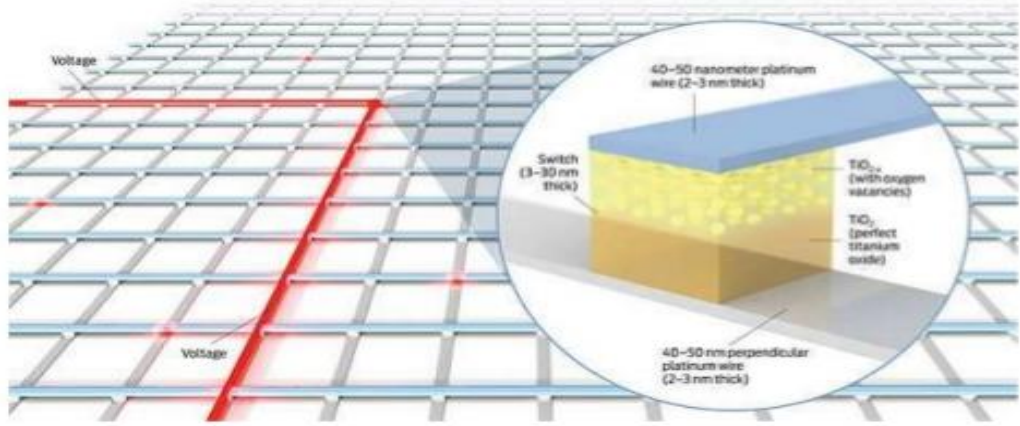
Şekil 2.12. a'da Memristör'ün yapısı görülmektedir. D, $\text{TiO}_2/\text{TiO}_{2-x}$ tabakalarının toplam uzunluğu, w, oksijen boşluklarıyla zenginleştirilmiş bölgenin uzunluğudur. Bu bölge aygıtın rezistans durumuna göre genişler ya da daralır. Şekil 2.12. b'de gösterildiği gibi R_{ON} bölgesi, aygıtın oksijen boşluklarıyla zenginleştirilmiş bölgenin direncini, R_{OFF} ise aygıttaki saf yalıtkan TiO_2 bölgenin direncini ifade etmektedir.



Şekil 2.12. Memristör'ün yapısı b) rezistans eşdeğeri c) sembolü (Sah *et al.* 2012)

Şekil 2.13.'de görüldüğü gibi Memristör çapraz nokta (cross-point) anahtarlama yapısında kullanıldığı zaman daha yoğun anahtarlama sağlanarak daha fazla işlem yapılabilir. Flash hafıza teknolojiler, bir çevrimde yaklaşık 100.000 bit bilgi yazma ve silikon temelli tranzistörlerin kullanılması gibi bazı kısıtlamalara sahiptir. Memristör, bir çevrimde yaklaşık bir milyon bit bilgi yazılabilme ve basit yapılarından

dolayı flash hafızalardan daha hızlı olmaları gibi üstünlüklere sahiptir (Chakraverty and Kittur 2012).

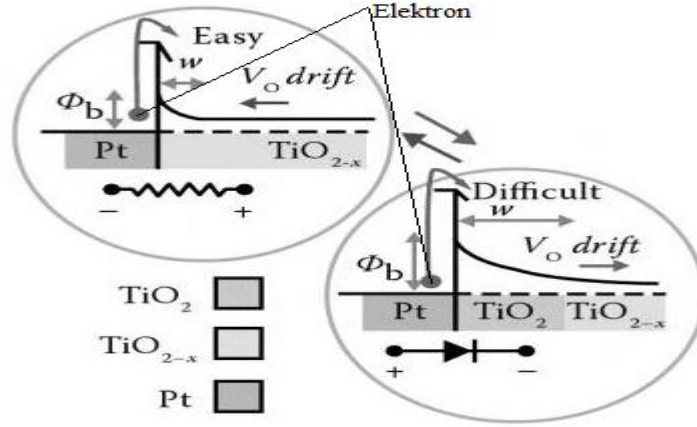


Şekil 2.13. Pt/TiO_{2-x}/TiO₂/Pt yapının çapraz nokta (cross-point) anahtarlanması (Williams 2008)

2.6.2. Memristör'ün kontak yapıları ve özellikleri

Pt/TiO₂/TiO_{2-x}/Pt yapıda Memristör metal/yarıiletken kontak yapısına sahiptir. Metal/yarıiletken kontak yapıları çok yoğun katkı durumlarında omik özellik sergiler ve katkılama durumuna göre (yüksek veya düşük katkılama) Schottky benzeri davranış gösterebilirler.

Şekil 2.14'de görüldüğü gibi Pt/TiO₂ tabakaları arasında oksijence zengin TiO₂ tabakasından dolayı Schottky benzeri davranış sergilerken Pt/TiO_{2-x} ara yüzeyi tipik bir metal/yarıiletken kontak yapısında rezistans karakteri sergilemektedir (Iniewski 2011).

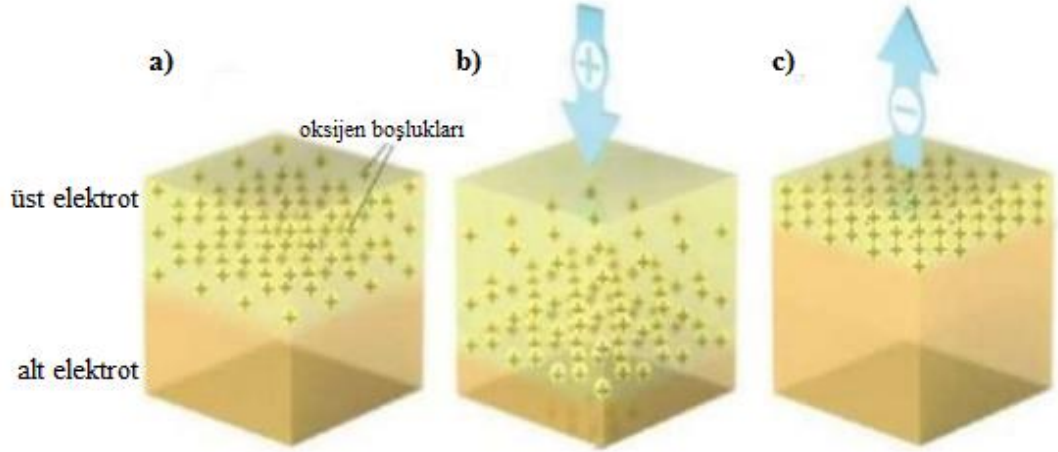


Şekil 2.14. Pt/TiO₂/TiO_{2-x}/Pt yapının kontak özellikleri (Iniewski 2011)

2.6.3. Memristör'de yük akış mekanizmaları ve özellikleri

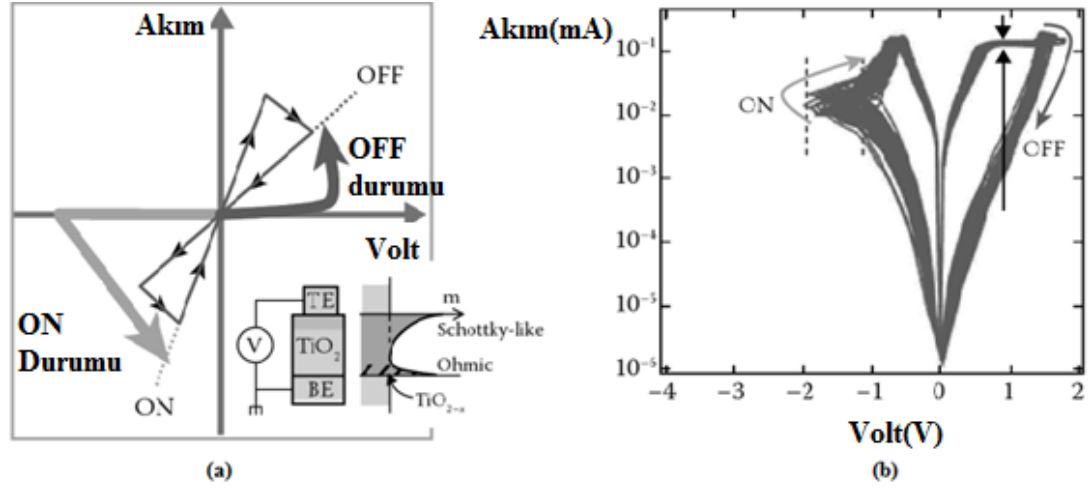
Pt/TiO₂/TiO_{2-x}/Pt yapıda memristörde yük akışının gerçekleşmesi başka bir deyişle memristörün iletim ya da kesim durumu aygıtın iç rezistansına bağlıdır. Memristör rezistansı uygulanan gerilimin genliğine ve polaritesine bağlıdır. Polariteye olan bu bağlılık memristörün bipolar (çift kutup) anahtarlama yapısında olduğunu göstermektedir.

Şekil 2.15 a'da görüldüğü gibi oksijen boşluğunca zengin TiO_{2-x} tabakası üst elektrotta konumlandırıldığı zaman üst elektrotta pozitif polaritede bir voltaj uygulandığında, pozitif yöndeki potansiyel pozitif yüklü oksijen boşluklarını karşı elektrotta iterek yük akışı sağlanmış olur. Oksijen boşluklarının TiO₂ bölgesine geçmesiyle TiO₂/TiO_{2-x} tabakaları arasındaki sınır hareket ederek hem TiO_{2-x} bölgesinin hem de memristörün iletkenliğinin artmasına sebep olur. Pozitif yüklü oksijen boşlukları TiO₂/Pt ara yüzeyine ulaştıkları zaman, elektronlar için potansiyel bariyer çok dar olduğu için bariyer boyunca tünelleme oluşur ve çok fazla yük akışı gerçekleşir. Böylece aygıt ON konumuna geçmiş olur. TiO_{2-x} tabakasının bulunduğu bölgeye ters polaritede voltaj uygulandığı zaman negatif potansiyel pozitif yüklü oksijen boşluklarını çekerek karşı elektrotta geçmesini engeller. Pozitif yüklü oksijen boşlukları TiO₂'in dışına çekilir. TiO₂'in direnci ve yalıtkanlığı artar. Böylece aygıt tamamen yüksek direnç sergileyerek OFF anahtarlama konumuna geçer.



Şekil 2.15. Memristör'ün yük iletim durumları a) Pt/TiO_{2-x}/TiO₂/Pt yapıda Memristör'e voltaj uygulanmadığı durum b) üst elektrota (TiO_{2-x} tabakasına) pozitif yönde voltaj uygulandığında pozitif yüklü oksijen boşluklarının itilerek karşı bölgeye geçme durumu c) üst elektrota (TiO_{2-x} tabakasına) negatif potansiyel uygulandığı zaman oksijen boşlukları negatif potansiyel tarafından çekilerek karşı bölgeye geçme durumu (Williams 2008)

Şekil 2.16'de görüldüğü gibi, TiO_{2-x} tabakası alt elektrotta olduğu durumda, pozitif polaritede voltaj uyguladığında üst elektrot ile TiO₂ arasında Schottky benzeri davranış sergilenir ve memristör OFF konumuna anahtarlanır. Aynı yapıya ters polaritede voltaj uygulandığında oksijen boşlukları TiO₂ tabakasına gönderilerek yük akışı sağlanarak aygıtın direnci azalır ve Memristör ON konumuna anahtarlanır. memristörün anahtarlama polaritesi diğer bir ifade ile uygulana voltajın polaritesine göre aygıtın ON ve OFF anahtarlama konumları, aygıt fabrikasyonunda yüzeylerin asimetrisi ile kontrol edilir. Şekil 2.16'de gibi yapının aksine TiO_{2-x} tabakası üst elektrota konulursa aygıt pozitif polarite voltajda ON konumuna geçerken ters polarite voltajda OFF konumuna geçecektir.



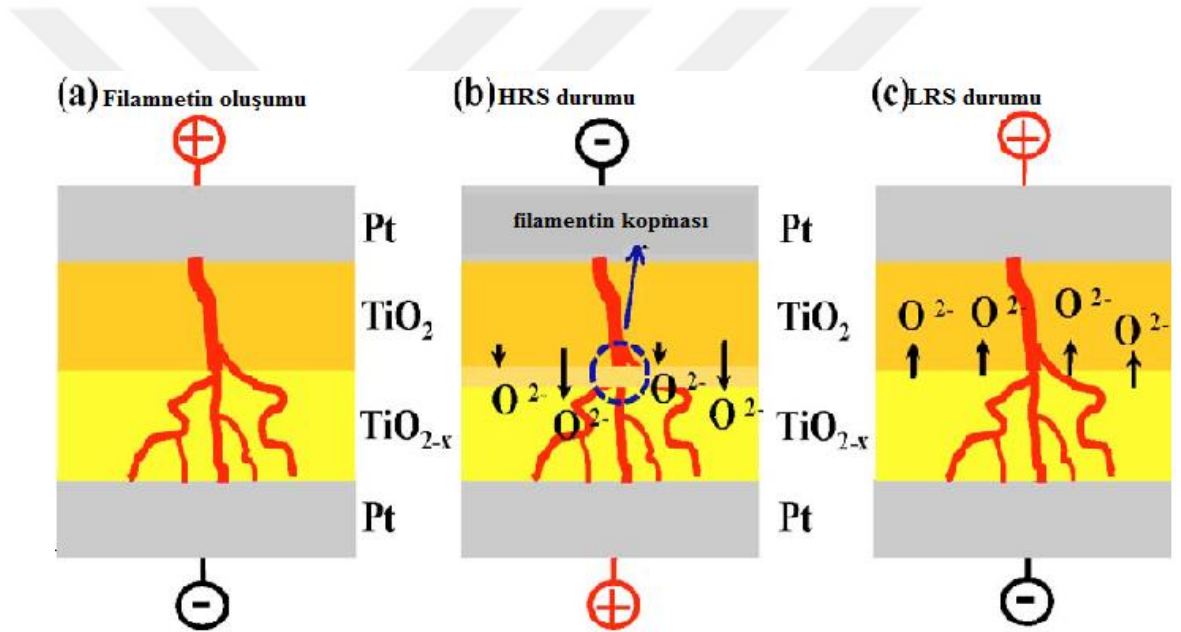
Şekil 2.16. Memristör'ün kontak yapısı a) Pt/TiO_{2-x}/TiO₂/Pt Memristör'ün ON/OFF anahtarlama oluşumları ve I-V eğrisi b) 50 çevrimde (saykıl) bipolar (çift kutup) anahtarlama (Iniewski 2011)

2.6.4. Memristörde yük akışına farklı bir bakış açısı

Rezistif anahtarlama davranışı sergileyen aygıtların mikroskobik mekanizmaları hala tartışma altında iken, bu aygıtların anahtarlama mekanizmalarında genel kanı; uygulanan bir elektrik alan altında oksijen iyonları ve oksijen boşluklarının göçü ile rezistif anahtarlama gerçekleştirilir. Bu yüzden rezistif anahtarlama çalışmalarında redoks tepkimeleri üzerine odaklanılmıştır (Ho *et al.* 2009).

Şekil 2.17. a'da görüldüğü gibi, TiO₂ ile TiO_{2-x} tabakaları arasında redoks reaksiyonu sonucunda oluşan filament yapıda iletim kanalının oluşumu ve bu kanalın kopması uygulanan voltajın polaritesine göre değişmektedir. Oksijen iyonlarının elektrik alan altında TiO_{2-x} tabakası içinde tuzaklanma ya da tuzaklanmama olayı gerçekleşir. TiO₂ tabakası oksijen rezervi gibi hareket ederken TiO_{2-x} tabaka daha düşük oksijen iyon yoğunluğuna sahiptir. Bu yüzden TiO_{2-x} tabakası oksijen iyonlarının hareketine TiO₂ tabakadan daha duyarlıdır (Do *et al.* 2009). Şekil 2.17. b'de görüldüğü gibi, negatif bir voltaj uygulandığında oksijen iyonları TiO₂ tabakasından TiO₂/TiO_{2-x} yüzeyine sürüklenir. TiO_{2-x} tabakanın ara yüzeylerinde oksidasyon meydana gelir. Elektroforming ile tabaka tamamen oksitlenir. Aynı zamanda iyon tuzakları için kısmen oksijen iyonları TiO_{2-x} tabaka içine girer. Oksitlenen TiO_{2-x} tabaka içindeki

oksijen tuzakları elektron iletimini engelleyerek memristörün yüksek direnç konumuna geçmesine sebep olur. Ters polaritede gerilim uygulandığı zaman, yüzeyler arasında oksitlenmiş oksijen iyonları ve TiO_{2-x} tabakasında tuzaklanmış iyonlar, Şekil 2.17. c’de görüldüğü gibi yüzeyler arasında oluşan filament yapıda iletim yoluyla TiO_2 tabakaya doğru hareket eder. Bu durumda aygıt düşük rezistans durumuna geçer. Bipolar anahtarlama davranışları oksijen zengin bölgeden oksijen fakir bölgeye iyon göçünden ve kısmen TiO_{2-x} tabakasında oksijen tuzaklanmasından dolayı TiO_2 ve TiO_{2-x} tabakaları arasında ara yüzeylerde meydana gelen redoks reaksiyonlarına atfedilebileceği görülür (Do *et al.* 2009).



Şekil 2.17. Pt/TiO₂/TiO_{2-x}/Pt yapının rezistans durumları a) TiO₂ ile TiO_{2-x} tabakaları arasında iletim kanalının oluşumu, b) yüksek rezistans durumu c) düşük rezistans durumu (Do *et al.* 2009).

2.6.5. Memristör’ün akım-gerilim karakteristiği

Pt/TiO₂/TiO_{2-x}/Pt yapıda memristörün akım-gerilim karakteri histerezis davranış sergilemektedir. Memristör’ün akım-gerilim, yük, memristans ve durum değişkeni ifadeleri aşağıda verilen formüllerden elde edilebilir.

$$\frac{dw(t)}{dt} = \mu v \frac{R_{on}}{D} i(t) \quad (2.6.5.1)$$

$$w(t) = \mu v \frac{R_{on}}{D} q(t) \quad (2.6.5.2)$$

Durum değişkeni (w) ifadesi verilen yukarıdaki denklemlerde, R_{ON} ; oksijen boşluğuyla zenginleştirilmiş (boşluk katkılanan) bölgenin direnci, μv ; ortalama katkı mobilitesi, D ; katkılanmış ve katkılanmamış (TiO_2/TiO_{2-x}) bölgelerin toplam uzunluğu ve q ; birim zamanda memristör içerisinde geçen yükü temsil etmektedir

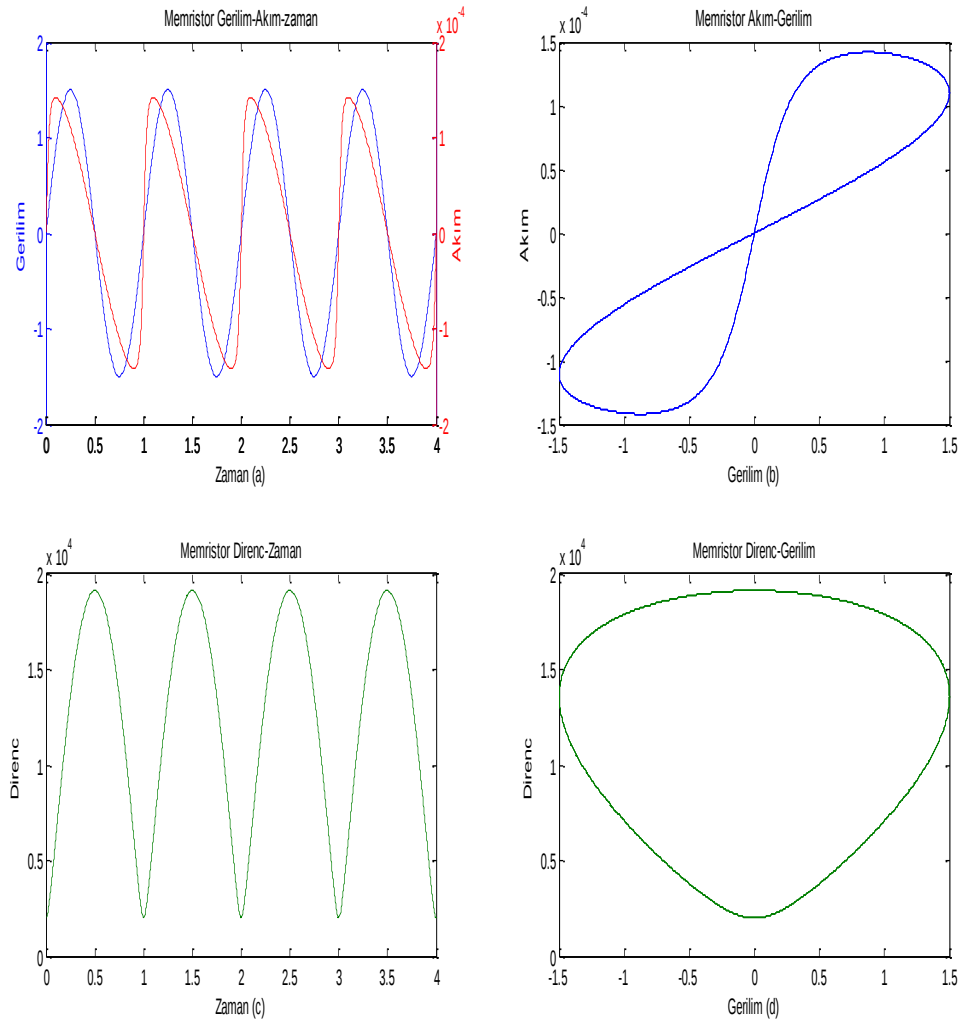
$$v(t) = (R_{on} \frac{w(t)}{D} + R_{off}(1 - \frac{w(t)}{D}))i(t) \quad (2.6.5.3)$$

Memristörün akım-gerilim ifadesi verilen yukarıdaki denklemde, R_{OFF} katkılama yapılmayan TiO_2 bölgenin direncini, $v(t)$ ve $i(t)$ memristörün akım ve gerilimini temsil etmektedir.

$$M(q) = R_{off}(1 - \frac{\mu v R_{on}}{D^2})q(t) \quad (2.6.5.4)$$

Memristörün memristans (M) ifadesi verilen yukarıdaki denklemde, memristans memristör içerisinde geçen yük miktarıyla ters orantılıdır. Yük akışı arttıkça memristans değeri azalmaktadır.

Memristör, farklı modelleme yapılarıyla bilgisayar ortamında programlar kullanılarak modellenmiştir. Bu modeller; doğrusal (linear) model, doğrusal modele pencere fonksiyonunun eklendiği doğrusal olmayan (nonlinear) model ve tünel bariyer modelidir.

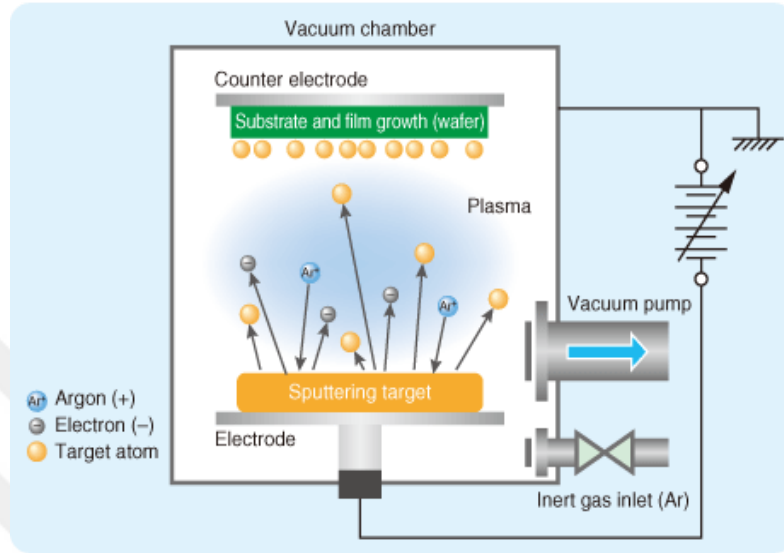


Şekil 2.18. Memristör'ün çalışma karakteristiği a) memristöre uygulanan akım-gerilim b) memristörün akım-gerilim karakteristiği c) memristörün zamana göre rezistansının değişimi d) memristör direncinin gerilimle değişimi (Zidan 2011)

2.7. Saçtırma (Sputtering) Tekniği

İnce film üretim tekniklerinde kullanılan saçtırma tekniği, hedef malzeme yüzeyinin plazma ya da iyon tabancası aracılığı ile hızlandırılmış atomik yüksek enerjili iyonlarla bombardıman edilerek, hedef malzeme atomlarının yüzeyden saçtırılması ve altlık olarak adlandırılan malzeme yüzeyine biriktirilmesi esasına dayanır (Sönmezoğlu vd. 2012). Hedef yüzeyin bombardımanında kullanılan parçacıklar genellikle ağır bir asal gazın iyonlarıdır. Saçtırma tekniğinde, asal gaz olarak genellikle Argon (Ar) gazı

kullanılmaktadır. Saçtırma tekniği sisteminde yüksek seviyede vakum sağlamak için 10^{-7} Torr'a kadar inebilen çok düşük basınçlarda kaplama yapılır (Polat 2013).



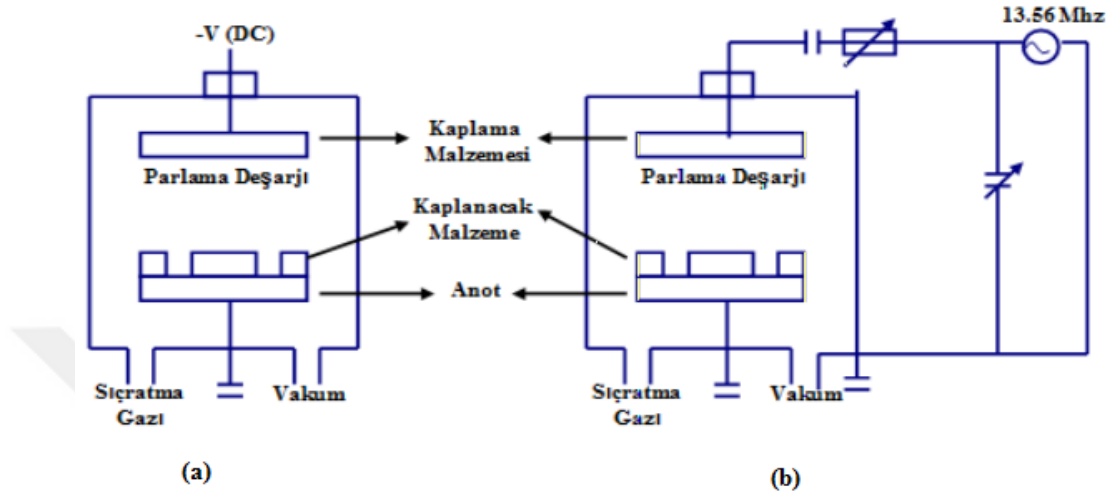
Şekil 2.19. Saçtırma tekniğinin şematik gösterimi (Anonim 2015b)

Saçtırma tekniğinin en önemli avantajı, farklı buhar basınçlarında farklı buharlaşma hızlarına sahip alaşımların, bileşimlerini değiştirmeksizin başarıyla kaplama yapabilmesidir. Yöntemin dezavantajı, sınırlı kaplama kalınlığı ve yüksek maliyetli olmasıdır (Sönmezoğlu vd. 2012). Kaplanmak istenen malzeme yelpazesinin çok geniş olması saçtırma tekniğini çekici kılmaktadır. Saçtırma tekniğinde, kullanılan hedef malzemenin türüne göre farklı saçtırma teknikleri kullanılmaktadır.

2.7.1. DC diyot saçtırma tekniği

Saçtırma tekniğinin kullanılacak hedef malzeme iletken olduğu zaman DC diyot saçtırma tekniği kullanılır. Şekil 2.20. a'da görüldü gibi, anot ve katot olmak üzere karşılıklı yerleştirilen elektrottan oluşmaktadır. Kaplama yapılacak malzeme anoda yerleştirilir ve istenilen basınç değerine inildikten sonra vakum odasına Ar gazı gönderilir. Elektrotlara birkaç yüz voltluk bir gerilim uygulanır. Serbest kalan elektronlar, elektrik alan tarafından hızlandırılır ve Ar atomlarını uyarır. Uyarılan Ar atomları hedef malzemenin nötral atomlarını ve ikincil elektronlarını koparak plazma

yolu ile kaplanacak malzeme üzerinde ince bir film oluşturacak şekilde birikir (Polat 2013).

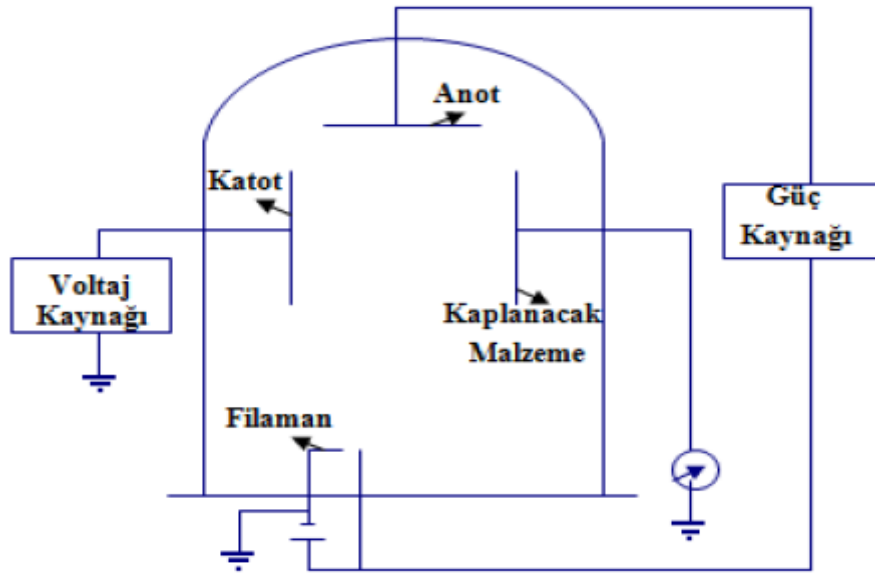


Şekil 2.20. a) DC Diyot saçtırma b) RF saçtırma (Sönmezoğlu vd. 2012)

DC diyot saçtırma tekniği kolaylığından dolayı yangın şeklinde kullanılmaktadır. Ancak, düşük biriktirme, kaplanılacak olan malzemenin altında bulunan altlığın fazla ısınması ve sınırlı biriktirme yüzey alanı gibi dezavantajlara sahiptir (Sönmezoğlu vd. 2012).

2.7.2. DC triyot saçtırma tekniği

Bu sistemde DC Diyot saçtırma tekniği sistemine bir elektrot kaynağı ve bir yardımcı anot ilave edilmiştir. Elektron kaynağı olarak kullanılabilecek bir volfram akkor katot ısıtılarak termoiyonik etki yardımıyla gaz basıncından bağımsız olarak iyonlaşma verimi yükseltilebilmektedir (Keleşoğlu 2011). Elektron kaynağının ısıtılmasıyla joule etkisi nedeniyle elektronlar anot tarafından çekilir ve yeterli bir anot gerilimi ile elektronlar ivmelendirilerek gaz molekülleriyle çarpışması sonucu iyonizasyon meydana gelir. Hedef malzeme sistem içerisinde oluşan plazma içerisine yerleştirilir ve negatif gerilim uygulanarak DC diyot saçtırma sisteminde olduğu gibi ince film kaplanır.



Şekil 2.21. DC triyot saçtırma tekniği (Sönmezoğlu vd. 2012)

Çoğu triyot saçtırma tekniğinde sisteme dışarıdan bir manyetik alanda uygulanır. Böylece akkor katottan serbest bırakılan ve anoda doğru hareket eden elektronlar manyetik alanın etkisiyle spiral tarzı bir yörünge izler (Keleşoğlu 2011). Triyot saçtırma sisteminde iyon akımı değerleri, sistemin gaz basıncı veya hedef malzemeye uygulanan gerilim değiştirilmeden, katot ve anot akım değerleri değiştirilerek kontrol edilebilmektedir. Bundan dolayı triyot sistemde plazma kontrolü daha kolay yapılabilmektedir. DC triyot saçtırma tekniğinin temel dezavantajı, sistem içerisinde buluna reaktif gazın varlığı nedeniyle filamaların ömrünün kısalmasıdır (Sönmezoğlu vd. 2012).

2.7.3. Manyetik alanda saçtırma (magnetron saçtırma)

Manyetik alanda saçtırma tekniği, kullanılan kaynağın cinsine bağlı olarak, RF güç kaynağı kullanılmışsa RF magnetron saçtırma ve DC güç kaynağı kullanılmışsa DC magnetron saçtırma adı verilir (Polat 2013). Manyetik alanda saçtırma tekniği DC diyot saçtırma tekniğine ek olarak, hedef malzemenin arkasına mıknatıs yerleştirilmiştir. Mıknatısın manyetik alan çizgileri hedef malzeme yüzeyine paralel, elektronları hızlandırmak için kullanılan elektrik alan çizgileri ise diktir. Hedef

malzeme yüzeyinden yayılan ikincil elektronlar manyetik ve elektrik alan etkisiyle katot yüzeyinde spiral şeklinde bir yörüngede hareket ederler. Bu hareket sonucunda elektronların aldıkları yol uzar ve çarpışma olasılıkları artar. Böyle bir sistemin iyonlaşma verimi çok yüksektir. Manyetik alanda saçtırma sisteminde, hedef malzeme önündeki iyonlaşmanın tek biçimli (uniform) olmaması hedef malzemenin homojen olmayan bir şekilde erozyona uğraması ve hedef malzemenin soğutulmasının gerekmesine neden olur. Bunlar bu yöntemin dezavantajları arasındadır (Keleşoğlu 2011).

2.7.4. Yüksek frekansta saçtırma (RF saçtırma)

Yüksek frekansta saçtırma tekniği, DC Diyet sıçratma tekniği sisteminde DC kaynak yerine AC kaynak bağlayarak hedef malzeme yalıtkan dahi olsa sistem içerisinde akım geçirilmesini sağlamaktadır. Hedef malzeme iletken olmadığı zaman DC diyet saçtırma tekniği kullanımı verimli değildir. Yüksek frekansta saçtırma sisteminde, yüksek frekanstan dolayı elektronların sistem içerisindeki hareketleri sürekli değiştiğinden, hedef malzemenin kaplamasının yanında kullanılan altlık malzemedede kaplanır. Ancak altlık malzemedeki kaplanması hedef malzemesi kadar değildir (Keleşoğlu 2011). Yüksek frekans saçtırma tekniğinde kaplama hızı DC diyet saçtırma tekniğine göre yavaş olmasına rağmen, RF saçtırma tekniği daha geniş kullanım alanına sahiptir (Polat 2013).

3. MATERİYAL ve YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, metal oksit yapıdaki memristörlerin üretim parametreleri kullanılarak elde edilen farklı R_{OFF} ve R_{ON} değerlerine göre memristörlerin doğrusal olmayan davranışlarının nasıl değiştiği En Küçük Kareler Yöntemi ile MATLAB hazırlanan model üzerinde incelenmiştir.

3.1. R_{ON} Direncinin Hesabı

$$W(t) = \mu v \frac{R_{on}}{D} q(t) \quad (3.1.1.)$$

Denkleminde $q(t)$ yük birikiminin maximum değere ulaştığı zaman $w(t)=D$ olmaktadır. Bu durumda R_{ON} değeri aşağıdaki denklemden elde edilir.

$$R_{on} = \frac{D^2}{\mu v q(t)} \quad (3.1.2.)$$

$D=10$ nm ve $\mu v=10^{-14}$ m²/(V.s) olmak üzere sabit alındığında R_{ON} direnci yükün bir fonksiyonu olarak karşımıza çıkmaktadır. Buradan elde edilen R_{ON} , 2.6.5.4 denkleminde yerine koyularak en küçük kareler yöntemi ile R_{OFF} 'un hesaplanmasında kullanılmıştır.

3.2. En Küçük Kareler Yöntemi

Memristörün akım-gerilim eşitliğinde iki farklı ve bilinmeyen değişken olarak R_{ON} ve R_{OFF} alınırsa bu iki değişkenin alabileceği değerlerin akım-gerilim eşitliğini nasıl etkileyeceği en küçük kareler yöntemi ile anlaşılabilir.

Herhangi bir çalışma sonucunda elde edilen verilen tablo haline getirildikten sonra bu tablodaki veriyi modelleyen bir fonksiyon elde edilmeye çalışılır. Bu fonksiyonlardan

en iyi sonuç veren fonksiyonu bulmak için Regrasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Regrasyon analizi yapılırken en çok kullanılan yöntem en küçük kareler yöntemidir. Bu yöntem 1795 yılında C.F. Gauss tarafından geliştirilmiş ve ilk defa 1801 yılında Cres astroidi'nin yörüngesinin belirlenmesinde kullanılmıştır.

Yapılan ölçümler sonucunda i tamsayı olmak üzere, $i=1,2,\dots,n$ değerleri için (x_i, y_i) değerleri elde edilmiş olsun ve Y_i 'in x_i değerlerine göre değiştiği varsayalım. (x_i, y_i) düzlemde noktalar olarak düşünüldüğünde, bu noktalar arasında bir ilişkisinin olup olmadığı ölçümlerin doğası gereği her $i=1, 2, \dots, n$ değeri için $Y_i=f(x_i)$ fonksiyonu kullanılarak elde edilebilir (Golayoglu 2001). Ancak ölçüm yapılırken yapılan hatalardan dolayı bazı eşitlikler fonksiyonu sağlamayabilir. Ölçülen her Y_i değeri $f(x_i)$ için yaklaşık değeri kabul edilerek yaklaşımdaki hatanın en az olduğu fonksiyon belirlenmeye çalışılır. Fonksiyon elde edildikten sonra, fonksiyonun bağlı olduğu parametreler belirlenmeye çalışılır. Fonksiyon $Y=f(x)=mx+b$ şeklinde bir doğrusal bir fonksiyon ise belirlenmesi gereken fonksiyon parametreleri m , b ya da $Y=f(x)=ax^2+bx+c$ şeklinde bir fonksiyon da belirlenmesi gereken fonksiyon parametreleri a , b , ve c 'dir. Y_i değeri $f(x_i)$ için yaklaşık değer, $f(x_i) \approx Y_i$ kabul edilerek yapılan hata $Y_i - f(x_i)$ ile elde edilir.

$Y_i - f(x_i)$ farkının her bir değerine artık denir. En küçük kareler yönteminde aranan fonksiyon ya da fonksiyonun parametrelerinin tüm artıkların kareleri toplamı olan ve aşağıdaki gibi ifade edilen eşitliğin minimum olmasını sağlayacak şekilde belirlenir. Kareler toplamının en küçük olması hatanın minimum olması anlamına gelir (Golayoglu 2001).

$$\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 = (y_1 - f(x_1))^2 + \dots + (y_n - f(x_n))^2$$

(3.1.3.)

3.3. Matlab Programında Resnorm ve Lsqcurvefit Komutları

Memristörün farklı R_{ON} ve R_{OFF} değerleri karşılık memristörün doğrusal olmayan davranışını incelemek için MATLAB programında resnorm ve lsqcurvefit komutları kullanılmıştır.

Lsqcurvefit komutu, en küçük kareler yöntemi mantığında, doğrusal olmayan (non-linear) eğri uydurma (veri uydurma) problemlerini çözmek için kullanılır. Kullanılan giriş ve çıkış verileri vektör ya da matris olabilir ancak giriş verileri ve çıkış verileri aynı boyutta olmak zorundadır. Lsqcurvefit komutu ise veri uydurma problemleri için uygun bir ara yüz (interface) sağlar.

Lsqcurvefit komutunun Matlab ortamında lsqcurvefit (@myfun, x0, xdata, ydata) formatında kullanılır. @myfun, giriş verilerine göre çıkış değişimi gözlenecek olan doğrusal olmayan fonksiyondur. Matlab ortamında alt program olarak kaydedilir. X_0 değeri, giriş verilerinin başlangıç değeri, xdata fonksiyonda belirtilen giriş değeri, ydata fonksiyonda giriş değerlerine göre elde edilecek çıkış değerleridir. Çizelge3.1’de giriş değerinin artan durumuna göre lsqcurvefit komutunun kullanımı ve ilgili açıklamaları verilmiştir.

Çizelge 3.1. Artan değerine göre bazı lsqcurvefit kullanımları

Kullanım	Açıklama
[x, resnorm]=lsqcurvefit(...)	x ‘te kalanın kare olduğunda geri döner
[x, resnorm,residual]=lsqcurvefit(...)	x çözümünde fonksiyonun giriş ve çıkış verilerinin artan değerlerinde geri döner
[x, resnorm,residual,exitflag]=lsqcurvefit(...)	çıkış durumları tanımlamak için exitflag değeri ile geri döner

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Araştırma Bulguları

Bu çalışmada 11T217 nolu Tübitak projesi kapsamında üretilen numunelerin fabrikasyon parametreleri kullanılarak Metal oksit yapıdaki memristörün farklı R_{ON} ve R_{OFF} değerleri ve akım-gerilim karakteristikleri MATLAB ortamında çeşitli komutlar kullanılarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. Numunelerin fabrikasyon parametreleri

Proses Kodu	Alttaş Malzeme	Hedef	RF (W)	Alttaş Sıcaklığı (°C)	Kalınlık (nm)	Ar (sccm)	O ₂ (sccm)
3a_8	SiO ₂	Ti	150	39	450	20/19	-
3a_8_01	SiO ₂	Pt	50	39	30	20/19	-
3c_R07_02	SiO ₂	Pt	50	38	30	20/19	-
4a_R05_2e	SiO/Si	Ti	150	30	500	20	-
4a_R05_2f	TiO ₂ /Ti	Ti	120	40	100	20	0.55
3c_R07_01	SiO ₂	Pt	50	38	30	20/19	-
S100_3c	Ti/Ti	Ti	86	40	100	20/19	0.46/0.35

Çizelge 4.2. S100_2c proses kodlu numunenin fabrikasyon parametreleri (Güllülü 2014)

Proses Kodu	Alttaş Malzeme	Hedef	RF (W)	Alttaş Sıcaklığı(°C)	Kalınlık (nm)	Ar (sccm)	O ₂ (sccm)
S100_2c	Si	Ti	150	40	10	20/18	-

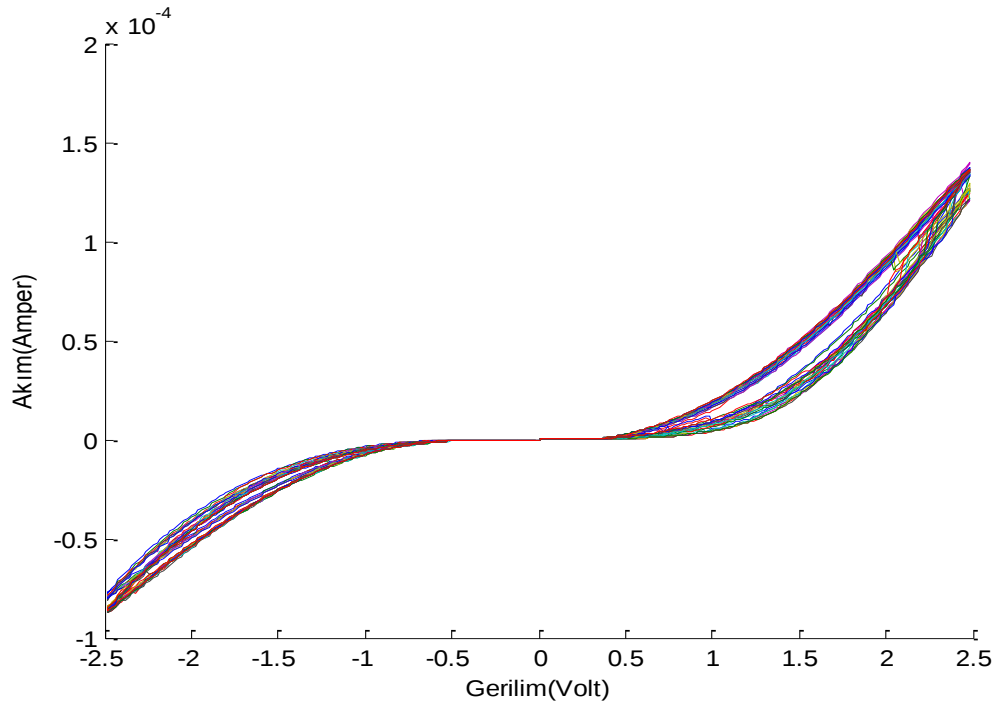
Çizelge 4.3. Numunelere uygulanan akım-gerilim değerleri

Proses Kodu	Vmin.	Vmax.	Gerilimdeki Artış	Akım Limiti	Döngü Sayısı
3a_8	-2.5	2.5	0.02	0.000275	25
3a_8_01	-4	4	0.02	0.000385	25

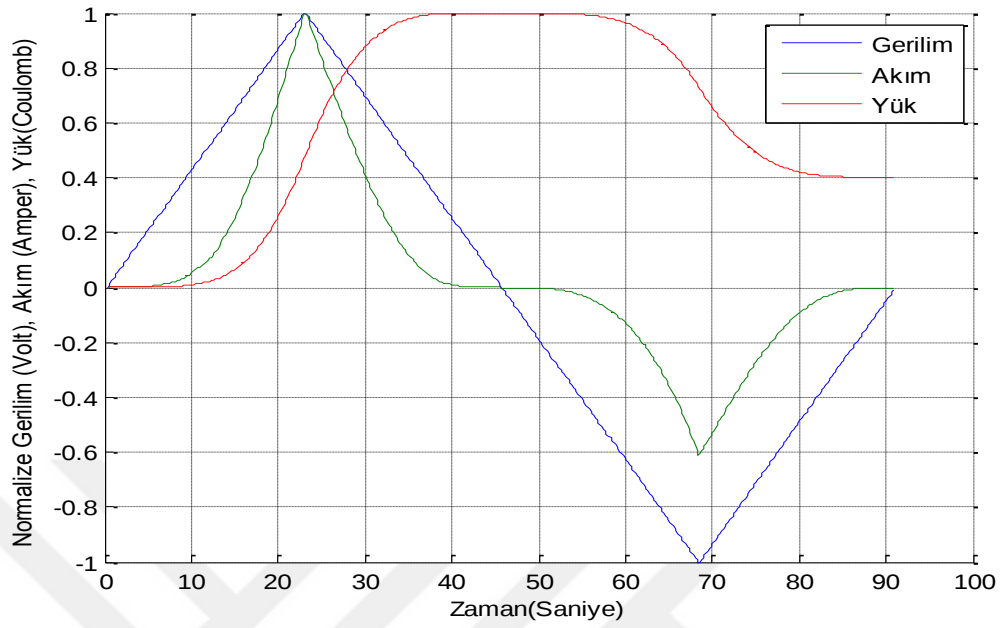
3c_R07_02	-1.5	1.5	0.02	0.000011	25
4a_R05_2e	-8	8	0.04	0.000055	5
4a_R05_2f	-10	10	0.05	0.000055	5
3c_R07_01	-5	5	0.02	0.00011	1
S100_3c	-2.25	5	0.02	0.00055	24

Çizelge 4.4. S100_2c proses kodlu numuneye uygulanan akım-gerilim değerleri (Güllülü 2014)

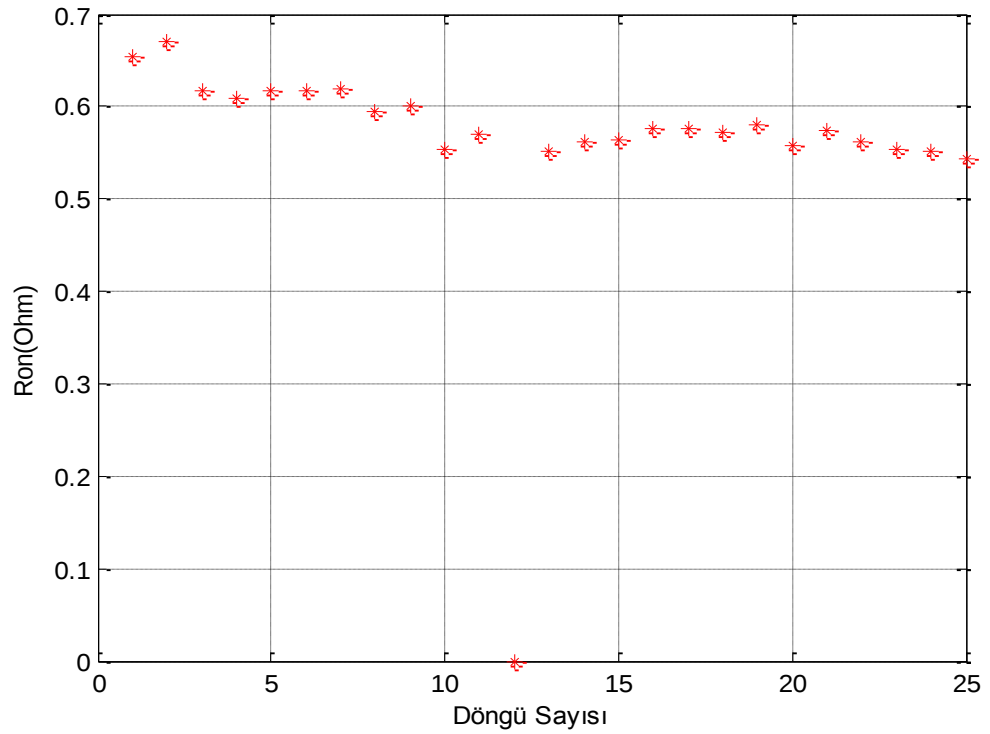
Proses Kodu	Vmin.	Vmax.	Gerilimdeki Artış	Akım Limiti	Döngü Sayısı
S100_2c	-1.75	1.75	0.01	0.0011	25



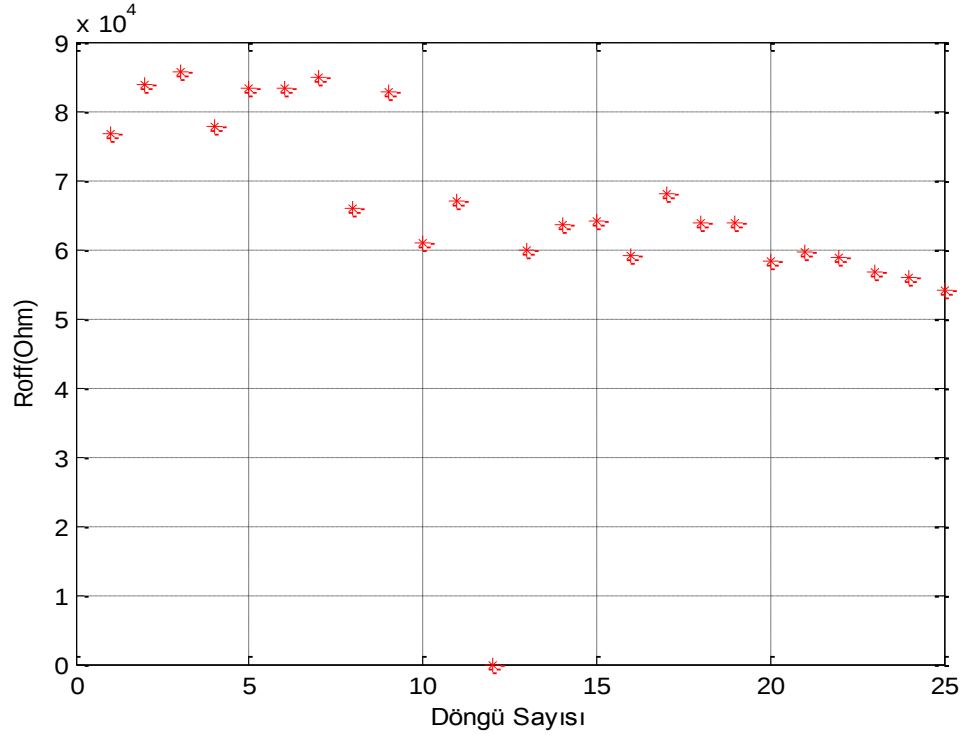
Şekil 4.1. 3a_08 proses kodlu numunenin akım-gerilim eğrisi



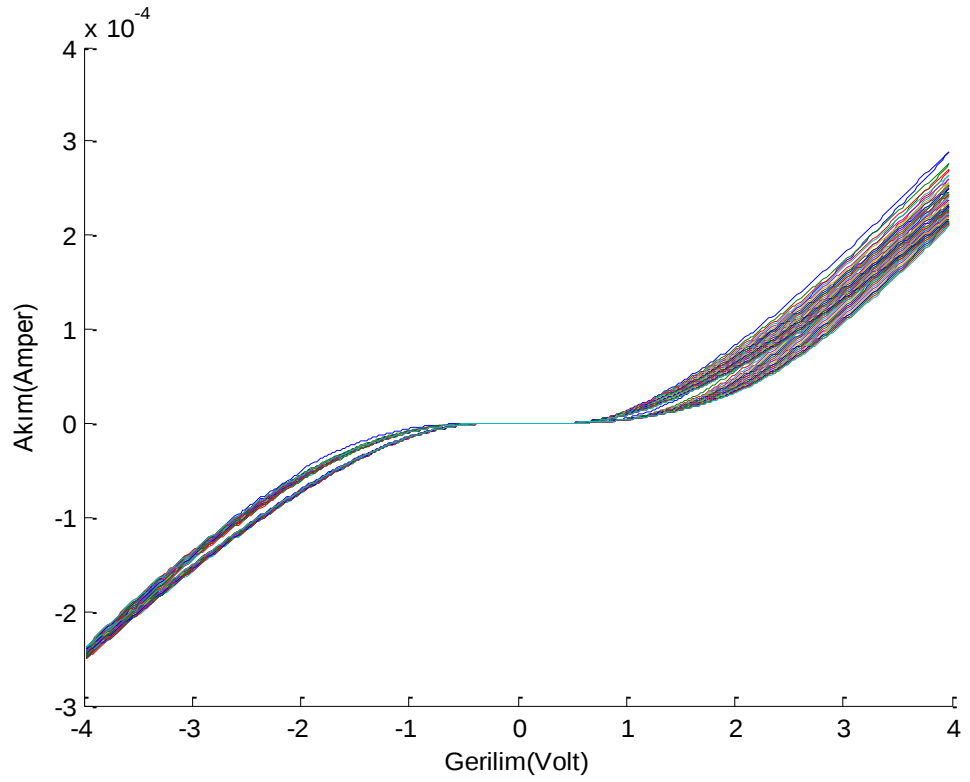
Şekil 4.2. 3a_08 proses kodlu numunenin normalize gerilim, akım ve yük eğrileri



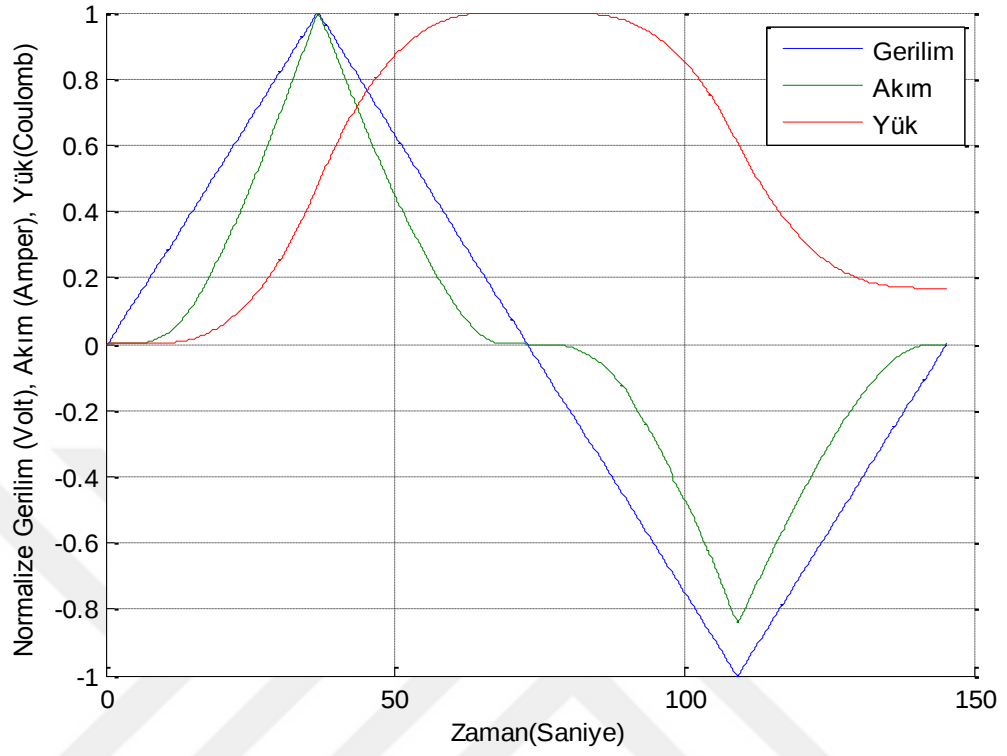
Şekil 4.3. 3a_08 proses kodlu numunenin döngülerinde R_{ON} değerleri



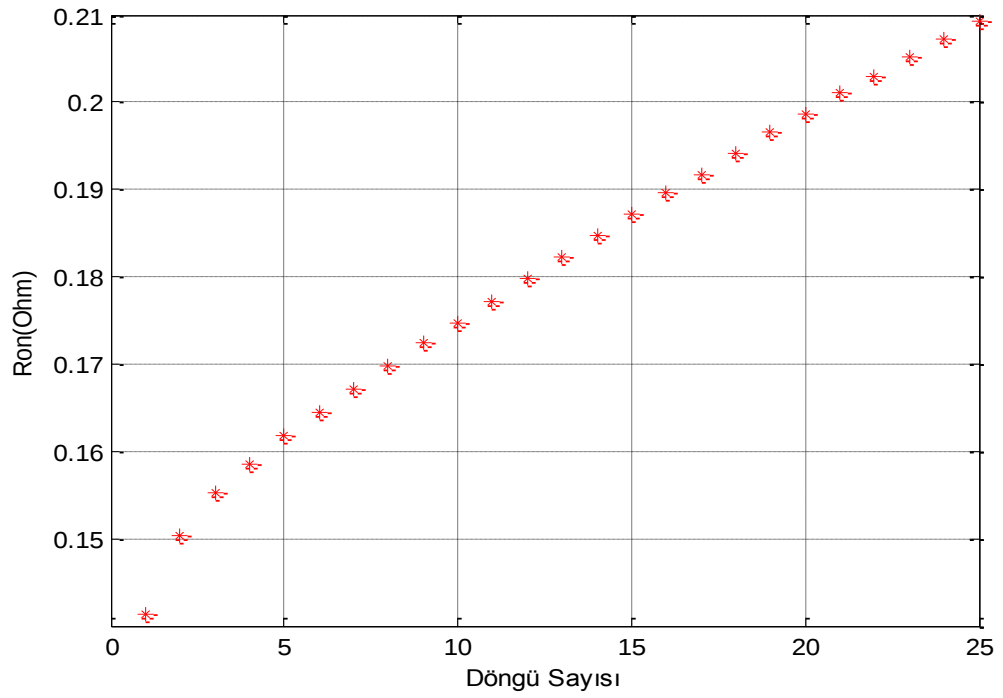
Şekil 4.4. 3a_08 proses kodlu numunenin döngülerinde R_{OFF} değerleri



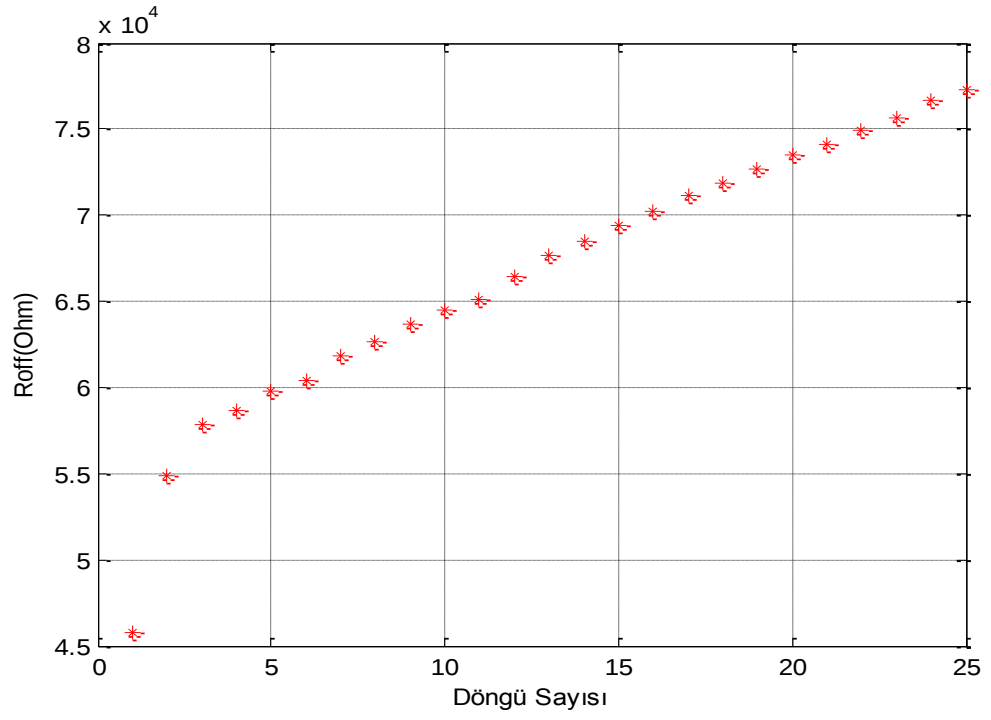
Şekil 4.5. 3a_8_01 proses kodlu numunenin akım-gerilim eğrisi



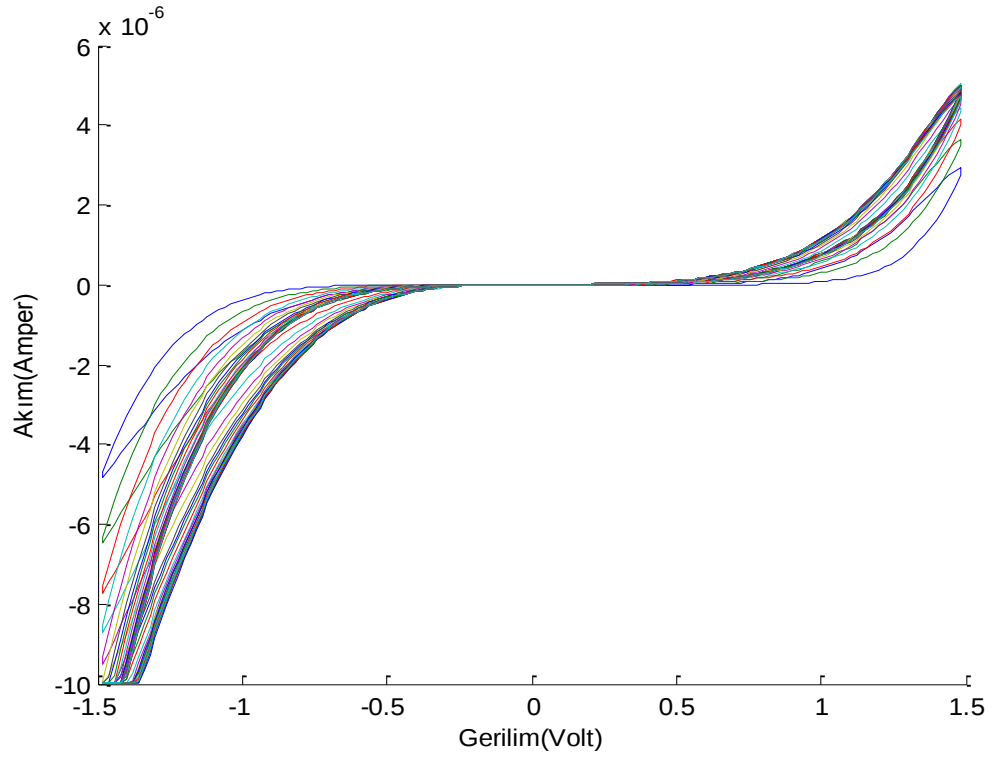
Şekil 4.6. 3a_8_01 proses kodlu numunenin normalize gerilim, akım ve yük eğrileri



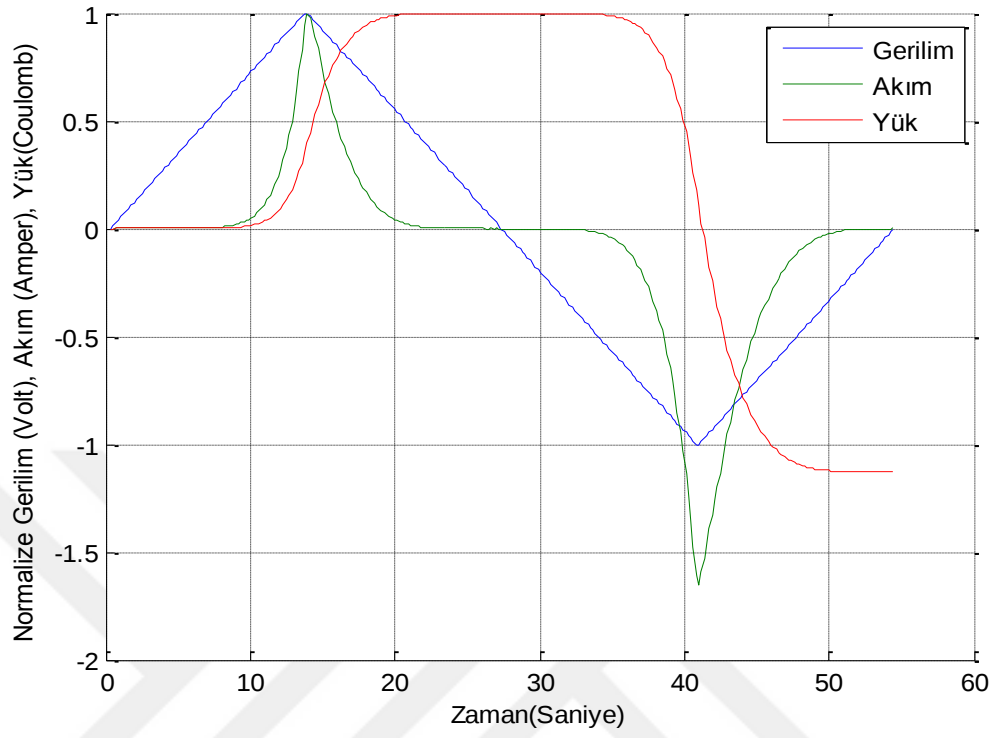
Şekil 4.7. 3a_8_01 proses kodlu numunenin döngülerinde R_{ON} değerleri



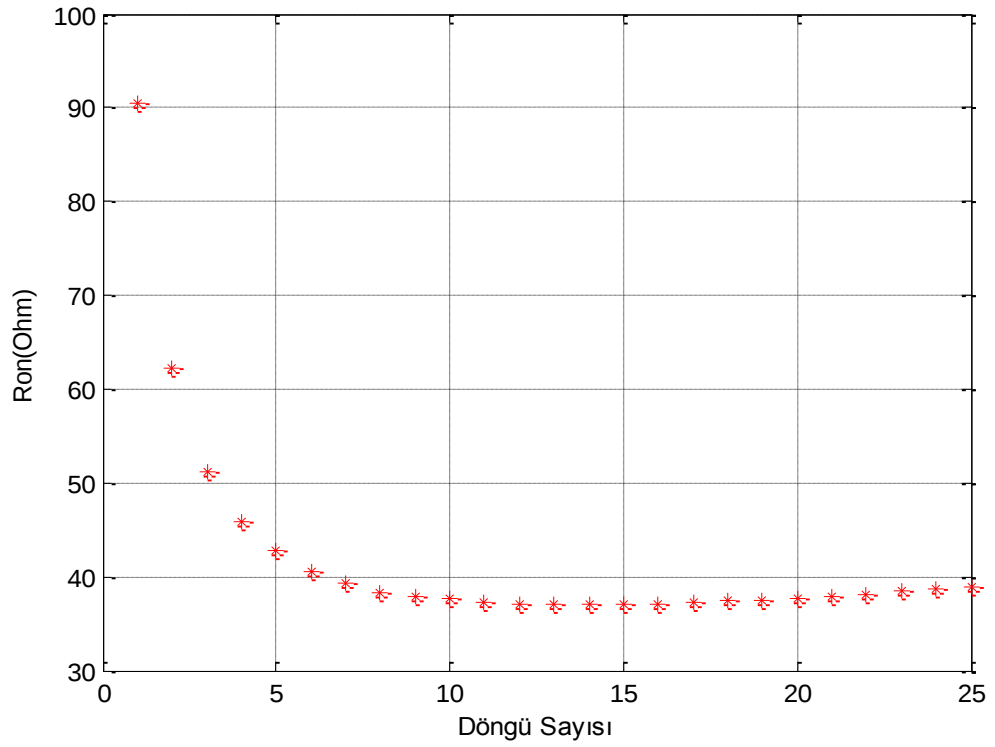
Şekil 4.8. 3a_8_01 proses kodlu numunenin döngülerinde R_{OFF} değerleri



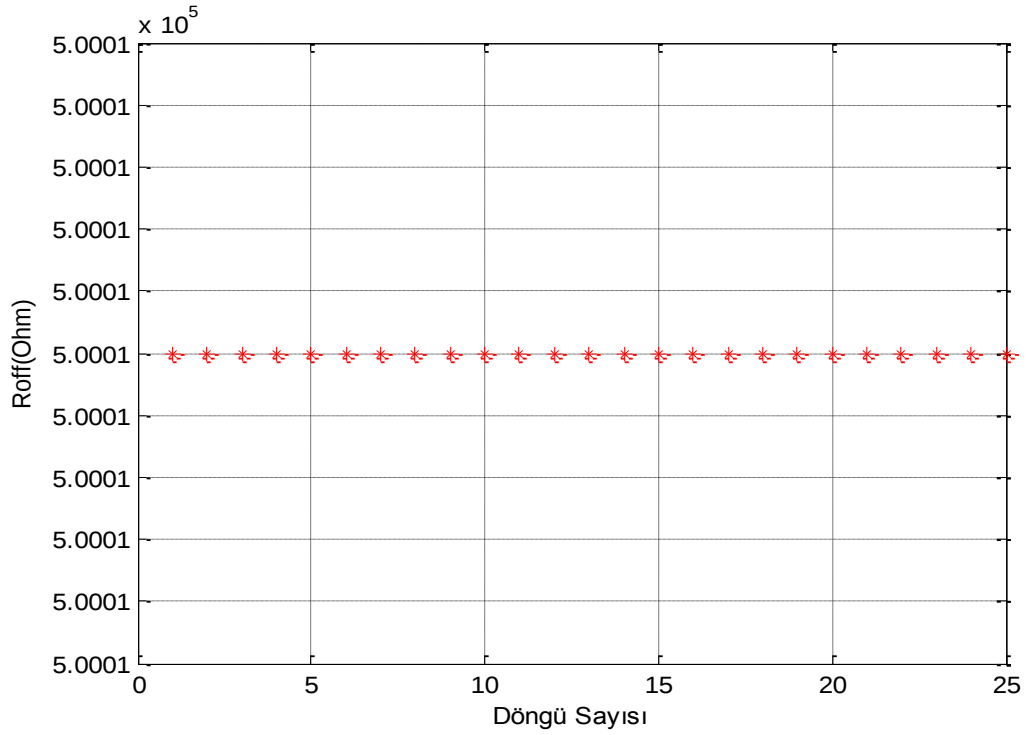
Şekil 4.9. 3c_R07_02 proses kodlu numunenin akım-gerilim eğrisi



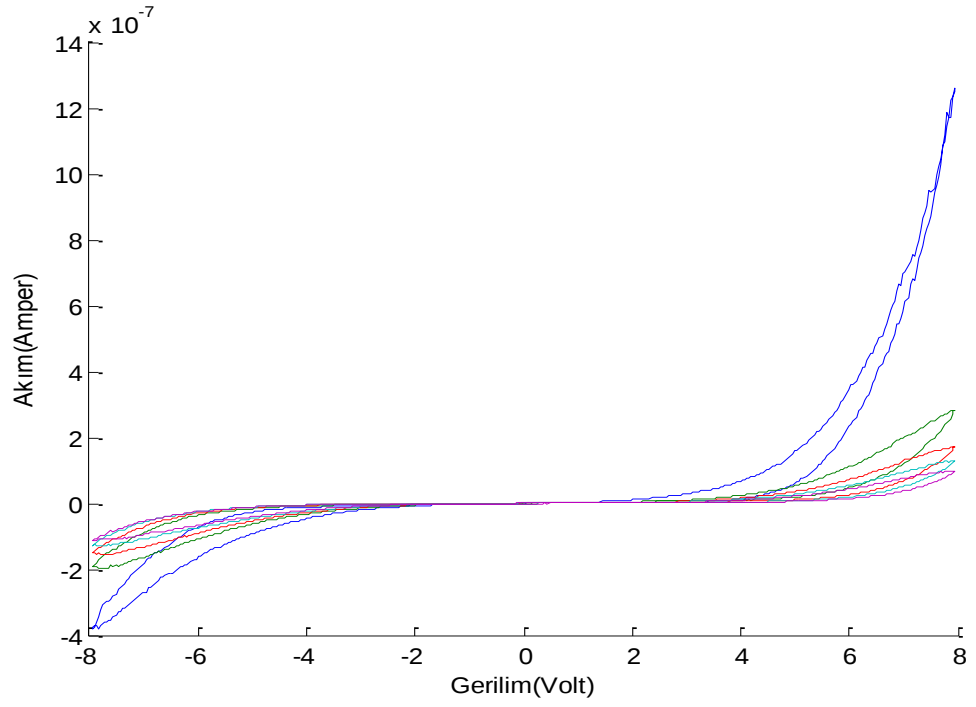
Şekil 4.10. 3c_R07_02 proses kodlu numunenin normalize gerilim, akım ve yük eğrileri



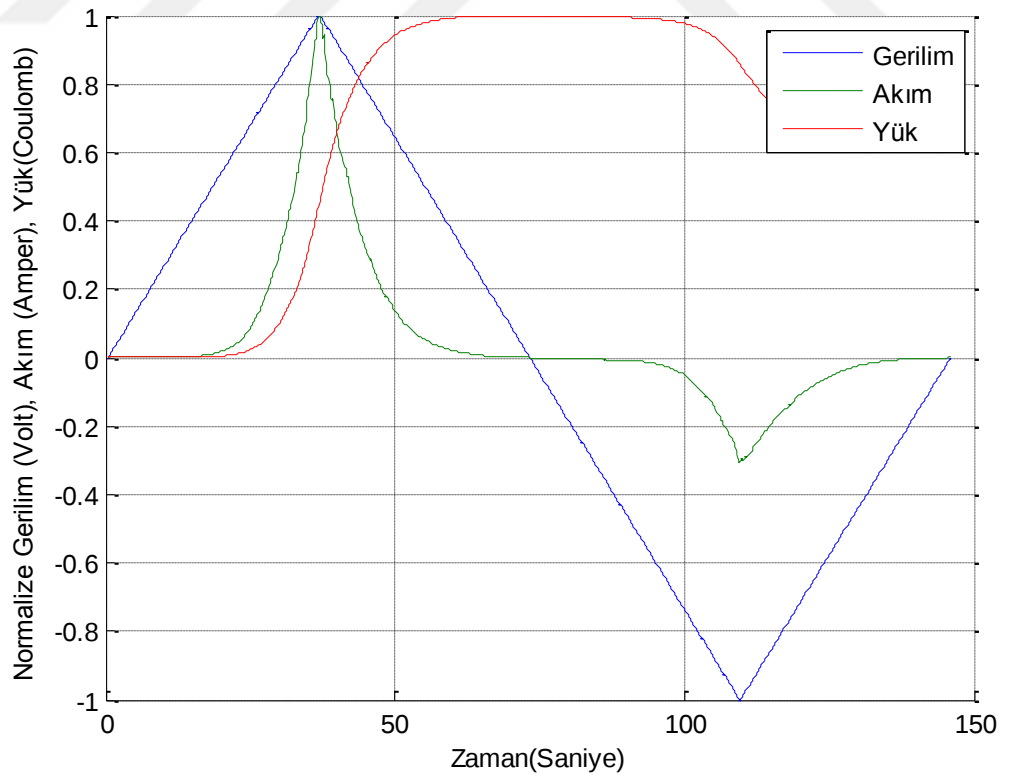
Şekil 4.11. 3c_R07_02 proses kodlu numunenin döngülerinde R_{ON} değerleri



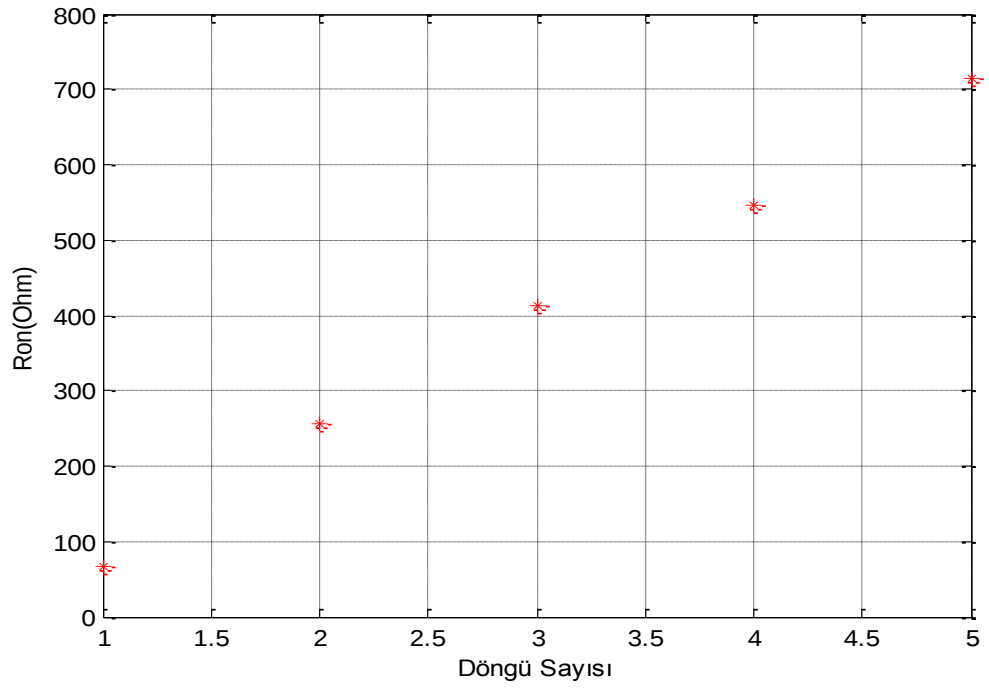
Şekil 4.12. 3c_R07_02 proses kodlu numunenin döngülerinde R_{OFF} değerleri



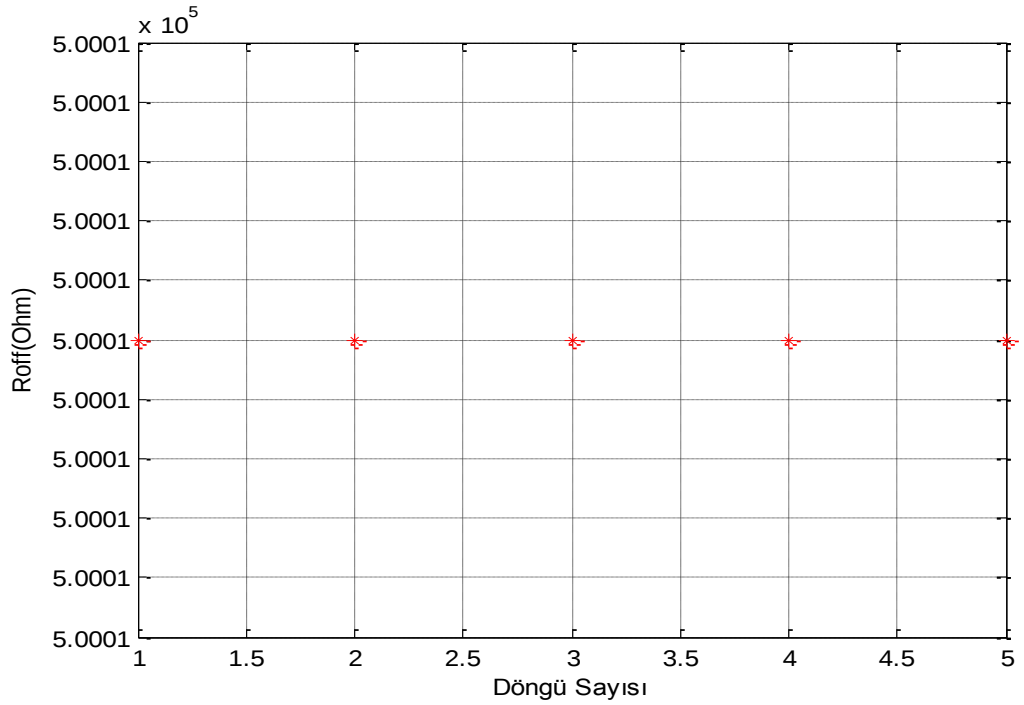
Şekil 4.13. 4a_R05_2e proses kodlu numunenin akım-gerilim eğrisi



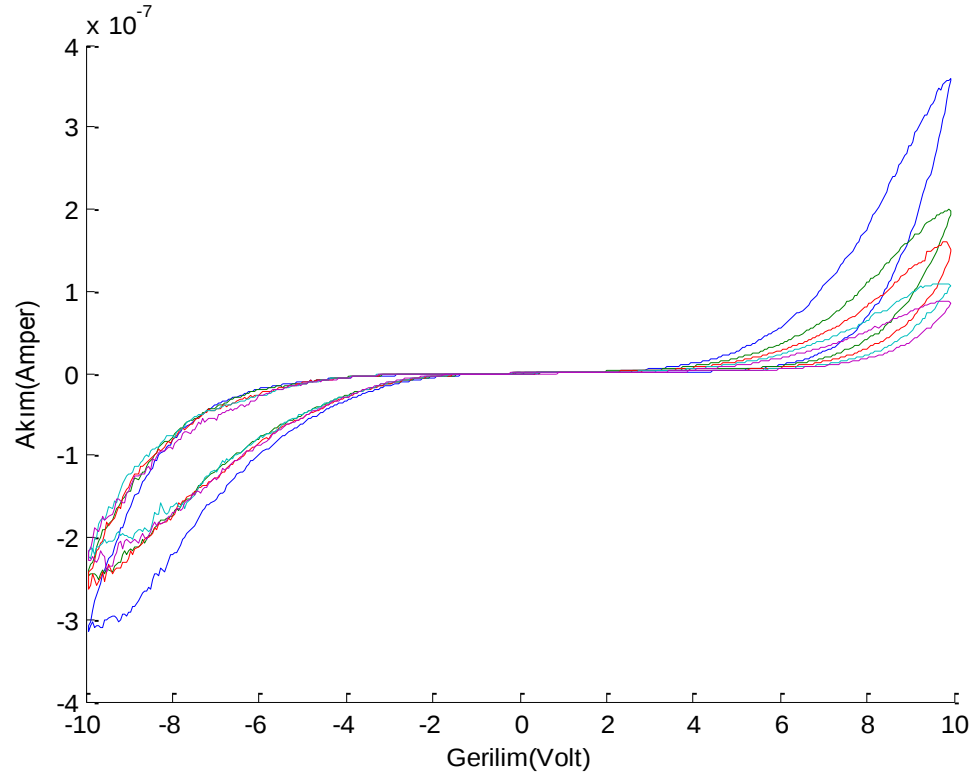
Şekil 4.14. 4a_R05_2e proses kodlu numunenin normalize gerilim, akım ve yük eğrileri



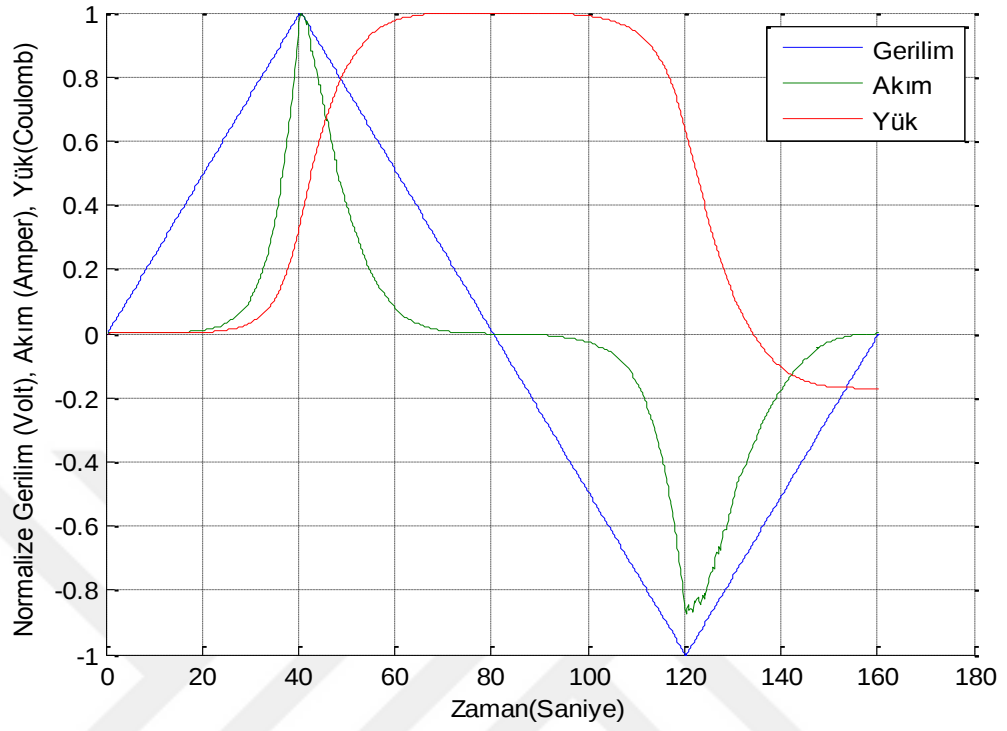
Şekil 4.15. 4a_R05_2e proses kodlu numunenin döngülerinde R_{ON} değerleri



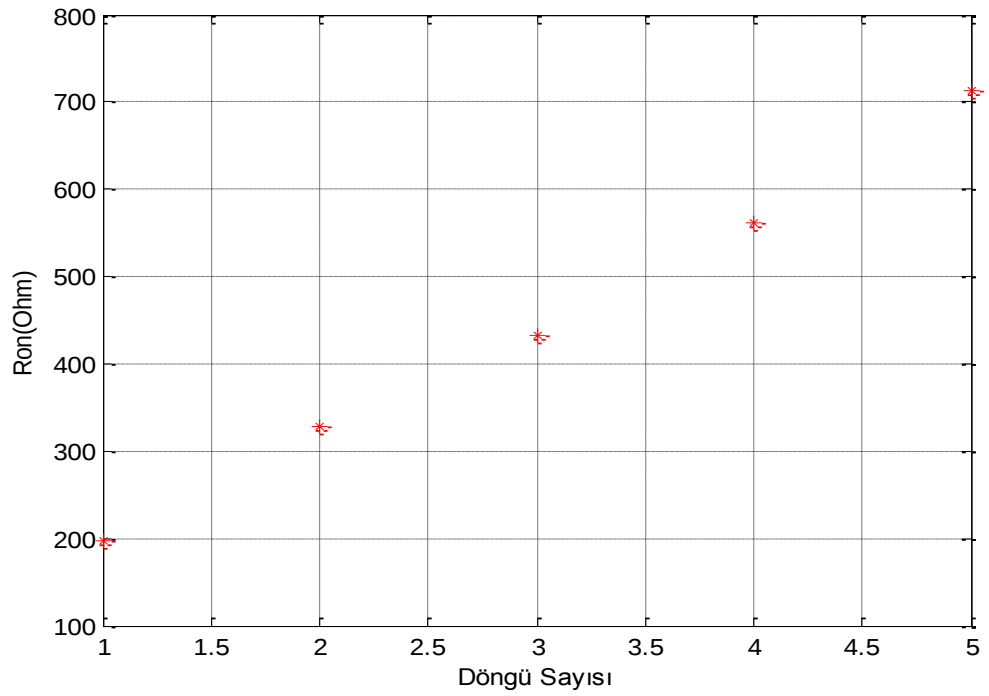
Şekil 4.16. 4a_R05_2e proses kodlu numunenin döngülerinde R_{OFF} değerleri



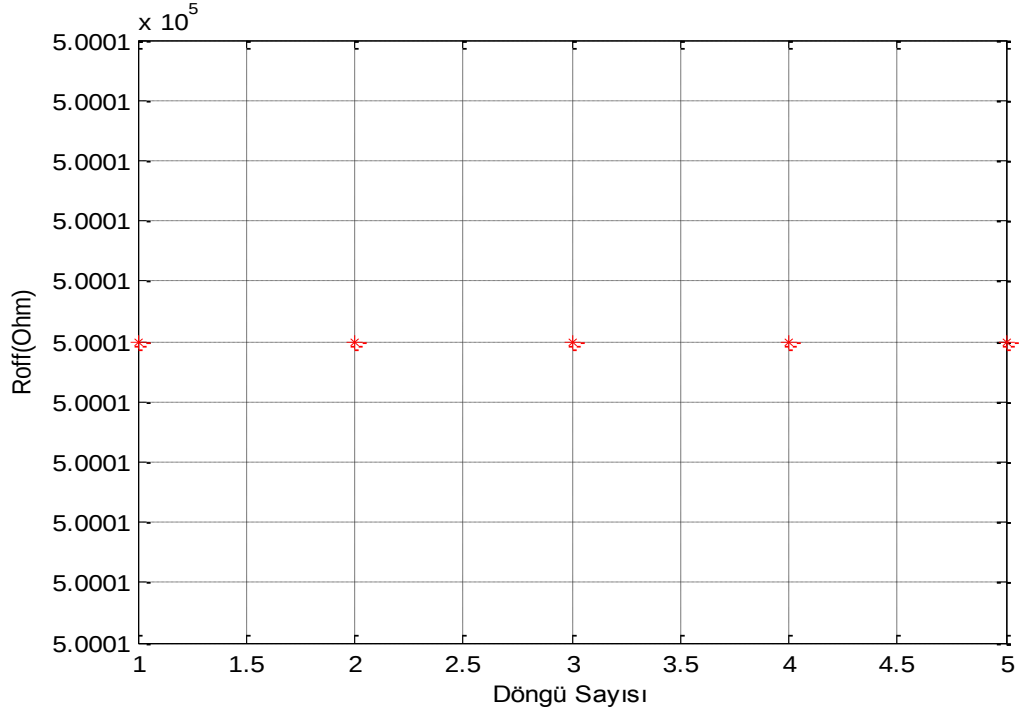
Şekil 4.17. 4a_R05_2f proses kodlu numunenin akım-gerilim eğrisi



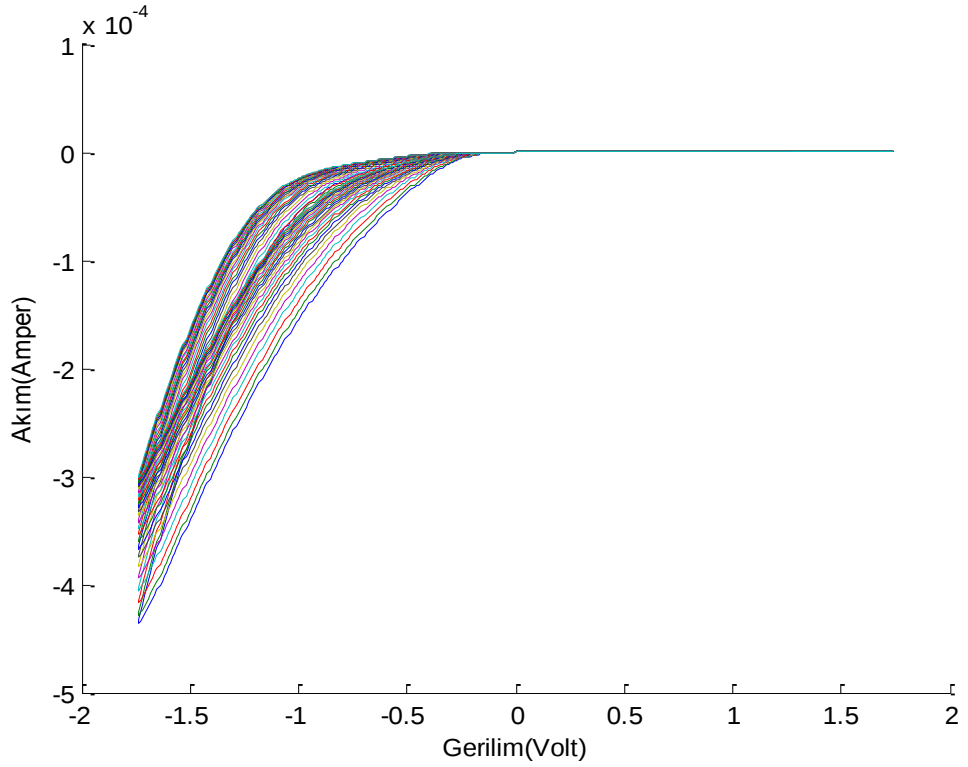
Şekil 4.18. 4a_R05_2f proses kodlu numunenin normalize gerilim, akım ve yük eğrileri



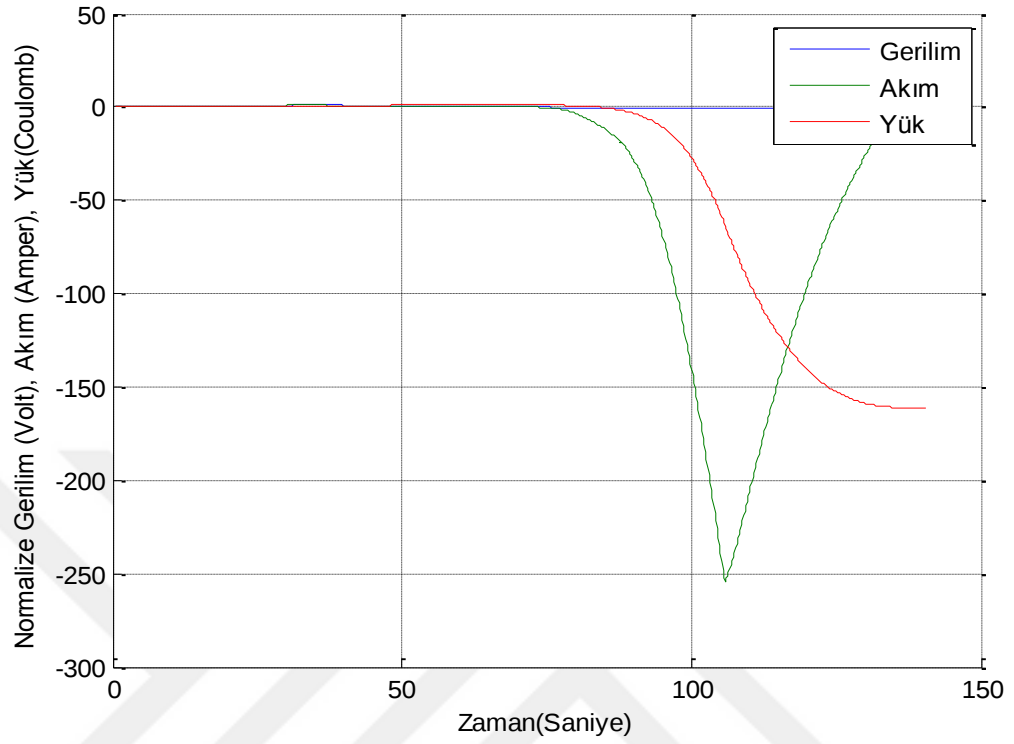
Şekil 4.19. 4a_R05_2f proses kodlu numunenin döngülerinde R_{ON} değerleri



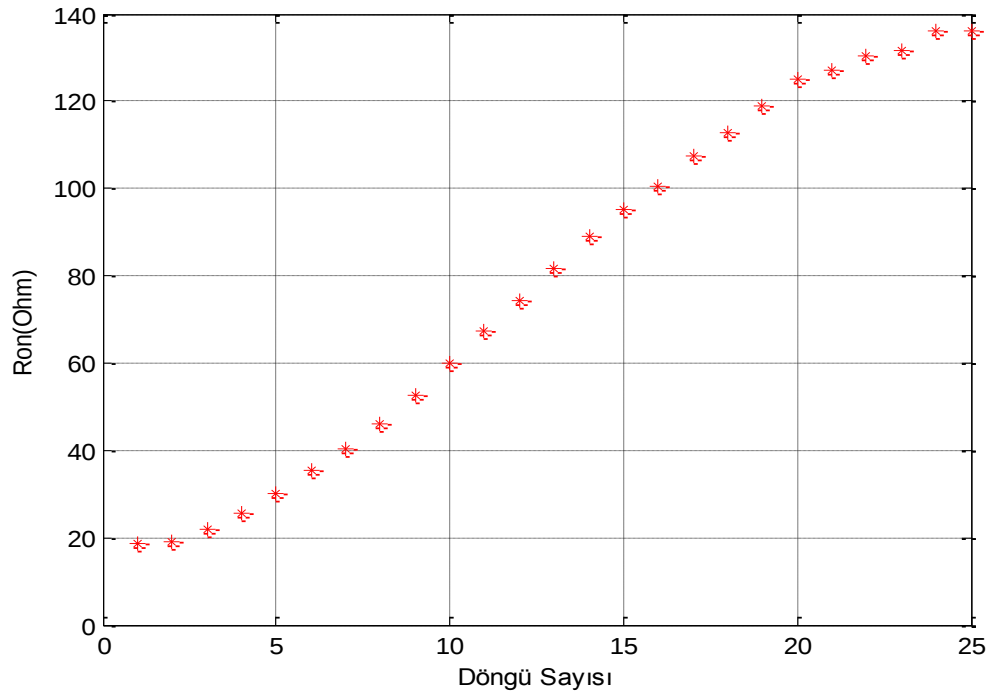
Şekil 4.20. 4a_R05_2f proses kodlu numunenin döngülerinde R_{OFF} değerleri



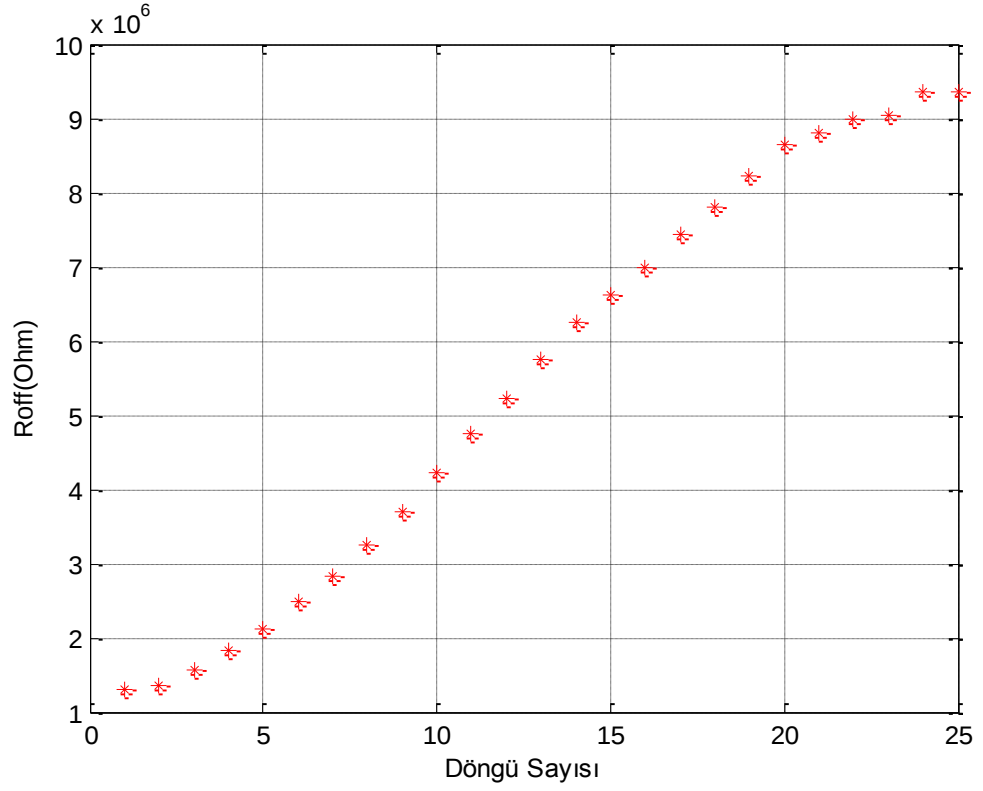
Şekil 4.21. S100_2c proses kodlu numunenin akım-gerilim eğrisi



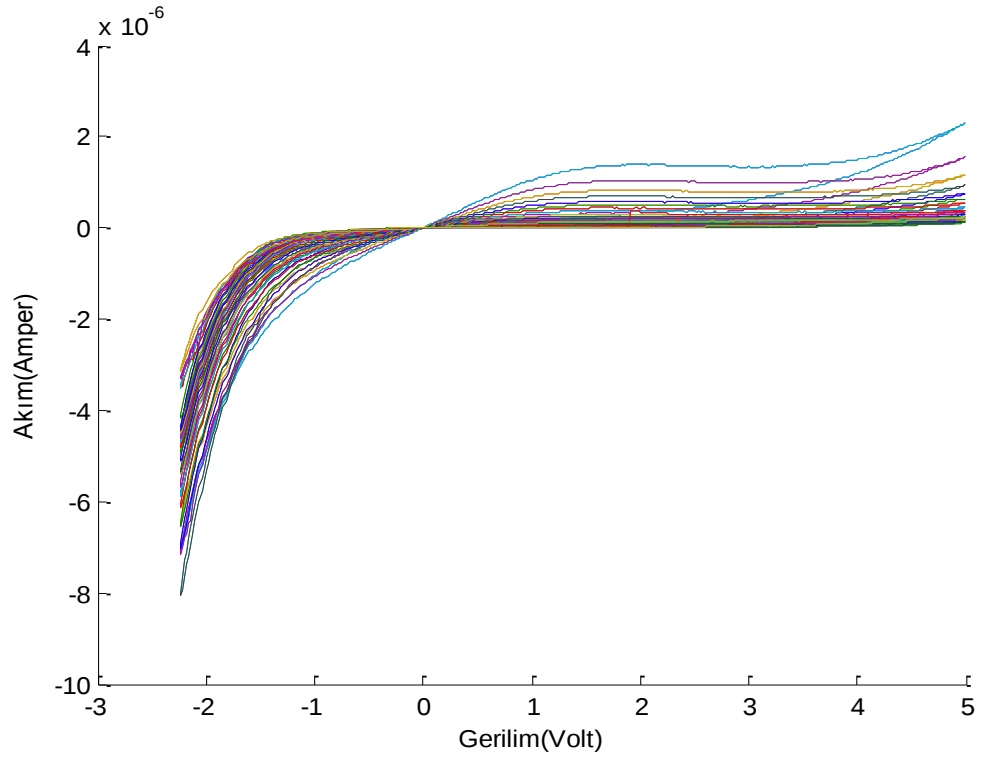
Şekil 4.22. S100_2c proses kodlu numunenin normalize gerilim, akım ve yük eğrileri



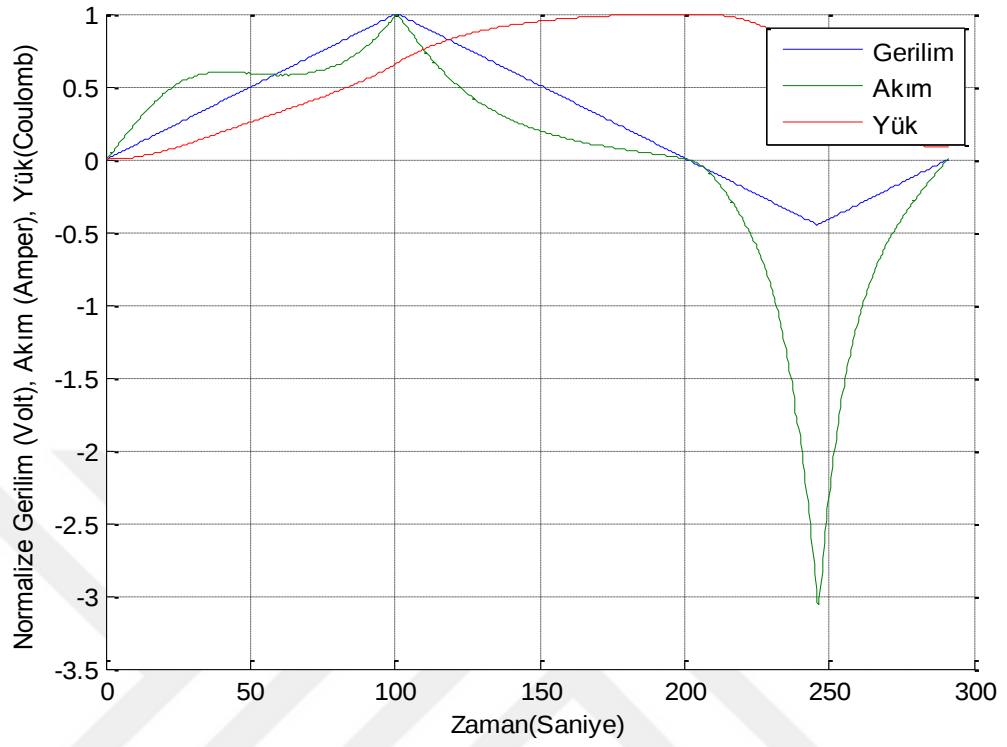
Şekil 4.23. S100_2c proses kodlu numunenin döngülerinde R_{ON} değerleri



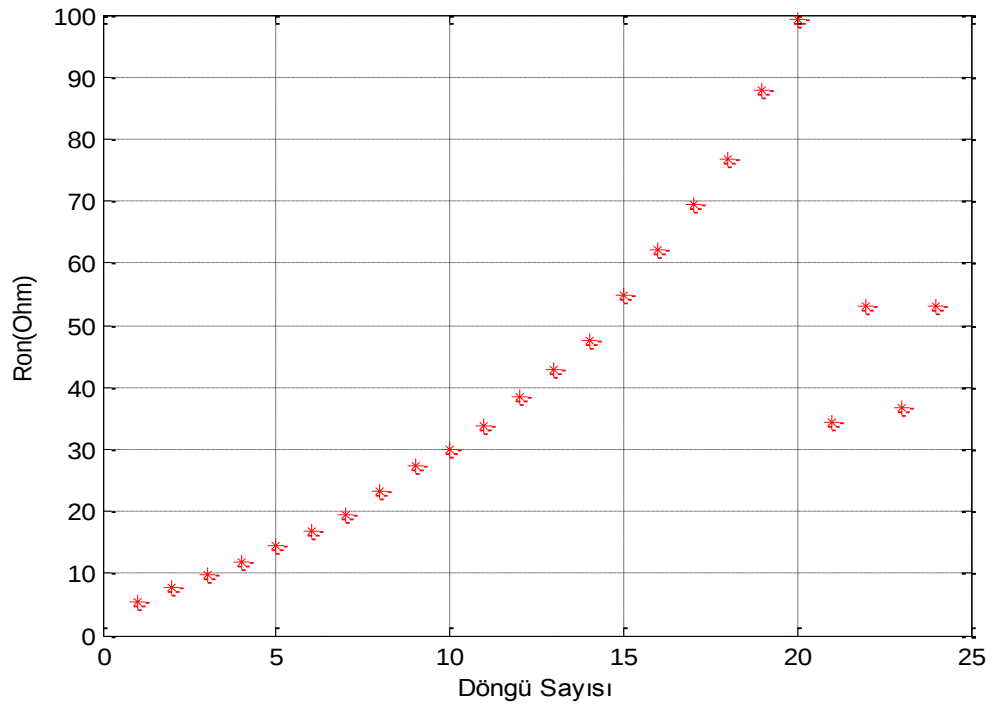
Şekil 4.24. S100_2c proses kodlu numunenin döngülerinde R_{OFF} değerleri



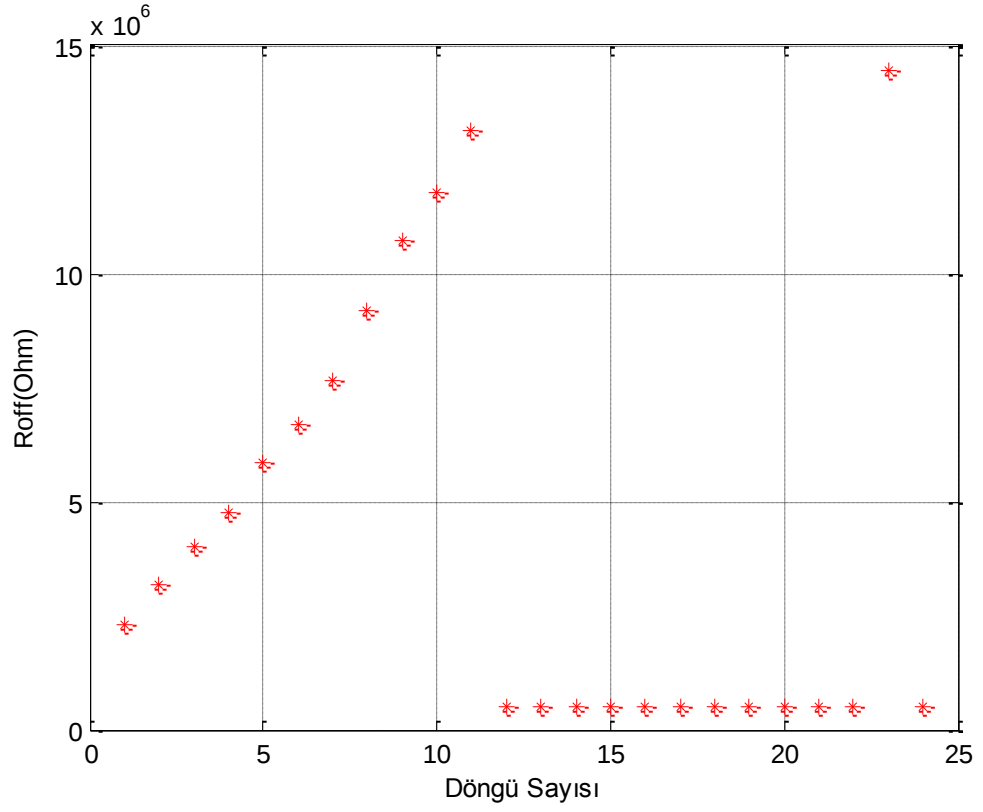
Şekil 4.25. S100_3c proses kodlu numunenin akım-gerilim eğrisi



Şekil 4.26. S100_3c proses kodlu numunenin normalize gerilim, akım ve yük eğrileri



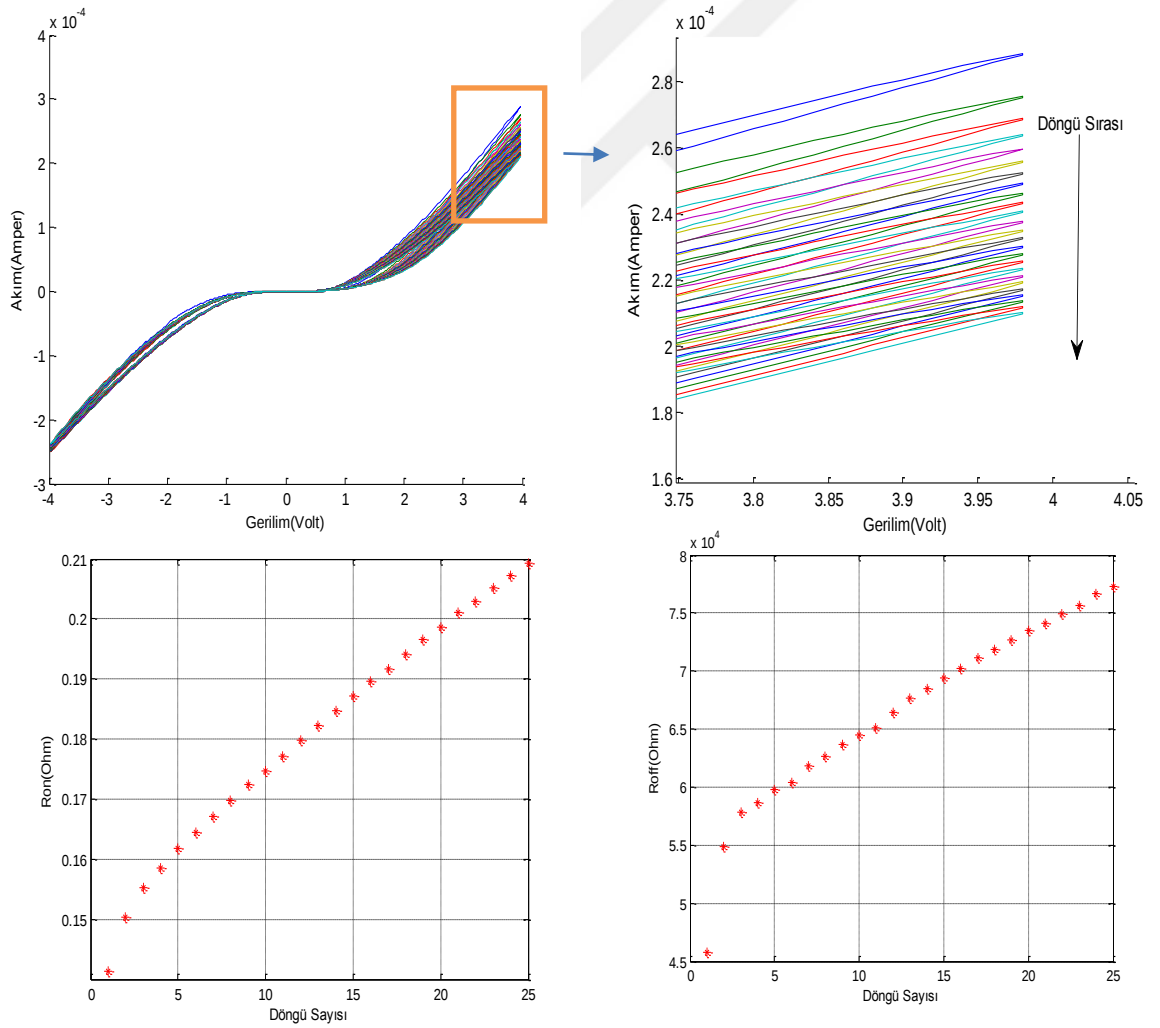
Şekil 4.27. S100_3c proses kodlu numunenin döngülerinde R_{ON} değerleri



Şekil 4.28. S100_3c proses kodlu numunenin döngülerinde R_{OFF} değerleri

4.2. Tartışma

Bu çalışmada proje grubunun önceden ürettiği 4 adet numunenin farklı üretim parametreleri üzerinden almış oldukları akım-gerilim ölçümleri kullanılmıştır. Bu numuneler 3a, 3c, 4a ve S100 numuneleri olup proses kodundaki farklılıklar numunelerin farklı parametrelerle üretilen tabakalarından kaynaklanmaktadır. Aslında aynı numune olan 3a'nın 3a_8 proses kodunda Ti tabaka büyütülmüş bölgesi üzerinden ölçüm alınmış, 3a_8_1 proses kodunda ise bu Ti tabaka üzerine büyütülmüş Pt tabaka üzerinden ölçüm alınmıştır. Diğer üç numune için de durum aynıdır.



Şekil 4.29. 3_a_08_01 proses kodlu numune

Akım-gerilim ölçümlerinden yararlanılarak 2.6.5 bölümünde anlatılan doğrusal olmayan hesaplama metodu (Yang *et al.* 2009) ile R_{ON} ve R_{OFF} değerleri MATLAB ortamında ve en küçük kareler yöntemini kullanan hazır MATLAB fonksiyonu yardımıyla bulunmuştur.

İncelenen ilk iki numune aslında aynı numunedir. İlkinde SiO_2 alttaş üzerine Ti hedeften 45 nm ince film büyütülmüş, diğerinde ise bu ince film üzerine 3 nm daha platin tabakası büyütülmüştür. Bu nedenle aslında tek numune olmalarına rağmen ölçümler ilk proses için 3a_08 proses koduyla, ikincisi ise 3a_08_01 olarak kaydedilmiştir. Ölçümlerde kullanılan nokta prob platin olduğu için 3a_08 prosesin ölçümünde doğrudan TiO_2 üzerine platin nokta kontak ile ölçüm alınmıştır. 3a_08_01 de ise platin tabakası üzerine dokunularak akım-gerilim ölçümleri yapılmıştır. Her bir döngüde farklı R_{on} ve R_{off} değerleri nedeniyle akım-gerilim ölçümlerinde aynı gerilime karşılık farklı akım değerleri okunmaktadır. Nokta kontak ölçümü yapılmış olan 3a_08 numunesi için her bir döngüdeki gerilim-akım ölçümlerinde birbirine yakın ancak rastgele değişen R_{ON} değerleri göze çarpmaktadır. Ancak 3a_08_01 proses kodlu numune için her bir döngüde R_{OFF} direnci devamlı artmaktadır. Bundan dolayı her döngüde aynı gerilim değerinde daha küçük akım gözükmemektedir. 3c numunesi dışında diğer numunelerde döngü sırası ile R_{ON} direncinin artışı benzerlik göstermektedir. Bununla birlikte Ti büyütmesi esnasında ortama oksijen akışı verilen numunelerin R_{OFF} dirençleri 100 ohm'lar civarındayken Oksijen verilmeyen numunelerin ise birkaç ohm ya da daha az olduğu hesaplanmıştır. Bu oksijen azlığı iletkenliğin artışı gösterir ki bu beklenen bir durumdur.

5. SONUÇ

Bu çalışmada Tübitak projesi kapsamında önceden üretilmiş metal oksit yapılı memristif davranış gösteren numunelerin akım-gerilim ölçümlerinden yararlanılarak literatürde önerilen matematiksel model için veri kaynağı olarak kullanılması ile anahtarlama dirençleri olan R_{ON} ve R_{OFF} değerlerinin hesaplanması üzerine odaklanmıştır. Buradan elde edilen değerler ile numunelerin büyütülmesinde kullanılan parametrelerin ilişkilendirilmesine çalışılmıştır.

Oksijence zengin yapıların R_{ON} değerlerinin daha yüksek olduğu hesaplanmıştır. Bu durum beklenen bir durumdur. Ayrıca akım-gerilim ölçümlerinde gerilim dögüsü belli sınırlarda tekrarlandığında çoğunlukla R_{ON} direncinin dögü sayısının arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum her bir dögüde yapı içinde artık yüklerin olması ihtimali düşündürmüştür

Akım-gerilim ölçümlerinde doğrusal olmayan davranış gözlemlenmesine rağmen bu yapıların diyot karakteristiği gösterip göstermediğinin anlaşılması için daha detaylı çalışma gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Akinaga, A., Shima, H., 2010. Resistive Random Access Memrot(ReRAM): A Metal Oxide Cell. [www.itrs.net/Nanothermal Fuse.Antifuse.pdf](http://www.itrs.net/Nanothermal_Fuse.Antifuse.pdf) (08.01.2015).
- Anonim, 2015a. [http:// www.iue.tuwien.ac.at/phd/makarov/dissertation2x.png](http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/makarov/dissertation2x.png) (20.09.2015)
- Anonim, 2015b. [http:// www.m-system.co.jp/newsletter/182/images/182applifig1.gif](http://www.m-system.co.jp/newsletter/182/images/182applifig1.gif) (17.06.2015)
- Anonim, 2015c. <http://alanassad.com/s/Elements/Inorganic/TiO2Titanium%20Dioxide.pdf> (12.04.2015)
- Anonim, 2015d. https://www.researchgate.net/figure/260244419_fig1_Fig-1-Phase-diagram-of-the-titanium-oxygen-system-9 (20.06.2015)
- Bally, A., 1999. Electronic Properties of Nao-Cristalline Titanium Dioxide Thin Film. Ph. D. Thesis, The Department of Pyhsical Lausanne Federal Polytechnic, Lausanne.
- Biolek, D., Biolek, Z., Biolkova, V. And Kolka, Z., 2014. Modeling of TiO₂ memristor: from analytic to numerical analysis. Semiconductor Science and Technology, 29(12), 125008.
- Chakravety, M. And Kittur, H.M., 2012. Evidence of Hysteresis from First Principle DFT simulations od I_V curves in Pt/TiO_{2-x}-TiO₂/Pt Memristive Systems, <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6188749>, (12.11.2014).
- Chua, L.O. and Kang, S.M., 1976. Memristive Devisec and Systems. IEEE, 64(2), 209-223.
- Chua, L.O., 1971. Memristor-The Missing Circuit Element. IEEE Transactions On Circuit Theory, 18(5), 507-519.
- Çakmak, H.M., 2011. Metal-Oksit İnce Film Yapıların Üretilmesi ve Elektriksel Karakteristiklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Çetinkaya, S., Bayansal, F., Çakmak, H.M., Çetinkara, H. A., 2011. ZnO İnce Filmlerin Üretilmesi, Kristalografik ve Morfolojik İncelenmesi. 28. Uluslar arası Fizik Kongresi, Bodrum.
- Do, Y.H., Kwak, J.S., Bae, Y.C., Jung, K., Im, H. And Hong, J.P., 2009. Hysteretic bipolar resistive switching characteristics in TiO₂/TiO_{2-x} multilayer homojonctions. Applied Physics Letters, 95(093507), 1-3.
- Dong, R., Lee, D.S., Pyun, M.B., Choi, H.J., Jo, M.S., Seong, D.J., Chang, M., Heo, S.H., Lee, J.M., Park, H.K., Hwang, H., 2008. Mechanism of current hysteresis in reduced rutile TiO₂ crystals for resistive memory. Applied Physics A, 93(2008), 409-414.
- Eshraghian, K., Kavehei, O., Cho, K.R., Chappel, J.M., Iqbal, A., Sarawi, A., 2012. Memristive Device Fundamental and Modeling: Applications to Ciruits and Systems Simulation. IEEE, 100(6), 1991-2007.
- Fernández-Garcia, G. and A. Rodriguez, J., 2007. Metal Oxide Nanoparticles. Nanomaterials: Inorganic and Bioinorganic Perspectives, 79479.
- Iniewski, K., 2011. Nonvolatile Memory Devices: Resistive Random Access Memory. Nano Semiconductor: Devices and Technology, CRC Press,U.S.A., 247-275.
- Hayes, B., 2011. The Memristor. Computing Science. 99, 106-110.

- Güllülü, S., 2014. Titanyum Dioksit Nano Filimlerin Memristiv Özelliği ve Fabrikasyon Parametreleri ile İlişkisi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Golayoglu, A., 2001. En Küçük Kareler Yöntemi. www.baskent.edu.tr (12.02.2015).
- Jeong, D.S., 2008, Resistive switching in Pt/TiO₂/Pt. Ms Thesis, The faculty of Georesources and Metarials of the RWTH, Ph. D. Thesis, Aachen University, Aachen, Germany.
- Jo, S.H., 2010. Nanoscale Memristive Devices For Memory and Logic Applications. Ph. D. Thesis, Michigan Üniversitesi, U.S.A. Michigan.
- Jun, L.H., Wei, L.Z., Qi, Y.H., Lin, S.Z., Shan, N.H., 2014. Memristance controlling approach based on modification of linear $M-q$ curve. Chine Pyhsical Society, <http://cpb.iphy.ac.cn> (13.11.2014).
- Kavehei, O., Iqbal, A., Kim, Y.S., Eshraghian, K., Al-Sarawi, A.F. and Abbott, D., 2014. The fourth element: characteristics, modeling and electromagnetic theory of the memristor. Proceedings of The Royal Society, <http://rspa.royalsocietypublishing.org> (13.12.2014).
- Keleşoğlu, E., 2011. Sert Kaplamalar Üretim Teknikleri ve Özellikleri. Yıldız Teknik Üniversitesi, www.yildiz.edu.tr/~ergunk/SertKaplamalarErgunKelesoglu.pdf (26.08.2014)
- Kobayashi, M., Kato, H. And Kakihana, M., 2013. Synthesis of Titanium Dioxide Nanocrystals with Controlled Crystal- and Micro-structures from Titanium Complexes. Nanomaterials and Naotechnology, 3(23), 1-10.
- Koksal, M. Ve Hamamci, E.E., 2010. Analysis of Four Element Chua Circuit Containing New Passive Component”Memristor”. 3 rd conference on Nonlinera Science and Complexity, Ankara.
- Long, B., Ordosgoitti, J., Jha, R. And Melkonian, C., 2011. Understanding the Charge Transport Mechanism in VRS and BRS State of Transition Metal Oxide Nanoelectrnics Memristor Devices. IEEE Transactions on electron Devices, 58(11), 3912-3919.
- Park, S.G., Köpe, B.M. and Nishi, Y. 2011. Impact of Oxygen Vacancy Ordering on yhe Formation of a Conductive Filament in TiO₂ for Resistive Switching Memory. IEEE, 32(2), 197-199.
- Park, S.G., 2011. Resistance Switching Mechanism in TiO₂. Ph. D. Thesis, The Department of Material Science and Engineering and the Committee on Graduate Studies of Standford University, California.
- Polat, H., 2013. Titanyum Dioksitin Optik Özelliklerinin Fabrikasyon Parametrelerine Bağımlılığı. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Pickett, M.D., Strukov, D.B., Borghetti, L.L., Yang, J.J., Snider, G.S., Stewart, Duncan.R. and Willişams, R.S., 2009. Switching Dynamics in titanium dioxide memristive devices. Journal of Applied Physics, 106(7), 074508-1-5.
- Sah, M. P., Yang, C., Kim, L. And Chua, L., 2012. A Voltage Mode Memristor Bridge Synaptic Circuit with Memristor Emulators. Sensors, 12(3), 3587-3604.
- Sönmezoğlu, S., Koç, M., Akın, S., 2012. İnce Film Üretim Teknikleri. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 28(5), 389-401.

- Singh, S.C., Singh, D.P., Singh, J., Dubey, P.K., Tiwari, R.S. and Srivastava, O.N., 2014. Metal Oxide Nanostructures; Synthesis, Characterizations and Applications. INDIA, www.researchgate.net, (06.07.2014).
- Strachan, J.P., Strukov, D.B., Borghetti, J., Yang, J.J., Riberio, G.M. and Williams R.S., 2011. The switching location of a bipolar memristor: chemical, thermal and structural mapping. *Nanotechnology*, 22(254015), 1-6.
- Strachan, J.P., Pickett, M.D., Yang, J.J., Aloni, S., Kilcoyne, A.L.D., Riberio, G.M. and Williams, R.S., 2010. Direct Identification of the Conducting Channels in a Functioning Memristive Devices. *Advanced Materials*, 22, 3573-3577.
- Strukov, D.B., Snider, G.S., Stewart, D.R., Williams, R.S., 2008. The missing memristor found. *Nature*, 453(06932), 80-83.
- Strukov, D.B. and Hohlstedt, H., 2012. Resistive switching Phenomena in thin films: Material, devices, and applications. *Material Research Society*, 37, 108-114.
- Strunk, J., Vining, W.C., Bell, A.T., 2010. A Study of Oxygen Vacancy Vacancy and Annihilation in Submonolayer Coverages of TiO_2 Dispersed on MCM-48. *Journal of Physical Chemistry C*, 114, 16937-16945.
- Şahin, D., 2010. Au- TiO_2 Katalizörlüğünde Etanolde Forokatalizle Hidrojen Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ventura, M.D., Pershin, Y.V., Chua, L.O., 2009. Circuit elements with memory: *memristors*, *memcapacitors* and *meminductors*. *IEEE*, 97(10), 1717-1724.
- Yiğit, T., Metal Oksit Nano Parçacıkların 3. Dereceden Doğrusal Olmayan Optik Özellikleri. <http://omag.ankara.edu.tr/Metal.pdf> (25.08.2014).
- Yang, J.J., Choi, B.J., Zhang, M.X., Torrezan, A.C., Strachan, J.P., Williams, R.S., 2013. Memristive Devices for Computing: Mechanisms, Applications and Challenges. USLI Process Integration 8 at the 224th Electrochemical Society Meeting, San Francisco.
- Yang, J.J., Pickett, M.D., Li, X., Ohlberg, D.A.A., Stewart, D.R., and Williams, R.R., 2008. Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices. *Nature*, 3, 429-433.
- Yang, J.J., Miao, F., Pickett, M.D., Lau, C.N. and Williams, R.S., 2009. The mechanism of electroforming of metal oxide memristive switches. *Nanotechnology*, http://iopscience.iop.org/0957-4484/20/21/215201/pdf/0957-4484_20_21_215201.pdf (17.10.2014).
- Waser, R., Aono, M., 2007. Nanoionics-Based Resistive Switching Memories, *Nature Materials*, 6(11), 833-840.
- Williams, R.S., 2008. How We Found The Missing Memristor. *IEEE Spectrum*, 12.08, 1-14.
- Widrow, B., Pierce, W.H., Angell, J.B., 1971. Birth, Life, and Death in Microelectronic System, www.wisl.stanford.edu/~widrow/papers/j1961birthlife.pdf (05.02.2015).
- Zidan, M., 2011. Numerical Model of Memristor. www.mathworks.com (08.09.2014)
- Xiao-Bo, T. And Hui, X., 2013. The design and simulations of a titanium oxide memristor-based programmable analog filter in a simulation program with integrated circuit emphasis. *Chinese Physics B*, 22 (8), 088501.

ÖZGEÇMİŞ

Erkan CENGİZ 1987 yılında Erzurum’da doğdu. İlkokulu Ankara-Keçiören Satuk Buğra İlkokulu’nda okudu. Orta öğrenimini Ankara-Altındağ İskitler Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi Elektronik Bölümü’nde, 2003 yılında tamamladı. 2005 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik Öğretmenliği Bölümü’nde lisans eğitimine başladı ve 2010 yılında lisans eğitimini tamamladı. 2012 yılında Şırnak Üniversitesi Şırnak Meslek Yüksekokulu’nda Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı ve aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı Nanoelektronik Bilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. Halen, Şırnak Üniversitesi Şırnak Meslek Yüksekokulu Elektrik Programı’nda Öğretim Görevlisi olarak görevine devam etmektedir.