

**TİTANYUM DİOKSİT NANO FİLMLERİN
MEMRİSTİV ÖZELLİĞİ VE FABRİKASYON
PARAMETRELERİ İLE İLİŞKİSİ**

Süheyla GÜLLÜLÜ

**Yüksek Lisans Tezi
Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı
Nanomalzeme Bilim Dalı
Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU**

2014

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TİTANYUM DİOKSİT NANO FİLMLEİN MEMRİSTİV ÖZELLİĞİ
VE FABRİKASYON PARAMETRELERİYLE İLİŞKİSİ**

Süheyla GÜLLÜLÜ

**NANOBİLİM ve NANOMÜHENDİSLİK ANABİLİM DALI
Nanomalzeme Bilim Dalı**

**ERZURUM
2014**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**TİTANYUM DİOKSİT NANO FİLMLERİN MEMRİSTİV ÖZELLİĞİ VE FABRİKASYON
PARAMETRELERİYLE İLİŞKİSİ**

Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU danışmanlığında, Süheyla GÜLLÜLÜ tarafından hazırlanan bu çalışma 22/08/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı Nanomalzeme Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

İmza :

Üye : Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU

İmza :

Üye : Prof. Dr. Bahattin ABAY

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 28 / 08 / 2014 . tarih ve 34 / 1086 . nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Tübitak 1001 ve BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir. Proje No:111T217 ve Proje No:2011/127

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

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TİTANYUM DİOKSİT NANO FİLMLERİN MEMRİSTİV ÖZELLİĞİ VE FABRİKASYON PARAMETRELERİ İLE İLİŞKİSİ

Süheyla GÜLLÜLÜ

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı
Nanomalzeme Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU

Bu çalışmada radyo frekans magnetron saçtırma ve termal buharlaştırma yöntemiyle $Al/TiO_2/p^{++}Si$ yapısı oluşturuldu ve memristiv özelliği araştırıldı. İlk kısımda $400^{\circ}C$ 'de tavlanan numunenin memristiv özelliği ve tarama hızının memristiv davranışına olan etkisi incelendi. İkinci kısımda ise farklı altlık sıcaklıklarında büyütülen titanyum dioksit nanofilmlerin memristiv özellikleri I-V ölçümleri ile incelendi. Araştırmanın sonunda elde edilen veriler yardımıyla +Q ve -Q yükleri hesaplanarak analiz yapıldı.

2014, 75 sayfa

Anahtar Kelimeler: Memristör, TiO_2 , Saçtırma, Litografi, 3D Litografi

ABSTRACT

Master Thesis

MEMRISTIVE BEHAVIOR of TITANIUM DIOXIDE NANO FILMS and RELATION to FABRICATION PARAMETERS

Süheyla GÜLLÜLÜ

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

Supervisor: Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU

In this study we investigated memristive behaviour of $Al/TiO_2/p^{++}Si$ which is deposited by using radio frequency magnetron sputtering and thermal evaporation. In the first part we investigated the memristor annealed at $400^{\circ}C$. In the second section we investigate the memristive behaviour of titanium dioxide nanofilms using I-V measurements which was grown at the different substrate temperatures. At the end of the study with the help of the available data the values of $+Q$ and $-Q$ for each scan direction are calculated and analysed.

2014, 75 pages

Keywords: Memristor, TiO_2 , Sputtering, Lithography, 3D Lithography

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma; Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Nano-Teknoloji Laboratuvarında yapılmıştır.

Öncelikle yüksek lisans eğitimim boyunca hep yanımda olan, fikirleri ve bilgisiyle her alanda bana yön veren, laboratuvar ortamında gerekli bilgi ve beceriyi kazanmamı sağlayan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU'na en içten teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Yine çok değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL ve Sayın Doç. Dr. Tevhit KARACALI'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarında uzaktan da olsa desteğini ve yardımlarını esirgemeyen sevgili arkadaşım Hava POLAT'a çok teşekkür ederim.

Hayatımın her anında yanımda olup tüm imkânlarını seferber eden sevgili aileme ve isimlerini sayamadığım arkadaşlarıma ve her zaman yanımda olan M. Mert ÇATAKÇI'ya çok teşekkür ederim.

Süheyla GÜLLÜLÜ

Ağustos, 2014

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tarihsel Gelişim	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	2
2.1. Memristor	2
2.2. Memristörün Yapısı.....	4
2.3. Memristör’de Anahtarlama	8
2.4. Memristör Modelleri	8
2.4.1. Lineer model.....	9
2.4.2. Nonlineer model	10
2.4.3. Ekspansiyel model.....	11
2.5. Titanyum Dioksit.....	12
2.5.1. Anataz fazda titanyum dioksit	12
2.5.2. Rutil fazda titanyum dioksit	14
2.5.3. Brokit fazda titanyum dioksit	16
2.6. Uzay Yüğü İle Sınırlanmış Akım (SCLC)	20
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	22
3.1. Saçtırma (Sputtering)	22
3.1.1. Saçtırma teknikleri	24
3.1.1.a. DC Saçtırma	24
3.1.1.b. RF Saçtırma.....	25
3.1.1.c. Magnetron Saçtırma	26
3.2. Litografi Tekniğı	27
3.3. Fotolitografi.....	28

3.4. Lift-Off Tekniği.....	29
3.4.1. Tek tabaka metodu	30
3.4.2. Çok tabaka metodu	31
3.4.3. Modifiye edilmiş yüzey metodu.....	31
3.5. Dağıtıcı Litografi (3D Litografi)	31
3.6. Hizalama ve Pozlama	33
3.7. Aşındırma Süreçleri.....	33
3.7.1. Islak asit aşındırması	34
3.7.2. Kuru aşındırma	34
3.8. Termal Buharlaştırma	35
3.9. Termal Oksidasyon.....	36
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	38
4.1. Isıl işlemin ve Tarama Hızının Memristiv Özelliğe Etkisinin İncelenmesi	38
4.2. TiO ₂ İnce Filmlerde Altlık Sıcaklığının Memristiv Davranış Üzerine Etkisi	41
4.3. +Q ve –Q Yüklerinin Hesaplanması ve Buna Bağlı Olarak Memristiv Davranışın İncelenmesi	44
5. SONUÇ	72
KAYNAKLAR	74
ÖZGEÇMİŞ	76

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

$\text{\AA}$	Angstrom
Ar	Argon
C	Kapasitans
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat Derece
D	Yarıiletken Anahtar Kalınlığı
DC	Doğru Akım
ϵ	Dielektrik Sabiti
$f(x)$	Pencere Fonksiyonu
I	Akım
L	Mott-Gurney eşitliğinde ince metal malzemenin kalınlığı
L	İndüktans
n	Serbest Parametre
nm	Nanometre
q	Yük
R	Direnç
μ_V	İyonların Ortalama Mobilitesi
3D	3 Boyutlu

Kısaltmalar

RF	Radyo Frekans
R_{OFF}	Memristör için en yüksek direnç
R_{ON}	Memristör için en düşük direnç
s	Saniye
t	Zaman
UV	Ultraviole
V	Gerilim
w	Katkılı Bölgenin kalınlığı
Φ	Manyetik akı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Chua'nın Memristör için tasarladığı devre simülasyonu.....	2
Şekil 2.2. Direnç, indüktans ve kapasitans arasındaki olası ilişkiler	3
Şekil 2.3. Memristörün tipik akım-gerilim karakteristiği	4
Şekil 2.4. Memristör için değişken direnç çifti modeli	5
Şekil 2.5. Memristör anahtar kesit diyagramı	6
Şekil 2.6. Memristörün çalışması	7
Şekil 2.7. Anataz TiO_2 birim hücresi ve doğal külçesi	13
Şekil 2.8. TiO_2 anataz fazına ait yansıma düzlemleri relatif şiddetleri.....	13
Şekil 2.9. Rutil TiO_2 birim hücresi ve külçesi	15
Şekil 2.10. Rutil TiO_2 ye ait XRD pikleri.....	15
Şekil 2.11. Brokit TiO_2 birim hücresi ve külçesi	17
Şekil 2.12. Brokit TiO_2 'ye ait XRD pikleri	17
Şekil 2.13. Aygıt incelidikçe akımın gerilimle değişim hızı artar ve daha çok elektron aygıt içine sürülür.....	21
Şekil 3.1. Saçtırma işleminin basit şematik gösterimi	23
Şekil 3.2. Üç hedefli saçtırma sistemi.....	23
Şekil 3.3. DC saçtırma tekniğinin şematik gösterimi	25
Şekil 3.4. RF saçtırma tekniğinin şematik gösterimi	26
Şekil 3.5. Magnetron saçtırma tekniğinin şematik gösterimi	27
Şekil 3.6. Fotolitografi tekniğinin şematik gösterimi	28
Şekil 3.7. Pozitif ve negatif fotorezist ile maske aktarımı	29
Şekil 3.8. Hizalama ve pozlandırma cihazı.....	30
Şekil 3.9. Pozitif fotorezistle dairesel ya da eliptik proseslerin oluşturulması	32
Şekil 3.10. Geleneksel ve 3D difüzör litografi	32
Şekil 3.11. Hizalama ve pozlandırma	33
Şekil 3.12. İzotropik ve Anizotropik aşındırma.....	34
Şekil 3.13. Plazma aşındırma.....	35
Şekil 3.14. Termal buharlaştırma sistemi	36
Şekil 3.15. Oksitlemek için kullanılan fırın	37

Şekil 4.1. I-V ölçüm için prob istasyonu	39
Şekil 4.2. Farklı tarama hızlarında memristiv davranış	40
Şekil 4.3. 400°C’de ısıt işlem görmüş numunenin memristiv özelliğinin farklı tarama hızlarında incelenmesi	40
Şekil 4.4. S95-tst numunesine ardışık 20 döngü ile I-V ölçümü	41
Şekil 4.5. Altlık sıcaklığı 50°C ve 100°C olan numuneler ait I-V grafiği	42
Şekil 4.6. Altlık sıcaklığı 150°C ve 200°C olan numunelere ait I-V grafiği	43
Şekil 4.7. Altlık sıcaklığı 250°C ve 300°C olan numunelere ait I-V grafiği	43
Şekil 4.8. Altlık sıcaklığı 350°C ve 400°C olan numunelere ait I-V grafiği	44
Şekil 4.9. (S97_nokta_5b) ölçümüne ait I-V grafiği.....	46
Şekil 4.10.a. (S97_nokta_5b) ölçümüne ait +Q grafiği.....	46
Şekil 4.10.b. (S97_nokta_5b) ölçümüne ait -Q grafiği.....	47
Şekil 4.11. (S98_nokta_11a) numunesine ait I-V grafiği	48
Şekil 4.12.a. (S98_nokta_11a) ölçümüne ait +Q grafiği	48
Şekil 4.12.b. (S98_nokta_11a) ölçümüne ait -Q grafiği.....	49
Şekil 4.13. (S100_2c) ölçümüne ait negatif ve pozitif bölgede I-V grafikleri	50
Şekil 4.14.a. (S100_2c) ölçümüne ait +Q grafiği	50
Şekil 4.14.b. (S100_2c) ölçümüne ait -Q grafiği.....	51
Şekil 4.15. (S100_2d) ölçümüne ait negatif ve pozitif bölgede I-V grafikleri	52
Şekil 4.16.a. (S100_2d) ölçümüne ait +Q grafiği.....	52
Şekil 4.16.b. (S100_2d) ölçümüne ait -Q grafiği.....	53
Şekil 4.17. (S100_2e) ölçümüne ait negatif ve pozitif bölgede I-V grafikleri	53
Şekil 4.18.a. (S100_2e) ölçümüne ait +Q grafiği	54
Şekil 4.18.b. (S100_2e) ölçümüne ait -Q grafiği	54
Şekil 4.19. (S100_2f) ölçümüne ait negatif ve pozitif bölgede I-V grafikleri.....	55
Şekil 4.20.a. (S100_2f) ölçümüne ait +Q grafiği	55
Şekil 4.20.b. (S100_2f) ölçümüne ait -Q grafiği.....	56
Şekil 4.21. (S100_2g) ölçümüne ait I-V grafiği	56
Şekil 4.22.a. (S100_2g) ölçümüne ait +Q grafiği.....	57
Şekil 4.22.b. (S100_2g) ölçümüne ait -Q grafiği.....	57
Şekil 4.23. (S100_2h) ölçümüne ait negatif ve pozitif bölgede I-V grafikleri	58
Şekil 4.24.a. (S100_2h) ölçümüne ait +Q grafiği.....	58

Şekil 4.24.b. (S100_2h) ölçümüne ait -Q grafiği.....	59
Şekil 4.25. (S102_döngü_V1) ölçümüne ait I-V grafiği.....	60
Şekil 4.26.a. (S102_döngü_V1) ölçümüne ait +Q grafiği.....	60
Şekil 4.26.b. (S102_döngü_V1) ölçümüne ait -Q grafiği.....	61
Şekil 4.27. (S110_r4_20) ölçümüne ait I-V grafiği	62
Şekil 4.28.a. (S110_r4_20) ölçümüne ait +Q grafiği	62
Şekil 4.28.b. (S110_r4_20) ölçümüne ait -Q grafiği	63
Şekil 4.29. (S111_r5_04) ölçümüne ait I-V grafiği	64
Şekil 4.30.a. (S110_r5_04) ölçümüne ait +Q grafiği	64
Şekil 4.30.b. (S111_r5_04) ölçümüne ait -Q grafiği	65
Şekil 4.31. (S111_r5_05) ölçümüne ait I-V grafiği	65
Şekil 4.32.a. (S111_r5_05) ölçümüne ait +Q grafiği	66
Şekil 4.32.b. (S111_r5_05) ölçümüne ait -Q grafiği	66
Şekil 4.33. (S111_r5_06) ölçümüne ait I-V grafiği	67
Şekil 4.34.a. (S111_r5_06) ölçümüne ait +Q grafiği	67
Şekil 4.34.b. (S111_r5_06) ölçümüne ait -Q grafiği	68
Şekil 4.35. (S114_10_03) ölçümüne ait I-V grafiği	69
Şekil 4.36.a. (S114_10_03) ölçümüne ait +Q grafiği.....	69
Şekil 4.36.b. (S114_10_03) ölçümüne ait -Q grafiği	70
Şekil 4.37. (S114_r2_03) ölçümüne ait I-V grafiği	70
Şekil 4.38.a. (S114_r2_03) ölçümüne ait +Q grafiği	71
Şekil 4.38.b. (S114_r2_03) ölçümüne ait -Q grafiği	71

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Direnç, indüktans ve kapasitansa ait denklem ifadeleri.....	3
Çizelge 3.1. Anataz TiO_2 'ye ait yansıma düzlem ve relatif şiddet tablosu.....	14
Çizelge 3.2. TiO_2 rutil fazına ait yansıma düzlemleri ve relatif şiddet tablosu	16
Çizelge 3.3. TiO_2 brokit fazına ait yansıma düzlemleri ve relatif şiddet tablosu	18
Çizelge 3.4. Titanyum dioksitin fazlarına ait özellikleri.....	19
Çizelge 4.1. $\text{Al/TiO}_2/\text{Ti/p}^{++}\text{Si}$ yapısına ait büyütme parametreleri.....	38
Çizelge 4.2. I-V ölçüm parametreleri	39
Çizelge 4.3. TiO_2 ince film büyütme parametreleri	42
Çizelge 4.4. S97 numunesine ait parametreler.....	45
Çizelge 4.5. S98 numunesine ait parametreler.....	47
Çizelge 4.6. S100 numunesine ait parametreler.....	49
Çizelge 4.7 S102 numunesine ait parametreler.....	59
Çizelge 4.8. S110 numunesine ait parametreler.....	61
Çizelge 4.9. S111 numunesine ait parametreler.....	63
Çizelge 4.10. S114 numunesine ait parametreler.....	68

1. GİRİŞ

1.1. Tarihsel Gelişim

1960 yılında Prof. Bernard W. yeni bir devre elemanı keşfetmiş ve bu yeni devre elemanını memristör olarak isimlendirmiştir (Strukov *et al.* 2008). Bulunan bu üç terminalli aygıtın iki terminali arasındaki iletkenliği üçüncü terminalin içinden geçen akımın zamana göre integrali ile kontrol edilmektedir.

1968 yılına gelindiğinde ise F. Areal titanyum oksit ince filmlerde anahtarlama olayını keşfetti.

1971 yılında da Kaliforniya Üniversitesi'nden Dr. Leon Chua kayıp bir devre elemanı olduğunu bir hipotez olarak ileri sürülmüştür (Chua 1971). Aslında bu hipotezin alt yapısı elektroniğin temel elemanları arasındaki simetri tartışmasından ileri gelmekteydi (Mohammad *et al.* 2012). Bu tartışmaya göre yük ve akı arasında ki ilişkiyi anlatacak temel pasif devre elemanı yoktu. 2008 yılına kadar da memristiv özelliğinin farkına varılamadı. Memristiv davranış aslında tabiatta bazı malzemelerin doğasında var olan bir özellik olmasına rağmen makro boyutlarda ki yapılarda memristiv davranış çok zayıf olduğundan farkına varılamamıştır. Gözlemlendiği çalışmalarda ise anormal davranış olarak değerlendirilmiştir. Memristiv davranış aslında nano boyutta etkin bir şekilde görülebilen bir özelliktir.

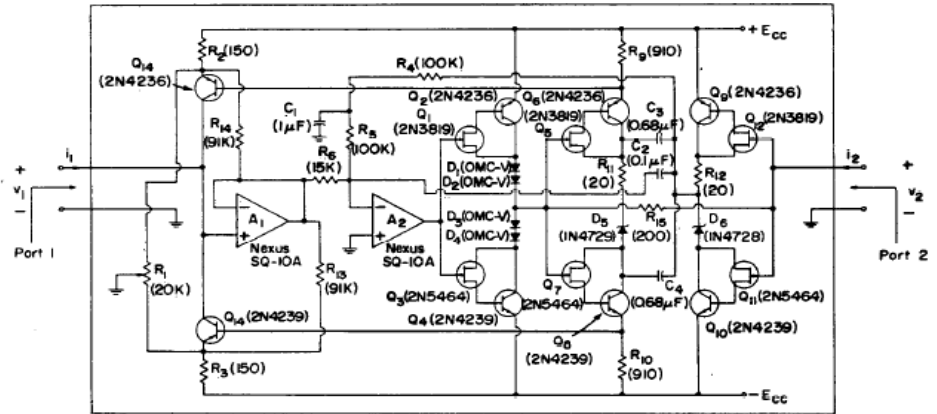
2008'de HP laboratuvarlarından Williams ve ekibi Pt/TiO₂/Pt yapısı ile kayıp devre elemanı Memristörü bulduklarını bir makale ile duyurdular (Strukov *et al.* 2008).

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Memristor

Memristor son yıllarda artan bir popülerlikle bilim insanlarının dikkatini çekmektedir. Peki, nedir bu Memristor? Memristor kelime anlamı olarak İngilizce Memory Resistor kelimelerinin kısaltılmasıyla oluşmuş Hafızalı Direnç anlamına gelmektedir. Memristor ilk olarak 1971 yılında California Üniversitesinden Profesör Leon Chua tarafından önerilmiştir ve önerinin matematiksel olarak ispatı ve elektronik eşdeğeri de gerçekleştirilmiştir.

CHUA: MEMRISTOR—MISSING CIRCUIT ELEMENT



Şekil 2.1. Chua'nın Memristör için tasarladığı devre simülasyonu (Chua 1971)

Aslında Chua bu teoriyi ortaya atarken elektronikte kullanılan temel devre elemanları arasındaki simetrik ilişkiden yararlanmıştır. Bilindiği gibi elektronikte üç temel pasif devre elemanı mevcuttur. Bunlar direnç (R), indüktans (L) ve kapasitans (C) tir.

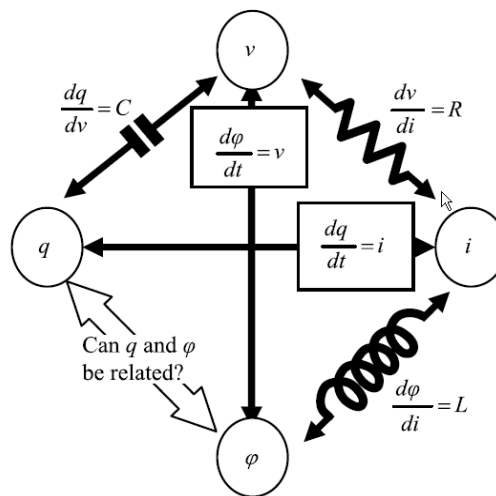
Çizelge 2.1. Direnç, indüktans ve kapasitansa ait denklem ifadeleri

DİRENÇ	$R = \frac{V}{I}$
İNDÜKTANS	$V = L \frac{dI}{dt}$
KAPASİTANS	$I = C \frac{dV}{dt}$

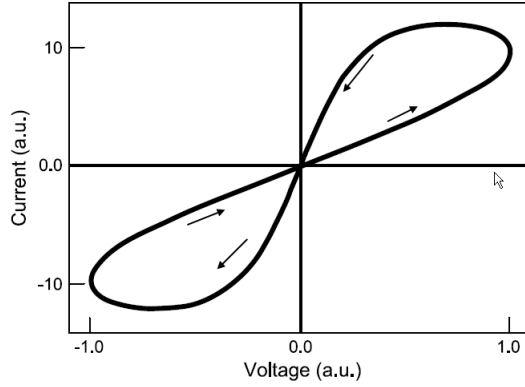
Elektrik-Manyetizma’da temel büyüklükler;

- Yük (q)
- Akım (i)
- Voltaj (V)
- Manyetik akı (Φ)

Şeklinde ifade edilmektedir ve bu dört büyüklük arasında da olası altı ilişki mevcuttur. Bu ilişkiler Şekil 2.2’de verilmiştir. q-v arasındaki ilişki sığayı, v-i arasındaki ilişki direnci ve ϕ -i arasındaki ilişki indüktansı tanımlarken, ϕ -q arasındaki ilişkiyi sağlayan bir devre elemanı literatürde tanımlı değildir.

**Şekil 2.2.** Direnç, indüktans ve kapasitans arasındaki olası ilişkiler (Kumar 2010)

Bu simetrik ilişkinin tamamlanması 1971 yılında teorik olarak Chua tarafından önerilmişti ve aktif devre elemanlarıyla gerçekleştirdiği memristörün tek aygıt olarak da var olacağı öngörüsünde bulunmuştur. 2008 yılına kadar bu teorik öngörünün deneysel olarak ispatı yapılamamıştır. 2008 yılına gelindiğinde HP Laboratuvarlarından Williams ve ekibi Nature dergisinde yayınladıkları bir makale ile kayıp Memristörü bulduklarını duyurdular (Strukov *et al.* 2008). Memristöre ait akım-gerilim grafiği Şekil 2.3’de verilmiştir.



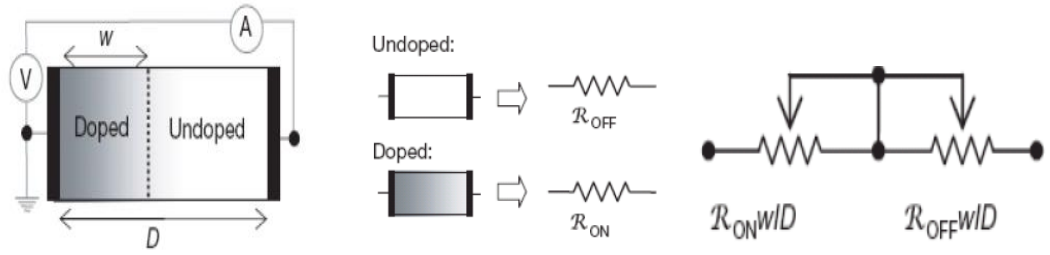
Şekil 2.3. Memristörün tipik akım-gerilim karakteristiği (Kumar 2010)

Aslında tabiatta bazı malzemeler memristiv özellik sergileyebilirler ancak makro dünyada bu özellik çok zayıf olduğundan ve gözlemlendiği durumlarda da açıklanamadığından anormal davranış olarak nitelenmiş ve göz ardı edilmiştir. Memristiv özellik aslında nano boyutta gözlenebilen bir davranıştır.

2.2. Memristörün Yapısı

Williams ve grubu 2008’de belirlenmiş sınırlar içinde ideal bir memristör gibi davranan iki uçlu elektriksel bir cihazın fiziksel modelini sundular (Strukov *et al.* 2008). Bu model literatürde yaklaşık 50 yıldır; iki uçlu nanometre ölçekli, özellikle ince film aygıtlarda; anahtarlama, histeretik iletkenlik, çok durumlu iletkenlik ve negatif diferansiyel direnç olarak ortaya çıkan akım-gerilim anomalileri için basitleştirilmiş bir açıklama sağladı (Strukov *et al.* 2008).

İnce film aygıtlardaki elektriksel anahtarlama yakın zamanlarda yeniden daha fazla dikkat çekmeye başladı, çünkü böyle bir teknoloji mantık ve hafıza devrelerinde CMOS teknolojisinin mevcut limitlerinin ötesinde bir ölçeklemeye imkân tanıyabilir. Williams ve grubu elektriksel anahtarlama için bir model önerdiler. Bu modele göre çalışmalarında kullandıklarında Pt/TiO₂/Pt yapısında iki Pt ince film arasına katkılanmış TiO₂ ve katkılanmamış TiO_{2-x} bölgeleri oluşturulmuştur. Katkılı ve katkısız bölgelerin toplam kalınlığı birkaç nm mertebesinde. Aygıt dışarıdan V(t) geriliminin uygulanması ve oksijen iyonlarının sürüklenmesiyle iki bölgenin sınırları kayar, şekil 2.4. (Strukov *et al.* 2008) ve yapının eşdeğer direncinin değişmesi ile anahtarlama oluşur. Şekil 2.4'de HP araştırmacılarının gözlemlerini esas alan Memristör için model daha sonraları *Lineer Model* olarak adlandırılmıştır.



Şekil 2.4. Memristör için değişken direnç çifti modeli (Strukov *et al.* 2008)

Bu modelde hareketli yükü temsil eden oksijen iyonlarının ortalama mobilitesi μ_V olan üniform bir alanda, doğrusal iyonik sürüklenme ve omik elektronik iletkenlik için;

$$v(t) = \left(\mathcal{R}_{ON} \frac{w(t)}{D} + \mathcal{R}_{OFF} \left(1 - \frac{w(t)}{D} \right) \right) i(t) \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial w(t)}{\partial t} = \mu_V \frac{\mathcal{R}_{ON}}{D} i(t) \quad (2.2)$$

denklemleri verilmiştir. 2.2 eşitliğinden;

$$w(t) = \mu_V \frac{\mathcal{R}_{ON}}{D} q(t) \quad (2.3)$$

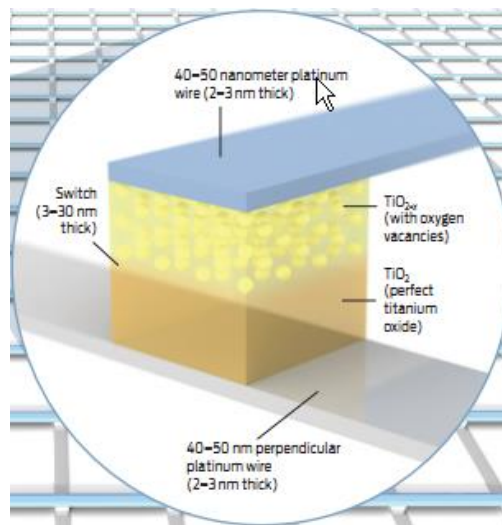
olarak bulunur. Denklem (2.3)'ü denklem (2.1)'de yerine koyarsak;

$$M(q) = R_{OFF} \left(1 - \frac{\mu_V R_{ON}}{D^2} q(t) \right) \quad (2.4)$$

ifadesi elde edilir (Strukov *et al.* 2008).

D katsayısı katkılı ve katkısız bölgelerin toplam kalınlığına karşılık gelmektedir. Mikron boyuttan nm boyutuna inildiği zaman $M(q)$ sabitinin $1/D^2$ ye bağlılığından dolayı $M(q)$ 1.000.000 kez artmaktadır. Bu da aslında bize makro boyutta gözden kaçan bir detayın günümüzde nanoteknolojideki çalışmalar ile bilim insanlarının dikkatini çekmiştir. Böylece herhangi bir aygıt, nanometre ölçekli kritik boyutlara doğru küçüldükçe elektronik karakteristiğini anlamak için memristans oldukça önemli hale gelmeye başlamaktadır (Strukov *et al.* 2008).

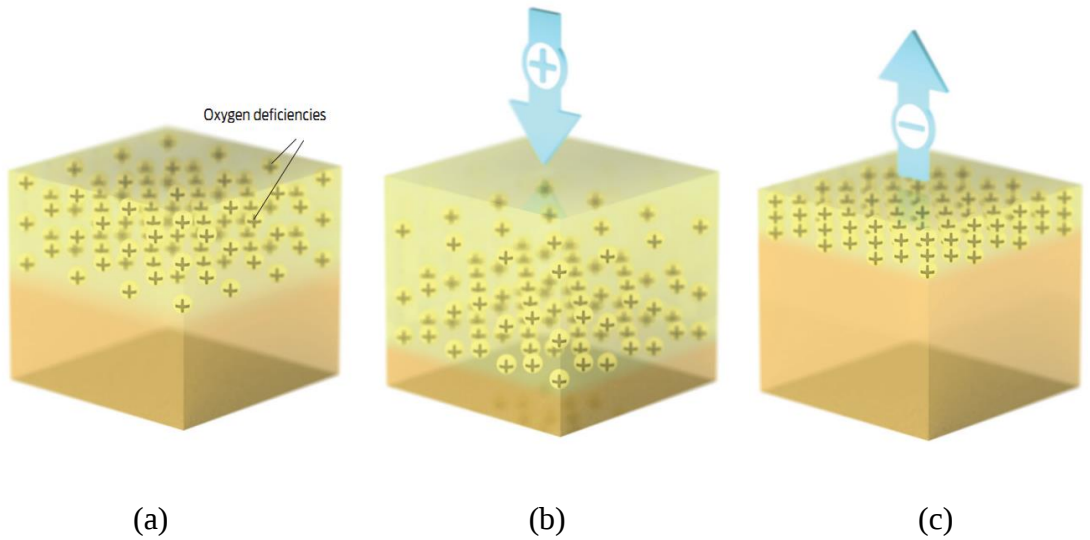
HP araştırmacıları tarafından yukarıdaki modele uygun olarak iki Pt metal kontak arasına yerleştirilmiş sandviç yapıdaki Pt/ TiO_2 / TiO_{2-x} /Pt metal oksitler kullanılarak gerçekleştirilmiş bir memristör aygıtının kesit diyagramı Şekil 2.5'de gösterilmiştir (Strukov *et al.* 2008).



Şekil 2.5. Memristör anahtar kesit diyagramı (Williams 2008)

Şekil 2.5’de görülen memristör tabanlı elektriksel anahtarın en üstünde ve en altında 40-50 nm genişliğinde, 2-3 nm kalınlığında metal Pt kontaklar bulunmaktadır. Alt TiO_2 katmanı tam 2:1 Oksijen/Titanyum oranına sahip, yalıtkan özellik gösteren katmandır ($\mathcal{R}_{\text{OFF}}$). Üst katman %0.5 eksik oksijene sahip (oksijen boşlukları), yani x yaklaşık 0.05 olan TiO_{2-x} , iletken özellik gösteren katmandır ($\mathcal{R}_{\text{ON}}$). Yapının platin kontaklarla birlikte toplam kalınlığı yaklaşık 40 nm’dir. Yarıiletken anahtar kalınlığı ($\mathcal{D}$) 3-30 nm dir (Strukov *et al.* 2008).

TiO_{2-x} deki oksijen boşlukları üst katman boyunca yayılmış durumdadır (Şekil 2.6 (a)). Uygulanan bir pozitif voltaj, TiO_{2-x} katmanındaki (+) yüklü oksijen boşlukları alt katmandaki yalıtkan TiO_2 tabakasının içine doğru sürükler. Bu, iki bölge arasındaki sınırı alt kontağa doğru kaydırarak TiO_{2-x} tabakasının, dolayısıyla bütün anahtarın iletkenlik yüzdesini artırır (Şekil 2.6 (b)). Uygulanan pozitif voltaj ne kadar artarsa (doğal olarak geçen toplam yük miktarı artar), aygıtın iletkenliği de o oranda değişir. Yapıya uygulanan negatif voltaj pozitif yüklü oksijen boşluklarını TiO_2 katmanının içinden çeker. Böylece yalıtkan ve dirençli TiO_2 katmanı tüm anahtarı yalıtkan yapacak şekilde büyür (Şekil 2.6 (c)). Uygulanan negatif voltaj ne kadar artarsa (geçen akım toplamda artar ise), eklemenin iletkenliği de o oranda azalır (Strukov *et al.* 2008).



Şekil 2.6. Memristörün çalışması (Strukov *et al.* 2008)

Bu anahtarı memristiv yapan şey; uygulama gerilimi kesildiğinde oksijen boşluklarının hareketsiz kalması ve dağılımının sabitlenmesidir. Bunun anlamı iki TiO_2 katmanının arasındaki sınırın donmuş olmasıdır. İşte bu memristörün son durumunu hatırlamasıdır (Williams 2008).

2.3. Memristör'de Anahtarlama

Memristörün durumunu şekil 2.4 deki eşdeğer direnci belirler. Böylece denklem 2.2'den de göreceğimiz gibi w memristörün değişken durumunu ifade etmektedir. Anahtarlama da iki durum söz konusudur ve $x=0$ ve $x=1$ arasında değişken değerler almaktadır. $X=0$ için R_{OFF} , $x=1$ için R_{ON} durumlarına karşılık gelmektedir. Katkılı bölgenin kalınlığının artması ince filmin toplam direncini azaltır ve katkılı bölgeye pozitif voltaj uygulanarak oksijen boşluklarını süpürür ve katkılı bölgeyi genişletir. Diğer yandan katkılı bölgeye negatif gerilim uygulamak da bunları geri sürükler ve direnci artırır.

Böylece memristörde düşük direnç (R_{ON}) ya da yüksek direnç (R_{OFF}) durumuna göre anahtarlama yapılabilir.

2.4. Memristör Modelleri

Literatürde memristörü tanımlayacak iki eşitlik mevcuttur. Bunlar;

$$v = v(x, i, t) \quad (2.5)$$

$$\dot{x} = \dot{x}(x, i, t) \quad (2.6)$$

Birinci eşitlik I-V ilişkisini tanımlamaktadır. İkinci eşitlik yüklerin sürüklenme hızını modellemektedir. Bunu da aygıtta düzgün elektrik alan uygulandığını varsayarak yapmaktadır (Mohammad *et al.* 2012).

Yukarıdaki iki denklemi karşılayan pek çok memristör modeli mevcuttur; biz burada bütün modelleri 3 kategoride inceleyeceğiz. Bunlar Lineer, Nonlineer ve Ekspansiyel modeldirler (Mohammad *et al.* 2012).

2.4.1. Lineer model

Lineer modelde memristör yapıda elektrik akımı altında iyonların sürüklenmesi lineer kabul ettiğinden en basit modeldir. Bu modelde akım-gerilim ilişkisi aşağıdaki denklem ile tanımlanır.

$$v = M(x)i \quad (2.7)$$

$$(i) = \frac{\mu_{RON}}{D^2} i(t) = ki(t) \quad (2.8)$$

bu ifadede μ ; O_2 'nin metal oksit içindeki sürüklenme mobilitesi.

$$M(x) = R_{ON}x + R_{OFF}(1 - x) \quad (2.9)$$

$M(x)$ büyüklüğü ise eşdeğer memristiv dirençtir.

Lineer memristör modeli memristörün karakteristik histerisis eğrisini basitçe veren modeldir. Ancak bu modelin düzeltilmesi gereken yetersizliği vardır. İlk olarak aygıt üzerine gönderilen küçük bir voltaj bile büyük elektrik alan oluşturmakta ve lineer model memristörün içindeki büyük elektrik alanın yüksek nonlinear etkisini yakalayamamaktadır (Pickett *et al.* 2009). Ayrıca w asla 0 sınırına ulaşamaz çünkü bu durum yük taşıma mekanizması olarak belirlenen oksijen boşluklarının aygıt içinde fiziksel olarak olmadığına işaret etmekte iken aygıt potansiyel olarak oksijen boşluklarıyla katkılanabilmektedir. Yani durum değişkeni x ; 0 ve 1 sınır koşullarını sağlamamaktadır (McDonald *et al.* 2010).

2.4.2. Nonlinear model

Lineer modele göre daha gelişmiş bir model olan nonlinear model de durum değişkenini bir sürüklenme eşitliğine bağlayan bir $f(x)$ pencere fonksiyonu vardır. Burada x ; 0 ve 1 arasında değerler almaktadır. Sonuç olarak durum değişkeni aşağıdaki eşitlikten gelerek;

$$(i) = \frac{\mu_{RON}}{D^2} i(t) = ki(t) \quad (2.10)$$

$$\dot{x}(t) = ki(t)f(x) \quad (2.11)$$

pencere fonksiyonu azalarak 0 değerine ulaşırken durum değişkeni x sınır değerlerine yaklaşır. Literatürde pek çok pencere fonksiyonu bulunmaktadır ancak Strukov (Strukov *et al.* 2008) daha sonra Benderli ve Wey (Benderli and Wey 2009) tarafından düzeltilen yeni bir pencere fonksiyonu önerdi.

$$f(x) = x(1 - x) \quad (2.12)$$

Başka bir pencere fonksiyonu da Joglekar tarafından önerildi (Joglekar and Wolf 2009) ki bu da pozitif kontrol parametresine (p) sahiptir.

$$f(x) = 1 - (2x - 1)^{2p} \quad (2.13)$$

Bu kontrol parametresi modelin lineerliğini kontrol etmektedir. Burada p arttıkça lineerlikte artmaktadır. Tartışılan pencere fonksiyonları şimdiye kadar sınır koşullarını sağlamamaktaydı. Biolek (Biolek *et al.* 2009) başka bir pencere fonksiyonu önererek memristörün sonuçsuz *dead and state* durumundan geri dönmesini sağlamıştır. Bu özellik akım bağımlı adım fonksiyonuyla açıklanmaktadır ki bu da pencere fonksiyonunun yeni bir parçasıdır.

$$f(x) = 1 - (x - \text{stp}(-i))^{2p} \quad (2.14)$$

$$\text{stp}(i) = \begin{cases} 1, & i \geq 0 \\ 0, & i < 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

Bu pencere fonksiyonu modelde çözümsüzlük durumu için süreksizlik oluşturur.

2.4.3. Ekspansiyel model

Var olan nonlinear modeller, içeride ki iyon transfer hareketliliğinin aynı ortalamada olduğunu varsaydıklarından dolayı yüksek elektrik alanın doğrusal olmayan etkilerini yakalamada yetersiz kalmışlardır. Bunun sonucu olarak lineer ve nonlinear modeller iyonlar için gerçek sürüklenme hızını modelleyemezler ve bundan dolayı anahtarlama zamanı tam olarak tahmin edilemez (Lehtonen and Laiho 2010). Lehtonen tarafından önerilen bir başka nonlinear model ise geniş alan etkisini yakalamaya çalışır. Bu model memristörün omik olmayan *nonohmic* I-V karakteristiğinde kullanılır ve üstelik bir işlev tarafından sürüklenme denklemini çarpar bu da memristöre uygulanan gerilime bağlıdır. Lehtonen'in düzeltilmiş modelinde $\sinh(bv)$ ifadesinde ki v ; doğrusal olmayan polinomda elektrik alanın yerine doğrusal olmayan elektrik alan hesaplanır. Bu modele ekspansiyel model denir ve iki eşitlikle tanımlanır.

$$I = x^n \beta \sinh(\alpha V) + \chi(\exp(\gamma V) - 1) \quad (2.16)$$

$$\dot{x} = a \sinh(bv) f(xi) \quad (2.17)$$

Burada ilk denklem memristörün deneysel I-V ölçüm karakteristiği uyacak şekilde (Wang *et al.* 2013) fit edilen denklemdir. α , β , γ ve χ fit işlemi için tanımlanması gereken sabitlerdir ve n ise serbest parametredir. OFF durumunda I-V eğrisi p-n eklemi gibi davranır (ekspansiyel kısımda) ON durumunda iken ise I-V eğrisi tünelleme karakterine sahiptir ($\sinh$ 'li kısım). Bu modelin durum eşitliği (ikinci denklem) doğrusal olmayan bağımlılığın, voltaja ek olarak pencere fonksiyonuna da $f(x,i)$ bağlıdır.

2.5. Titanyum Dioksit

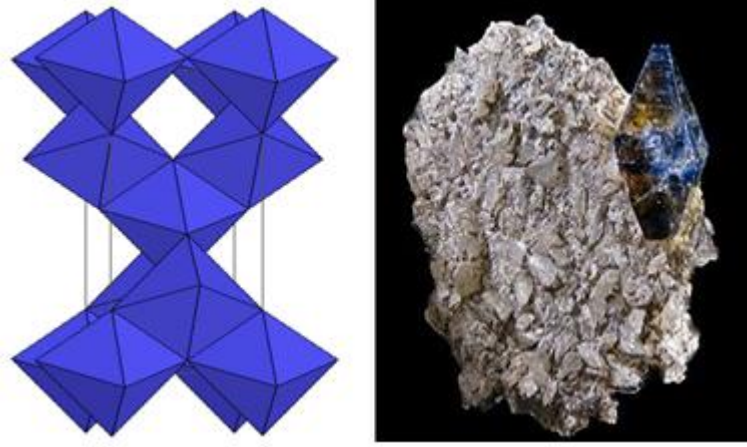
Periyodik cetvelin IV. sütununda yer alan titanyum atomu ile VI. sütununda yer alan oksijen atomunun oluşturduğu bir yapıdır. Yani IV-VI grubu ikili bileşik yarı iletkenlerden birisidir. TiO_2 fiziksel özellik olarak sert, gümüşü, beyaz, parlak bir elementtir. Kristal halde kuvarsı çizecek kadar serttir. TiO_2 nadir bir bileşik olarak bilinse de yer kabuğunda en çok bulunan altıncı bileşiktir.

Titanyum dioksit geniş bir aralıkta optik geçirgenliği, yüksek kırılma indisi, büyük dielektrik sabiti, yüksek mekanik ve kimyasal dayanım ile iyi bir yalıtkan olma özelliği gibi üstün fiziksel özelliklere sahip malzemedir (Bersani *et al.* 1998; Wijnhoven 1998).

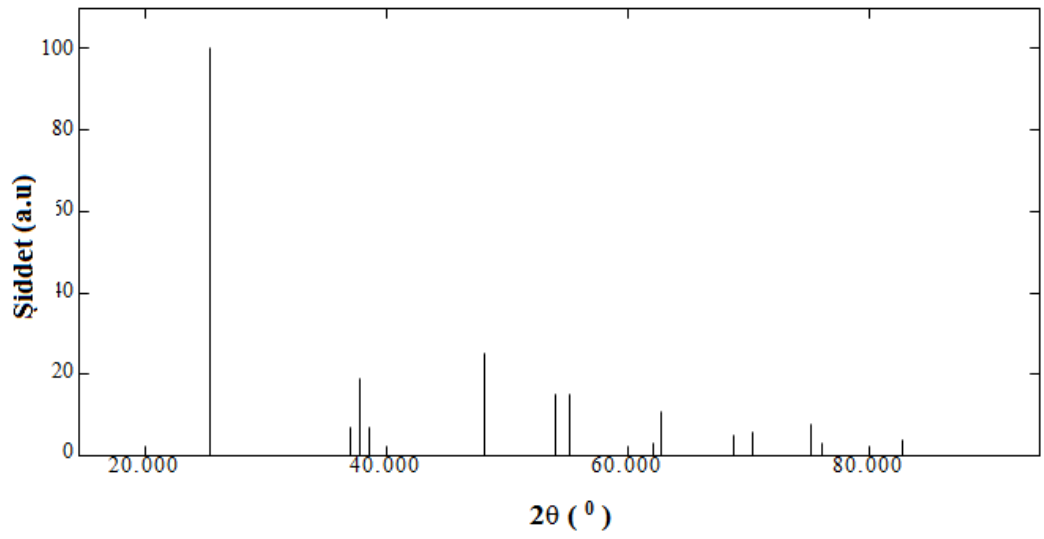
Titanyum dioksit doğada üç farklı fazda bulunur. Bunlar anataz, brokit ve rutil yapılarıdır (Heo *et al.* 2005).

2.5.1. Anataz fazda titanyum dioksit

Anataz titanyum dioksit birtakım özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. Örneğin foto iletkenliğinin iyi olması, elektron boşluk çifti üretiminin kolay olması ve homojen yük dağılımını sağlayabilmesidir (Hu and Yuan 2005). Birim hücresinde 12 atom ve 4 molekül bulunmaktadır. Tetragonal yapıdadır. Anataz TiO_2 kristaline ait tetragonal yapı ve külçe görünümü Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Anataz TiO_2 birim hücresi ve doğal külçesi (Anonymous 2014a; Anonim 2014a)



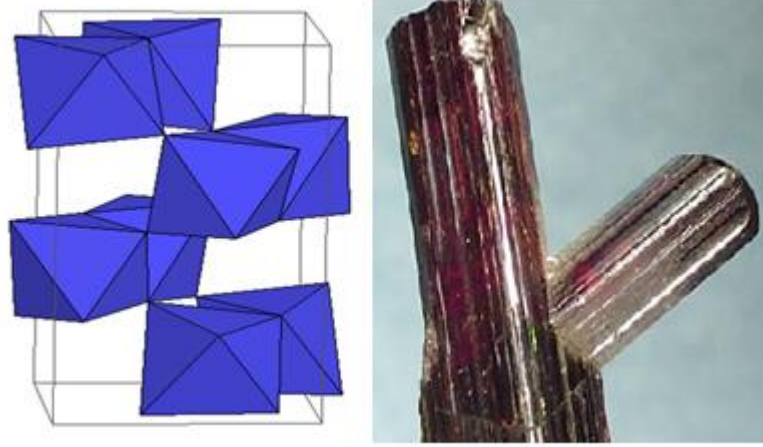
Şekil 2.8. TiO_2 anataz fazına ait yansıma düzlemleri relatif şiddetleri

Çizelge 3.1. Anataz TiO_2 'ye ait yansıma düzlem ve relatif şiddet tablosu

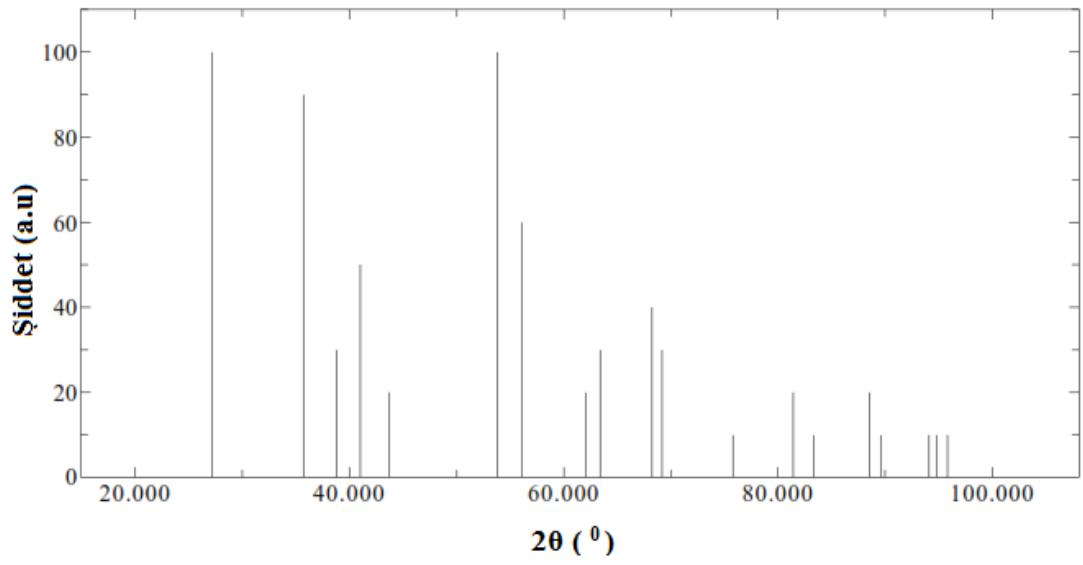
No.	2θ	Şiddet	$h\ k\ l$
1	25.269	100	1 0 1
2	36.875	7	1 0 3
3	37.696	19	0 0 4
4	38.507	8	1 1 2
5	47.977	24	2 0 0
6	53.757	15	1 0 5
7	54.988	15	2 1 1
8	62.006	3	2 1 3
9	62.568	11	2 0 4
10	68.588	5	1 1 6
11	70.192	5	2 2 0
12	73.852	1	1 0 7
13	74.891	8	2 1 5
14	75.926	2	3 0 1
15	80.499	1	0 0 8
16	82.021	1	3 0 3
17	82.523	4	3 2 4
18	83.027	2	3 1 2

2.5.2. Rutil fazda titanyum dioksit

Kimyasal ve termal dengesi en yüksek olan fazdır. Birim hücreinde 6 atom ve 2 molekül bulunmaktadır. Rutil TiO_2 de anataz TiO_2 gibi tetragonal yapıya sahiptir. Rutil TiO_2 kristaline ilişkin örnekler Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Rutil TiO_2 birim hücresi ve külçesi (Anonymous 2014a; Anonim 2014a)



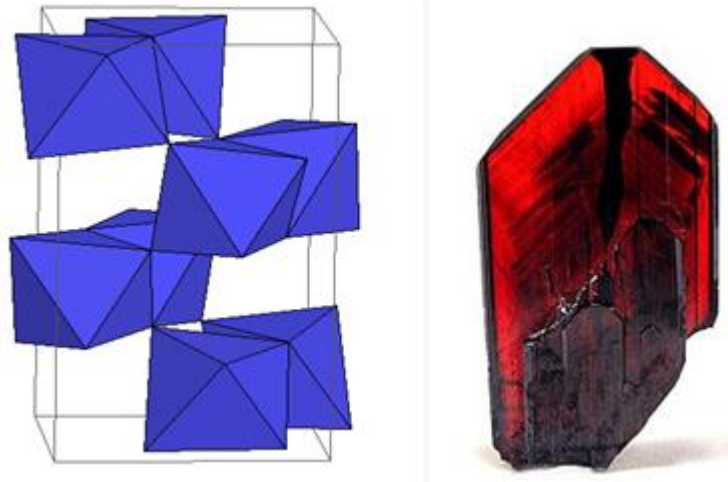
Şekil 2.10. Rutil TiO_2 ye ait XRD pikleri

Çizelge 3.2. TiO₂ rutil fazına ait yansıma düzlemleri ve relatif şiddet tablosu

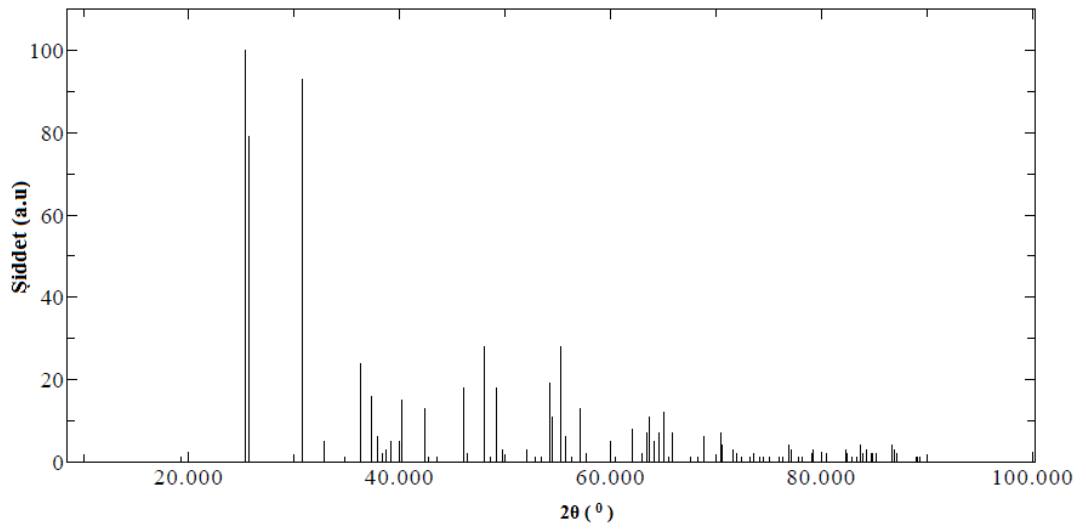
No.	2θ	Şiddet	h k l
1	27.163	100	1 1 0
2	35.742	90	1 0 1
3	38.781	30	2 0 0
4	40.989	50	1 1 1
5	43.691	20	2 1 0
6	53.816	100	2 1 1
7	56.100	60	2 2 0
8	62.070	20	0 0 2
9	63.392	30	3 1 0
10	68.250	40	3 0 1
11	69.168	30	1 1 2
12	75.793	10	2 0 2
13	81.416	10	3 2 1
14	83.389	10	4 0 0
15	88.585	20	2 2 2
16	89.613	10	3 3 0
17	94.138	10	4 1 1
18	94.847	10	3 1 2
19	95.813	10	4 2 0

2.5.3. Brokit fazda titanyum dioksit

Brokit fazı TiO₂'nin en düşük aktivasyon enerjisine sahip olan fazıdır. Çoğunlukla güneş hücrelerinde kullanılan brokit yapının üretimi diğer fazlara göre daha zordur. Brokit fazı düşük sıcaklıklarda üretilir çünkü yüksek sıcaklıklarda rutil faza dönüşmektedir. Genellikle doğada minerallerin yapısında yer almaktadır. Birim hücresinde 24 atom ve 8 molekül bulundurmaktadır. Ortorombik yapıdadır. Brokit TiO₂ kristaline ilişkin örnekler Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Brokit TiO_2 birim hücresi ve külçesi (Anonymous 2014a; Anonim 2014a)



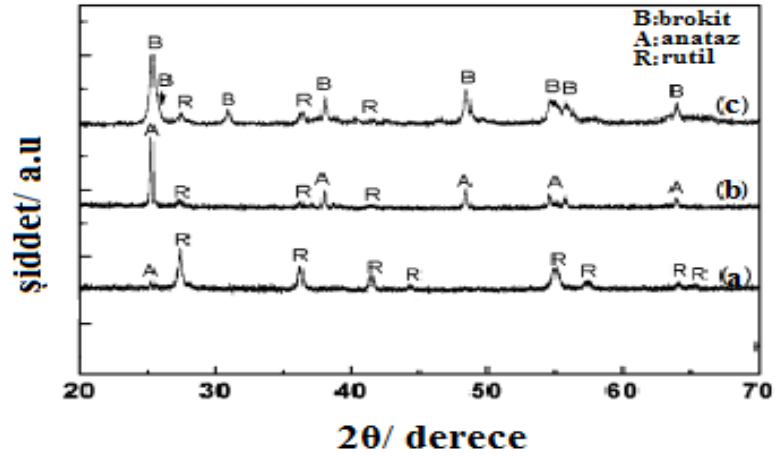
Şekil 2.12. Brokit TiO_2 'ye ait XRD pikleri

Çizelge 3.3. TiO₂ brokit fazına ait yansıma düzlemleri ve relatif şiddet tablosu

No.	2θ	Şiddet	h k l	No.	2θ	Şiddet	h k l
1	19.313	1	200	26	53.444	1	402
2	25.346	100	210	27	54.282	19	230
3	25.695	79	111	28	54.467	11	131
4	30.806	93	211	29	55.242	28	421
5	32.857	5	020	30	55.703	6	511
6	34.845	1	002	31	56.246	1	412
7	36.232	24	102	32	57.145	13	113
8	37.325	16	021	33	57.716	2	322
9	37.948	6	311	34	59.979	5	213
10	38.394	2	220	35	60.425	1	600
11	38.635	3	121	36	62.030	8	331
12	39.203	5	400	37	62.030	8	502
13	39.947	5	112	38	63.027	2	610
14	40.144	15	202	39	63.468	7	132
15	42.359	13	221	40	63.672	11	521
16	42.700	1	410	41	64.113	5	023
17	43.578	1	212	42	64.113	5	422
18	46.045	18	302	43	64.595	7	313
19	46.362	2	411	44	64.595	7	512
20	48.041	28	321	45	65.005	12	123
21	48.644	1	022	46	65.482	1	430
22	49.149	18	312	47	65.874	7	611
23	49.710	3	122	48	67.646	1	223
24	52.052	3	420	49	68.275	1	431
25	52.810	1	222	50	68.892	6	040

Çizelge 3.4. Titanyum dioksitin fazlarına ait özellikleri (Fujishima *et al.* 1999; Karvinen *et al.* 2003; Arer ve Tepehan 2011)

	Anataz	Rutil	Brokit
Kristal yapısı	Tetragonal	Tetragonal	Ortorombik
Örgü sabitleri (Å)	a=3,784	a=4,5936	a=9,166
	b=3,784	b=4,5936	b=5,436
	c=9,515	c=2,9587	c=5,145
Özgül ağırlık (N/m ³)	4-4,5	4,2-4,4	4,14
Sertlik (mohs)	5-6	6-6,5	5,5-6
Yoğunluk (g/cm ³)	3,79	4,13	3,99
Yasak enerji aralığı (eV)	3,2	3,0	3,4-3,55
	Doğrudan	Doğrudan	Doğrudan Olmayan
Kırılma indisi	2-2,4	2,7	2-2,4



Şekil 2.12. TiO₂'nin fazlarına ait XRD pikleri (Gang *et al.* 2009)

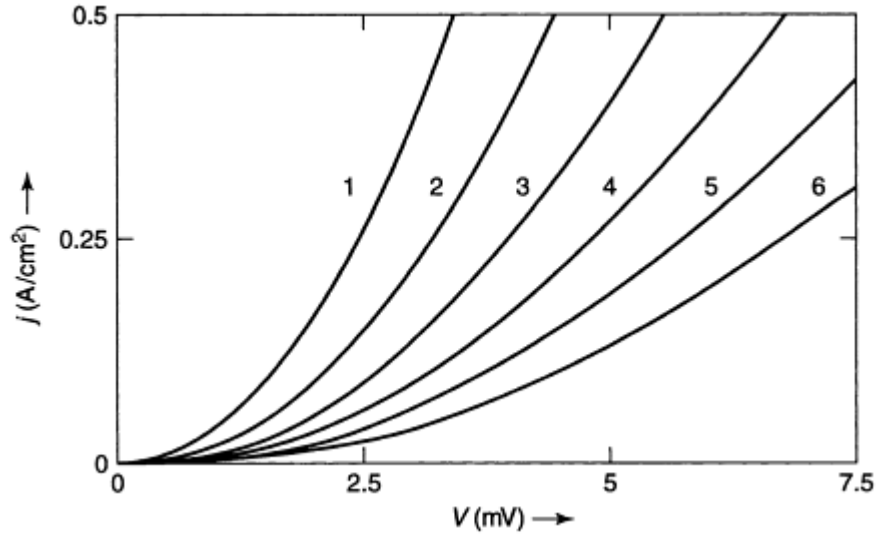
2.6. Uzay Yüğü İle Sınırlanmış Akım (SCLC)

İki düz paralel plaka arasındaki uzay yüküyle sınırlandırılmış akım (Space Charge Limited Current-SCLC) teorisi ilk olarak 1940 yılında Mott ve Gurney tarafından tanımlanmıştır daha sonra birçok araştırmacı tarafından da konu incelenerek genişletilmiştir. Yük taşıma mekanizmalarının farklı türlerinin, yarıiletken aygıtların I-V karakteristiği hakkında bilgi vermek amacıyla araştırmacılar tarafından öne sürülmüştür. (Moiz *et al.* 2009) Her hangi bir tuzak etkisinin olmaması durumunda, akım yoğunluğu Mott-Gurney eşitliğiyle verilir.

$$J = \frac{9}{8} \mu \epsilon \epsilon_0 \frac{V^2}{L^3} \quad (2.18)$$

μ serbest taşıyıcı mobilitesi, ϵ dielektrik sabiti, V uygulanan voltaj ve L ; malzemenin kalınlığı. Burada akım yönünün tek, difüzyon etkisi ihmal edilir ve mobilitenin alandan bağımsız olduğu varsayılmıştır. Yarıiletkene harici gerilim uygulandığında metal-yarıiletken eklemine oluşan potansiyel engeli geçen serbest taşıyıcılar yarıiletken içine enjekte olur. Bu yük taşıyıcıların yük hareketliliğinin düşük olması aygıt içinde akımı sınırlayan uzay yükü bölgesi oluşturur (TSCLC) (Moiz *et al.* 2009).

Şekil 2.13’de 1’den 6’ya kadar numaralandırma ise aygıtın kalınlık durumlarına karşılık gelmekte ve aygıt incelidikçe akımın gerilimle değişim hızını göstermektedir.



Şekil 2.13. Aygıt incelidikçe akımın gerilimle değişim hızı artar ve daha çok elektron aygıt içine sürülür (Böer 2009)

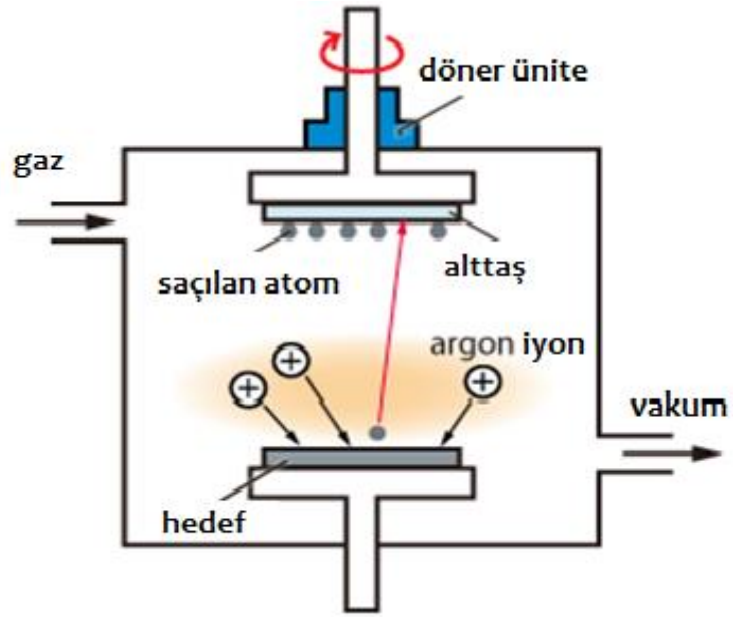
3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Saçtırma (Sputtering)

Saçtırma, hedef malzeme atomlarının plazma iyon bombardımanı ile kopartılarak altlık malzemeye biriktirilmesi işlemidir. Saçtırma ilk olarak 1852 yılında Bunsen ve Goreve tarafından bir D-C gaz boşalma tüpünde gözlenmiştir. Bu olayda bir gaz deşarj tüpünü katot yüzeyinde yüksek enerjili iyonlarla saçtırıldığını ve katottan sökülen malzemelerin tüpün iç duvarına biriktiğini gözlemleyerek keşfetmişlerdir (Wasa *et al.* 1992). Fakat o zamanlarda bu olay tüpün ve katodun zarar görmesine sebep olduğundan dolayı istenmeyen bir durumdur. Oysa bugün, saçtırma işlemi yüzey temizlemede, aşındırmada ya da ince film biriktirmede kullanılan tekniklerden biridir.

Sputter işleminin büyük alanlara uygulanabilir olması, kalınlığın kaplama süresi ile kontrol edilebilir olması, alttaş sıcaklığı ile tanecik büyüklüğünü, negatif besleme ile basamak kaplamayı kontrol etmek mümkündür. Saçtırma verimi ise; iyonun enerjisine, kütlesine, hedef malzemeye, iyonların yönüne, hedef sıcaklığına ve basınca bağlıdır.

Sputter işleminde biriktirme yapılacak hedef malzeme ile kaynak malzeme vakum seviyesi 10^{-7} Torr'a kadar inebilen bir sistem içerisinde yer alır ve saçtırma işlemi için genellikle iyonize edilmiş reaktif olmayan gaz (Argon) kullanılır. Vakuma alınan ortama argon gönderildiğinde yüksek gerilim uygulanan iki elektrot arasında plazma oluşur. Plazmanın ısıması kullanılan inert gaza bağlı karakteristik olup şiddeti akım büyüklüğüne, Ar kısmi basıncına bağlıdır.



Şekil 3.1. Saçırma işleminin basit şematik gösterimi (Anonymous 2014b)



Şekil 3.2. Üç hedefli saçırma sistemi

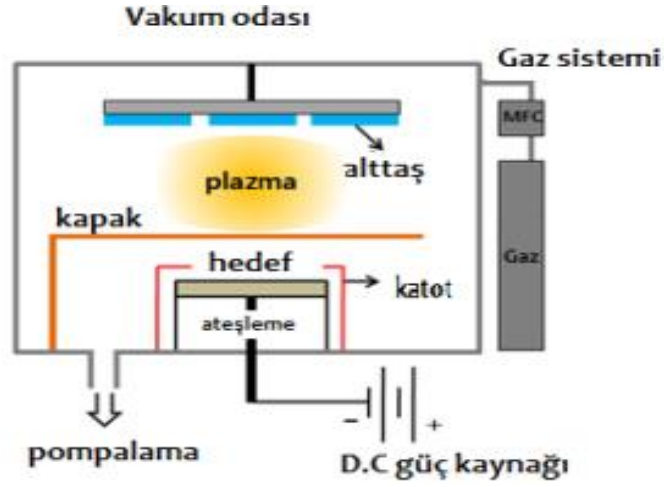
*Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Nanoteknoloji Laboratuvarı

3.1.1. Saçtırma teknikleri

Literatürde birçok saçtırma tekniği mevcuttur. Genellikle kullanılan güç kaynaklarının özelliklerine göre değişik saçtırma teknikleri ortaya çıkmaktadır. Doğru akım (DC) saçtırma, radyo frekansı (RF) saçtırma, magnetron saçtırma bunlardan bazılarıdır.

3.1.1.a. DC saçtırma

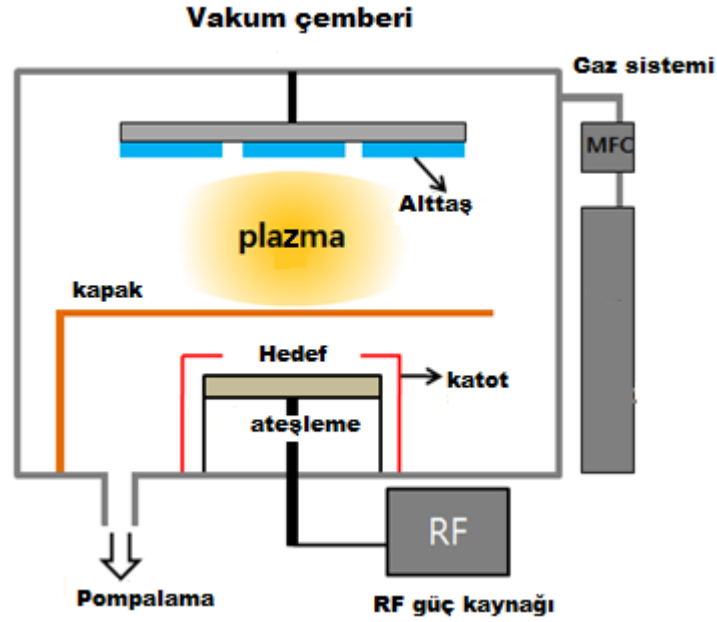
Vakumlanabilir bir ortamda iki paralel elektroda hedef ve alttaş yerleştirilir ve rotary-turbo pompa ikilisi ile ortam vakumlanır. Ön vakumlamanın tamamlanmasından sonra vakum odasına inert gaz gönderilir. Elektrotlara DC voltaj uygulanır. Serbest iyonlar ve/veya elektronlar ortamda oluşturulan elektrik alanı ile hızlandırılır ve Ar atomlarını iyonize ederler. Uyarılmış Ar atomları iyonlaşarak plazma oluşturur ve elektrik alandan kazandığı kinetik enerji ile hedefe doğru yönelerek hedeften nötral atomları ve ikincil elektronları koparır. Koparılan atomlar saçılarak alttaş üzerine birikir ve ince film oluşturur. İkincil elektronlar ise Ar atomları ile çarpışarak onları tekrardan iyonize eder ve bu şekilde devam eder (Chenn 2004). Katodun arka yüzeyi malzemenin zarar görmemesi açısından su soğutmalı olarak tasarlanır. Anot tarafı ise kaplanacak malzemenin özelliğine göre ısıtmalı olabilmektedir. DC saçtırma yönteminin zayıf yönü hem hedefin hem de alttaş malzemesinin iletken olma zorunluluğudur. Aksi halde katotta biriken yük Ar iyonlarının çarpmasını engelleyip saçtırma olayının durmasına neden olmaktadır.



Şekil 3.3. DC saçtırma tekniğinin şematik gösterimi (Anonymous 2014b)

3.1.1.b. RF saçtırma

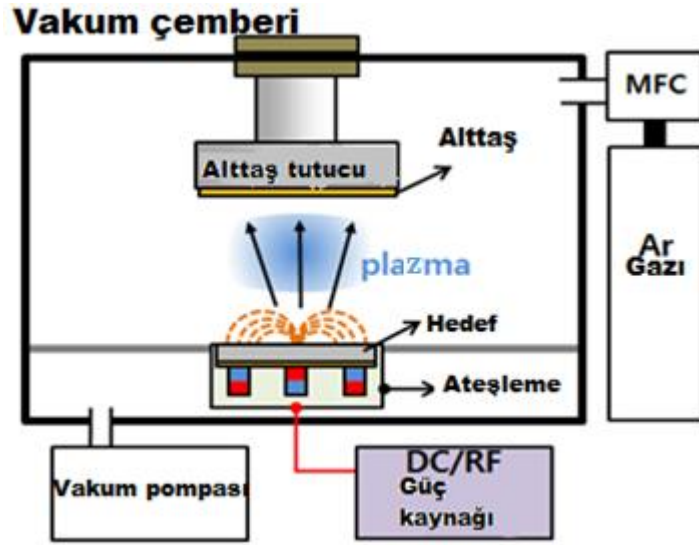
RF saçtırma tekniği iletken, yarıiletken ve yalıtkan malzemelerin kaplanmasında kullanılır. Hedef yüzeyindeki yük birikimi iletken olmayan malzemelerin saçtırılmasında DC metotların kullanılmasını kısıtlamaktadır. Fakat RF güç kaynağının saçtırma tekniklerinde kullanılması iletken hedef kullanma mecburiyetini ortadan kaldırmıştır. Her ne kadar RF saçtırma tekniğindeki kaplama hızı, DC saçtırmaya oranla daha düşük olsa da yalıtkanların RF saçtırma tekniğiyle daha iyi bir şekilde kaplanabilmesi bu tekniğin geniş bir alanda kullanımını sağlamıştır.



Şekil 3.4. RF saçtırma tekniğinin şematik gösterimi (Anonymous 2014b)

3.1.1.c. Magnetron saçtırma

Güç kaynağının cinsine bağlı olarak RF güç kaynağı kullanılıyorsa bu tür sistemler RF magnetron saçtırma, DC güç kaynağı kullanılıyorsa DC magnetron saçtırma adını almaktadır. Bu teknikte iyonlaşma oranını artırmak için tabii mıknatıslar ile hedefin yüzey normali doğrultusunda manyetik alan oluşturulur. Manyetik alan çizgisi boyunca elektronlar helezonik yörünge boyunca hareket ederler. Bu durumda plazma bölgesinde elektronların yolları uzadığı için hareketleri boyunca daha çok sayıda çarpışma yaparak plazma yoğunluğunu artırır. Bu sayede hedeften atom koparma işlemi daha yoğun bir şekilde gerçekleşir. İyonlaşma oranının artması ile daha düşük basınçlarda plazma oluşturulabilir.



Şekil 3.5. Magnetron saçtırma tekniğinin şematik gösterimi (Anonymous 2014b)

3.2. Litografi Tekniği

Litografi kelime anlamı olarak ışıkla yazma anlamına gelmektedir. Yarıiletken teknolojisinin gelişimiyle beraber litografi aşamalarının kullanımlarında önemli ilerlemeler olmuştur. Litografi ışıkla yapılabildiği gibi elektron demetini yönlendirerek maskesiz ya da başka yöntemlerle de yapılabilir. Başlıca litografi teknikleri ise;

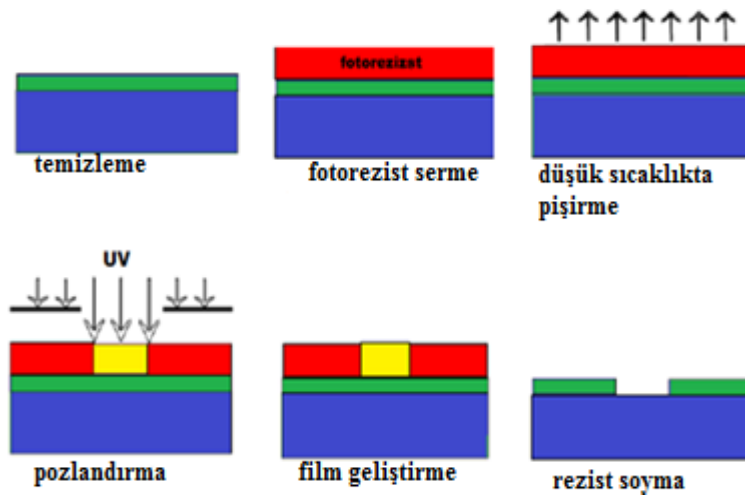
- Fotolitografi (Optik, UV, EUV)
 - E-demet/ İyon demeti/ Nötr atomik demet litografi
 - X- ışını litografi
 - Girişim litografi
 - Taramalı sonda litografi
-
- ✓ Gerilim darbesi
 - ✓ CVD
 - ✓ Yerel elektro kaplama
 - ✓ Dip-pen

Bu tekniklerden çoğunlukla fotolitografi tekniği kullanılmaktadır. Fotolitografide ise UV litografi en çok tercih edilen tekniktir. Biz de çalışmamızda bu tekniği kullandık.

3.3. Fotolitografi

Fotolitografi ışığa duyarlı fotorezistin kontrollü olarak ışık ile pozlandırılması sonucu maskedeki patternin numune yüzeyine transferidir. Bir fotolitografi işlemi şu basamaklardan oluşmaktadır.

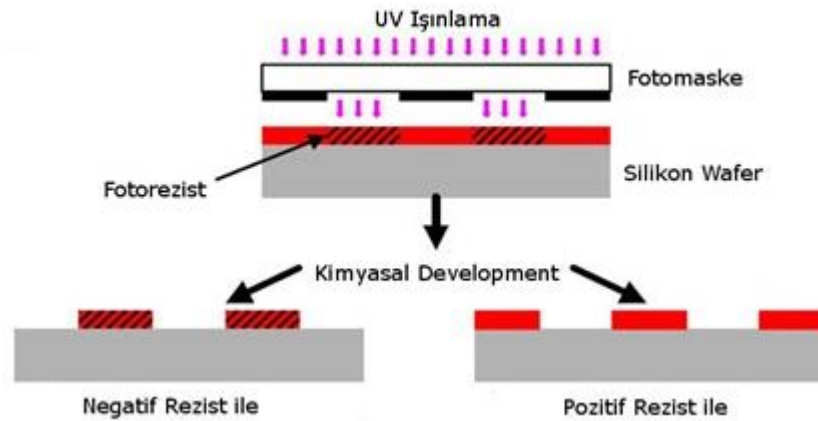
- Temizlik ve yüzey hazırlama
- Fotorezist serme
- Düşük sıcaklıkta pişirme (70°C)
- Hizalama ve pozlandırma
- Film geliştirme
- Yüksek sıcaklıkta pişirme (120°C)
- Rezist soyma
- Son kontrol



Şekil 3.6. Fotolitografi tekniğinin şematik gösterimi (Anonim 2014b)

3.4. Lift-Off Tekniği

Araştırmacılar için yeni malzemelerin desenlendirilmesinde kimyasal işlemlerde ortaya çıkabilecek sınırlamalardan dolayı geleneksel litografi ve aşındırma tekniklerini kullanarak yapmak kolay değildir. Lift-off doğrudan patern transferi özelliği ile aygıt tasarımında yaygın ve kolay bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Yüzey üzerine film kaplanmadan önce kaplanacak yüzeyin temizliği yapılır. Daha sonra fotorezist kaplanarak geçici ince film oluşturulur. Daha sonra yumuşak pişirme yapılır. Yumuşak pişirme; fotorezist düşük sıcaklık ve kısa zaman aralığında ısıtılmasına tabi tutulmasıdır. Burada ki amaç yapışmanın iyileşmesini sağlamak, homojenliğin sağlanması ve aşındırmaya karşı direncin iyileşmesini sağlamaktır. İki çeşit fotorezist mevcuttur. Bunlar negatif ve pozitif fotorezisttir. Negatif fotorezist maske üzerinde ki desenin tersinin basılmasını sağlayan fotorezist, pozitif fotorezist ise maske üzerine ki desenin aynısının basılmasını sağlayan rezisttir. Kullanılan fotorezisti de uygulayacağımız desen ve tekniğe göre seçebiliriz. Negatif fotorezistler ışık gördüğünde polimer zinciri oluştururken, pozitif fotorezistte ise polimer zincirleri ışık gördüklerinde kırılırlar.



Şekil 3.7. Pozitif ve negatif fotorezist ile maske aktarımı (Anonim 2014c)



Şekil 3.8. Hizalama ve pozlandırma cihazı

*Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Nanoteknoloji Laboratuvarı

Lift-off sürecinde film altındaki geçici tabaka çözücü yardımıyla kaldırılır ve süreç başında yüzeye biriktirilen film kalır. Aslında geleneksel olarak bu işlemi yapmak için 3 metot vardır (Lee and Yoon 2005)

- Tek tabaka metodu (Single Layer Method).
- Çok Tabaka Metodu (Multi-Layer Method)
- Modifiye Edilmiş Yüzey Metodu (Surface Modified Method)

3.4.1. Tek tabaka metodu

Tek tabaka, en basit ve tek bir litografi aşamasının kullanılarak yapıldığı metottur. Genellikle negatif fotorezist kullanılır. (Lee and Yoon 2005). Ancak bu metot, fotorezistin hassas proses şartları, metal yüzeyden zor çıkarılması ve metal yüzeyinde pürüzlü yan duvarların oluşması istenmeyen bir durumdur (Lee and Yoon 2005).

3.4.2. Çok tabaka metodu

Bu metot tek tabaka metoduna göre ilave polimit serme ve daha sonraki aşındırma adımlarından dolayı daha yüksek imalat maliyetine ve işlem karmaşıklığına sahiptir. Dahası polimit denemeleri O_2 ile reaktif iyon aşındırmaya tabi tutulursa altlık üzerinde cam benzeri ince bir film kalıntısı oluşabilir. Kalıntı olarak oluşan bu ince filminden kurtulmak için nitrik asit çözeltisinin buharıyla ve hidroflorik asit ile yüzeye metal depolama işlemi öncesinde, temizleme yapılmalıdır (Lee and Yoon 2005).

3.4.3. Modifiye edilmiş yüzey metodu

Modifiye edilmiş yüzey metodunda ise; üstte kalan rezist tabakasının altta kalan rezist tabakasından daha yavaş bir oranda gelişmesini sağlamak için kimyasal işleme tabi tutulur. Fotorezisti serme ve pozlandırma sonrası chlorabenzen içinde kısa bir süre bekletilerek yüzeyde film geliştirme çözeltisi içinde tabana göre zor gelişen ince bir tabaka oluşturulur. Ancak bu kimyasal maddelerin kullanımı sağlık açısından zararlı olduğu bilindiğinden bu metodun kullanımı sınırlıdır.

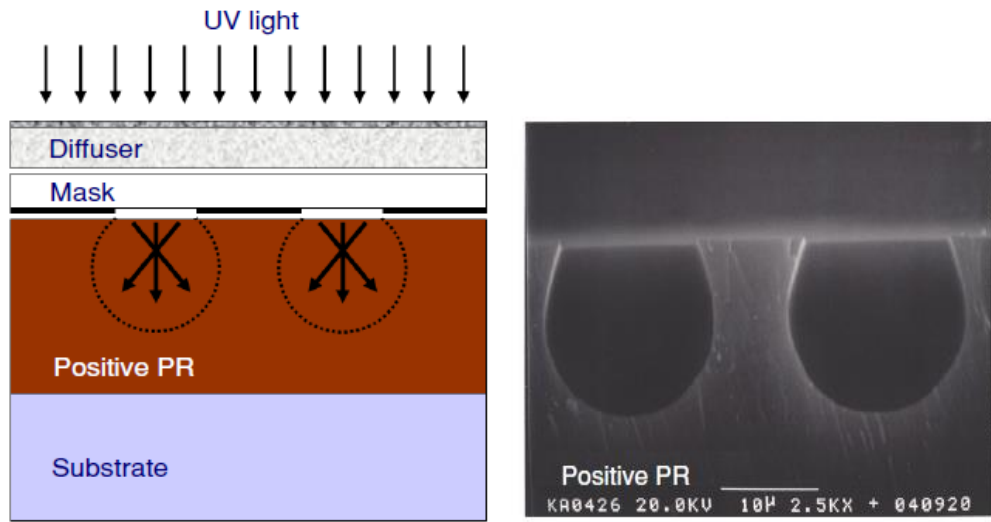
3.5. Dağıtıcı Litografi (3D Litografi)

Bu litografi tekniği son zamanlar da 3D mikro yapıların oluşturulması amacıyla çok tercih edilen bir litografi tekniğidir. 3D litografi hassas ve doğrudan litografi olarak da tanımlanabilir.

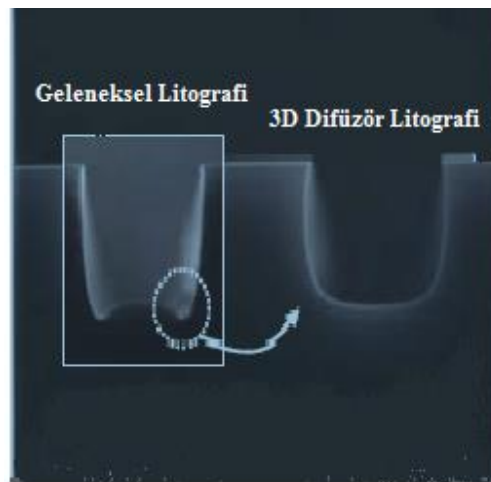
3D litografi tekniği; geleneksel optik litografi tekniğine ilave olarak maske ile UV ışık kaynağı arasında maskenin hemen üzerine difüzör kullanılarak gerçekleştirilir. Bu malzeme üzerinden gönderilen ışıkla pozlandırma yapıldıktan sonra yüzey üzerinde oluşturulan şekiller geleneksel litografiden farklı olarak köşeli değil eliptik ya da daireseldir. 3D litografi tekniğinde pozitif fotorezist kullanılabilen ve buda basit, ekonomik ve etkili bir proses yapılmasına olanak sağlamaktadır. Pozitif fotorezist

kullanmanın diğ er bir yararı ise yüzeyden kolay kaldırılabilmesi ve d    k i  lem sıcaklığı nedeniyle t mle  ik devrelerle uyumlu olmasıdır (Lee and Yoon, 2005).

Bu tekniğin 3 önemli avantajı bulunmaktadır. İlk olarak prosesin uygulanması çok basittir, ikinci olarak oluşturulan şekillerin kontrolü proses parametreleri değiştirilerek hassas bir şekilde tekrarlanabilir ve son olarak da mikrolens fabrikasyonunda %100 l k bir oranla fabrikasyonun yapılabilmesine olanak vermektedir.



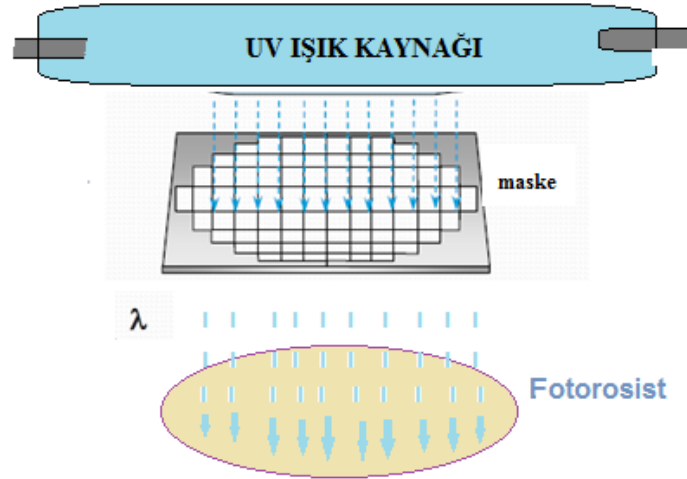
Şekil 3.9. Pozitif fotorezistle dairesel ya da eliptik proseslerin oluşturulması (Lee and Yoon 2005)



Şekil 3.10. Geleneksel ve 3D difüzör litografi (Chang and Yoon 2005)

3.6. Hizalama ve Pozlama

Rezist kaplanan dilim üzerine maske görüntüsünün aktarılması işlemidir. UV ışık altında fotorezist bileşenlerinin aktif hale getirilmesi sağlanarak pozlandırma işlemi gerçekleştirilir. Bu işlemin ardından malzeme banyo yaptırılarak fotorezistin çözülebilen kısımları banyoda çözülür ve dilimin üzerinde desenler görülür. Banyo sonrası tekrar pişirme yapılabilir. Buda yapışmayı sağlar ve fotorezistin kalan çözücüsünün buharlaştırılması sağlanır. Sıcaklık olarak yumuşak pişirmeden daha yüksek sıcaklıkta yapılmaktadır.



Şekil 3.11. Hizalama ve pozlandırma (Anonim 2014f)

3.7. Aşındırma Süreçleri

Yüzey üzerine fotorezist serip ardından maske ve fotolitografi işleminin ardından maskenin kaldırılmasıyla birlikte rezist tabakasında oluşan pencerelerden kaldırılmak istenen tabakanın kaldırılması eksiltici yöntem olarak adlandırılır. İki temel eksiltme yöntemi mevcuttur.

- Islak asit aşındırması (Wet Etching)
- Kuru plazma aşındırması (Plasma Etching)

3.7.1. Islak asit aşındırması

Aşındırma işleminin reaktif bir kimyasal sıvı içerisinde gerçekleştirilmesi işlemidir. Aşındırma sırasında kimyasal reaksiyon olayı meydana gelmektedir. Islak aşındırma metodu en kolay aşındırma metodudur. Daldırma ya da spreyleme ile yapılabilir Bu metotta önemli olan malzeme için uygun çözücünün seçimidir. Aşındırma da önemli noktalar ise;

- Kristalin yapısal özelliklerine (morfoloji, yönelim, vb.)
- Sıcaklığa
- Çözücünün içeriğine
- Aşındırma zamanına bağlıdır.

Aşındırma da iki durum söz konusudur. İzotropik ve anizotropik aşındırma;



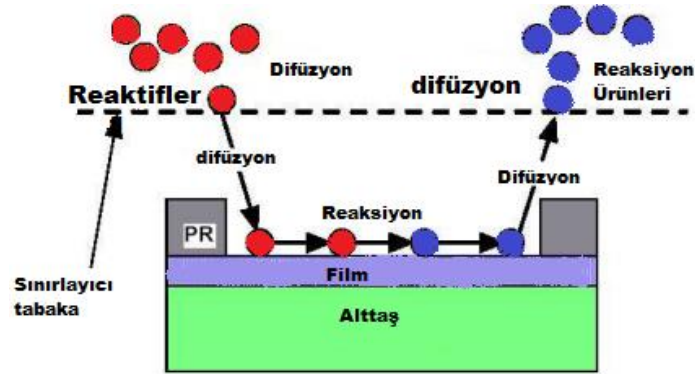
Şekil 3.12. İzotropik ve Anizotropik aşındırma (Nayak 2012)

3.7.2. Kuru aşındırma

Islak aşındırmanın kendine has bir takım aşındırma problemlerinin çözümü için kuru aşındırma tercih edilmektedir. 3 ana başlık altında incelenebilir.

- Fiziksel kuru aşındırma
- Kimyasal kuru aşındırma
- Reaktif iyon aşındırma (RIE)

Plazma sistemlerinde; bir vakum çemberi içerisine aşındırılmak istenen malzeme koyularak sistem vakuma alınır. Uygun vakum seviyesine ulaştığında ortama gaz gönderilir ve gerilim uygulanarak plazma oluşturulur. Oluşan plazma da ki iyonlar hedef malzemeye yönlendirilerek yüzeyden atom sökölür. Bu işlemede plazma aşındırma ya da kuru aşındırma denilir (Verdonck 2011).



Şekil 3.13. Plazma aşındırma (Anonim 2014g)

3.8. Termal Buharlaştırma

Kaplanacak olan malzeme erime sıcaklığı yüksek olan bir potanın içine yerleştirilir ve filmin birikeceği altlıkta potadan belli bir uzaklıkta yerleştirilir. Altlığın flamana dönük yüzeyine mümkün olduğu kadar yakın olacak şekilde istenilen geometrik biçimde film kaplamasını sağlayan gölge maske de yerleştirilebilir. Buharlaştırma sisteminde sistemin havası boşaltılır. Vakum 10^{-6} Torr veya daha düşüğü elde edilebilir. Potanın bulunduğu flamandan yüksek akım geçirilerek potanın ısınması sağlanır böylece potadaki malzeme yüksek ısıyla erime sıcaklığına ulaştığında buharlaşır ve hedef malzeme kaplanmış olur.



Şekil 3.14. Termal buharlaştırma sistemi

*Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Nanoteknoloji Laboratuvarı

3.9. Termal Oksidasyon

Termal oksidasyon mikro elektronik ve mikro işlemci teknolojisinde oldukça önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada silikon yüzey üzerinde oksit tabakası oluşturmak amacıyla atmosfer basıncında gaz altı tavlama fırınından yararlanılmıştır. Üç ayrı bölümden oluşan fırın 1100°C'ye kadar çıkmaktadır. Fırının her bölümü için ayrı ayrı sıcaklık kontrolü yapılabilmektedir. Fırının her iki ucuda açık olan bir tüp şeklindedir. Bu yapı sayesinde de ısıtılma sırasında malzemenin hava ile temasını engelleyerek istenilen gaz ile (bu çalışmada O_2 kullanıldı) ısıtılma tabi tutulabilmesi sağlanabilmektedir. Oksit kalınlığı oksitlenme süresine ve fırının sıcaklığına bağlılık göstermektedir.



Şekil 3.15. Oksitlemek için kullanılan fırın

*Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Nanoteknoloji Laboratuvarı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Isıl işlemin ve Tarama Hızının Memristiv Özelliğe Etkisinin İncelenmesi

Bu çalışmada RF magnetron saçtırma yöntemi kullanılarak memristiv davranış gözlenmesi amacıyla Al/TiO₂/Ti/p⁺⁺Si yapısı tasarlandı. Büyütme sırasında tüm parametreler sabit tutuldu. Büyütme parametreleri Çizelge 4.1’de verilmektedir.

Çizelge 4.1. Al/TiO₂/Ti/p⁺⁺Si yapısına ait büyütme parametreleri

Altlık	Hedef	Sıcaklık(C)	Vakum(Torr)	RF(W)	rpm	Ar(ccm)	O ₂ (ccm)	Kalınlık (Å°)	İlk Vakum Son Vakum
Si	Ti	37	5.36 x10 ⁻³	140/150	4	20/19	-	60	2x10 ⁻⁶
Si/Ti	Ti	37	5.47x10 ⁻³	140/125	4	20/19	0.46/0.36	100	3.2x10 ⁻⁶

Yukarıdaki parametrelerle yaklaşık olarak 3 saat 13 dk da büyütülen filme kontak olarak Al metalizasyon yapıldı. Daha sonra bu numunenin iki farklı noktasında 6 ayrı tarama hızında I-V ölçümleri alınarak numunenin karakteristiğine bakıldı ve grafikleri aşağıdaki gibi elde edildi. Ayrıca numunenin memristiv özelliğinin ısıl işlem ile değişimini incelemek içinde numune 400°C’de Ar gazı altında 15 dk ısıl işleme tabi tutularak, memristiv özelliği artırması beklendi ve farklı tarama hızlarında I-V özelliği incelendi. Çizelge 4.2’de I-V ölçüm parametreleri verilmektedir.

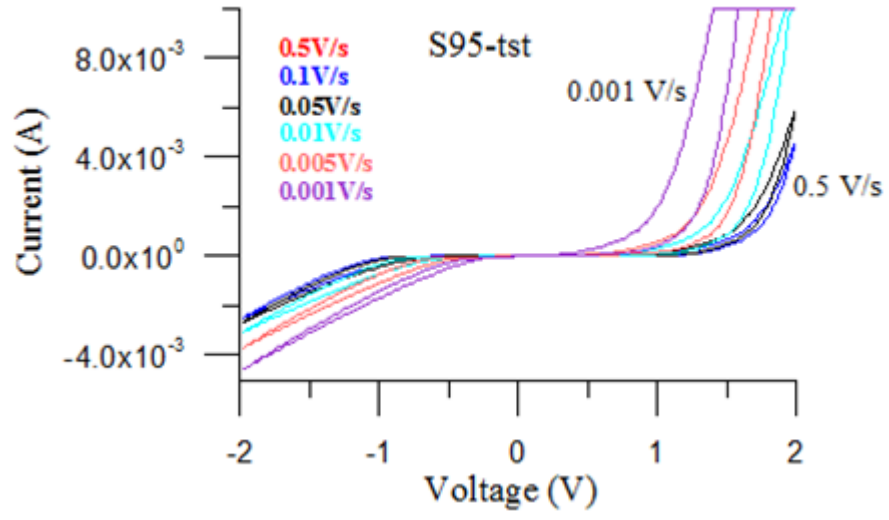
Çizelge 4.2. I-V ölçüm parametreleri

Proses Kodu	Tarama Hızı (V/s)	Tarama Aralığı (V)	Döngü Sayısı
S95a	0.5	-2V/+2V	1
S95b	0.1	-2V/+2V	1
S95c	0.05	-2V/+2V	1
S95d	0.01	-2V/+2V	1
S95e	0.005	-2V/+2V	1
S95f	0.001	-2V/+2V	1

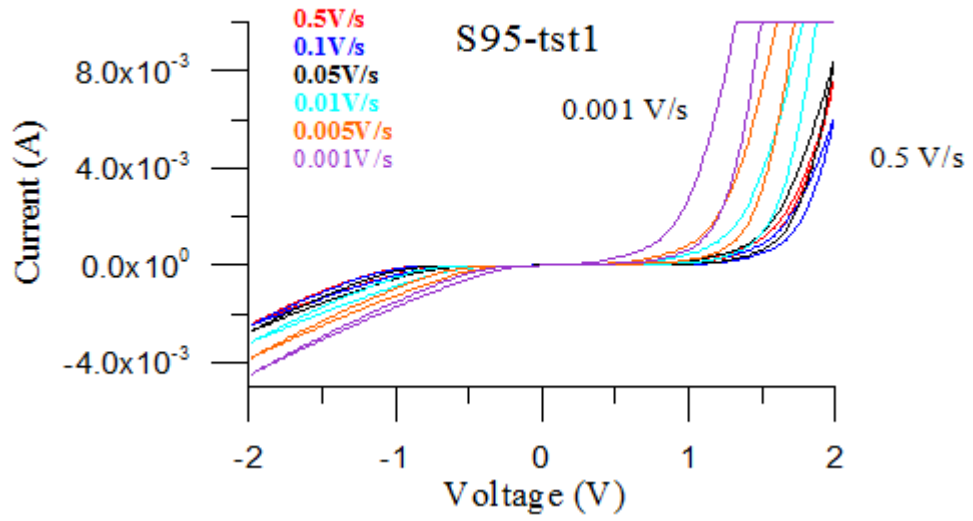
**Şekil 4.1.** I-V ölçüm için prob istasyonu

*Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Nanoteknoloji Laboratuvarı

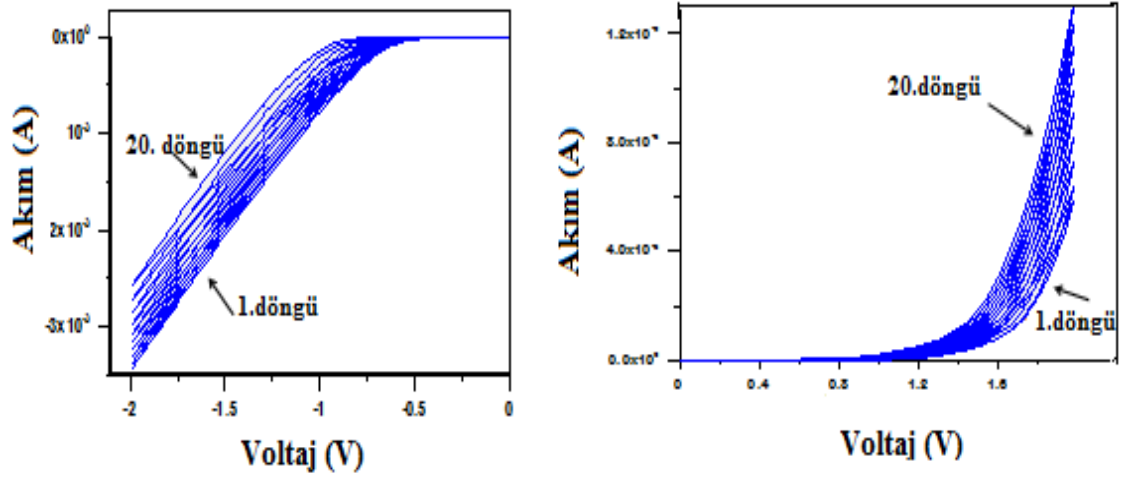
Ölçümler Nanoteknoloji laboratuvarında bulunan prob istasyonunda, oda sıcaklığında, Keithley 2400 ile gerçekleştirildi.



Şekil 4.2. Farklı tarama hızlarında memristiv davranış



Şekil 4.3. 400°C’de ısıtıl işlem görmüş numunenin memristiv özelliğinin farklı tarama hızlarında incelenmesi



Şekil 4.4. S95-tst numunesine ardışık 20 döngü ile I-V ölçümü

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi büyütülen ince filmde farklı tarama hızlarına bağlı olarak yapılan I-V ölçümlerinde memristiv özellik gözlenmiştir. I-V karakteristiği başlangıç şartlarına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Tarama hızının azalmasına bağlı olarak iletkenlik artmıştır.

Şekil 4.3’ye bakıldığında 400°C’de ısıtılma işlemi yapmanın memristiv davranış üzerinde önemli bir etki yapmadığı görülmektedir.

Şekil 4.4’de ise ardışık 20 döngü ile yapılan I-V ölçümünde 0.1 V/s tarama hızı ve +2V/-2V tarama aralığında memristiv davranış sergilemekte olduğu görülmektedir.

4.2. TiO₂ İnce Filmlerde Altık Sıcaklığının Memristiv Davranış Üzerine Etkisi

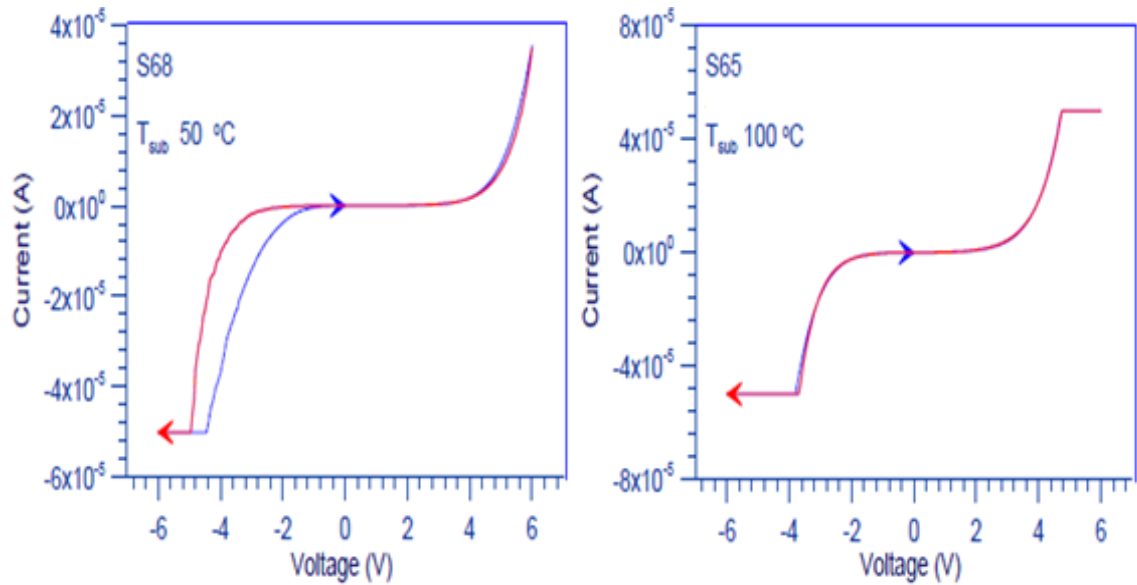
Bu çalışmada RF magnetron saçırma kullanılarak TiO₂ ince filmler hazırlandı. Burada değişken parametre olarak ince filmin altık sıcaklığı seçildi. Büyütme sırasında kullanılan diğer parametreler sabit tutuldu. Parametrelere ait değerler Çizelge 4.3’te verildi.

Çizelge 4.3. TiO₂ ince film büyütme parametreleri

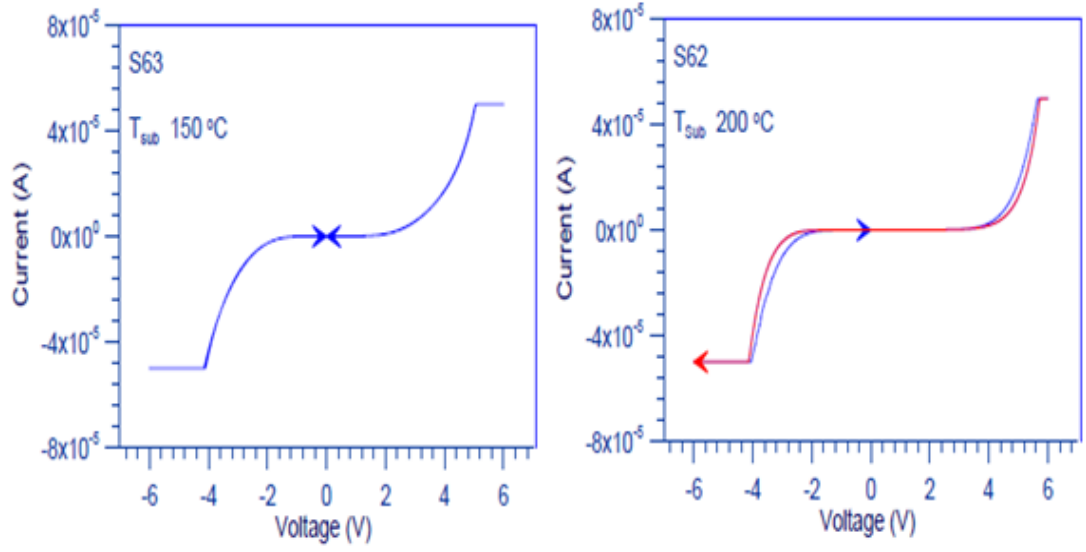
Alttaş Malzeme	Hedef	RF(W)	Kalınlık(nm)	Alttaş Bias	Ar (sccm)	O ₂ (sccm)	rpm
p++Si	Ti	120	20	-20	15/15	0,4	4

Büyütme sırasında alttaş sıcaklığı 50°C'den 400°C'ye, 50°C farklarla artırılarak alttaş sıcaklık değişiminin memristiv özelliğe etkisi incelendi. Film kalınlığı kuvarz kalınlık ölçer ile 20 nm de sınırlandırıldı. Kontak için 0.5 mm çapında gölge maske kullanılarak termal buharlaştırma ile Al metalizasyon yapıldı.

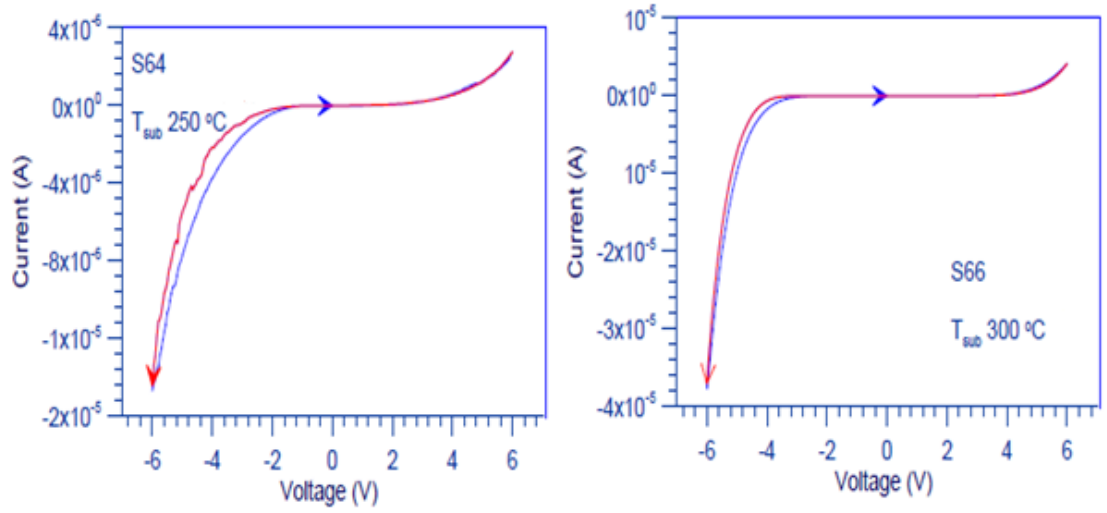
I-V ölçüm yine oda sıcaklığında prob istasyonuyla alındı ve memristiv özelliğin ısıtıl işlem sıcaklığı ile değişimi incelendi. Bu ölçümlerde tarama hızı 50 mV/s dir.



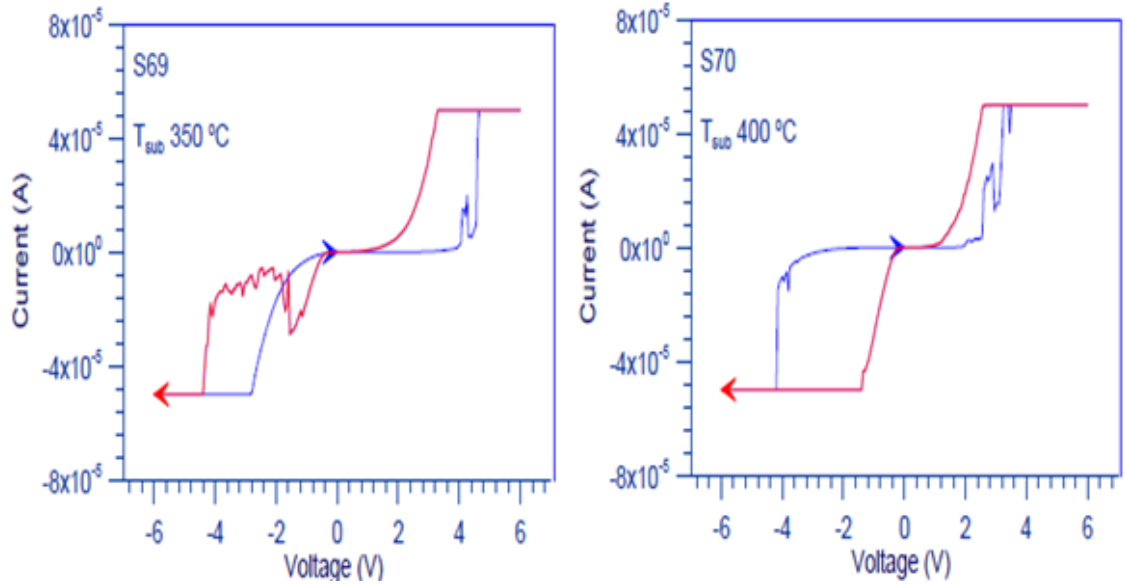
Şekil 4.5. Alttaş sıcaklığı 50°C ve 100°C olan numuneler ait I-V grafiği



Şekil 4.6. Altlık sıcaklığı 150°C ve 200°C olan numunelere ait I-V grafiği



Şekil 4.7. Altlık sıcaklığı 250°C ve 300°C olan numunelere ait I-V grafiği



Şekil 4.8. Altlık sıcaklığı 350°C ve 400°C olan numunelere ait I-V grafiği

Yaptığımız ölçümlerde oluşturulan $\text{Al/TiO}_2/\text{p}^{++}\text{Si}$ yapısında memristiv davranışın var olduğu görülmektedir. I-V ilişkisinde simetrik olmayan davranışın olması başlangıç şartlarından kaynaklanıyor olabilir. Alttaş sıcaklığı 50°C’de olan numunede memristiv davranış zayıf olarak görülürken, 100-150°C altlık sıcaklığındaki numunelerde görülmemektedir. 250-300°C altlık sıcaklığındaki numunelerde ise simetrik olmayan davranış daha da belirginleşmiş durumdadır. 350-400°C’de ise memristiv davranış belirginleşirken, ani akım değişimleri de görülmektedir.

4.3. +Q ve -Q Yüklerinin Hesaplanması ve Buna Bağlı Olarak Memristiv Davranışın İncelenmesi

Farklı parametreler ile oluşturduğumuz farklı numunelerin, memristiv özelliklerini incelemek için amacıyla RF magnetron saçırma ile yapılar ürettik. Üretilen numunelerin nanoteknoloji laboratuvarımızda bulunan I-V ölçüm sistemiyle ölçümleri yapıldı ve elde edilen veriler ile grapher 7 programında I-V grafikleri çizilerek memristiv davranışları incelendi. Daha sonra elde ettiğimiz bu veriler yardımıyla +Q ve -Q yükleri hesaplanarak net Q yük değişimine bağlı olarak memristiv değişim incelendi.

+Q ve -Q değerlerinin hesaplanması;

$$I = dQ/dt \quad (4.1)$$

formülünde t_i ve t_s zaman aralıklarına bağlı olarak Q yükü denklem 4.2'deki gibi hesaplandı.

$$Q = \int_{t_i}^{t_s} I dt \quad (4.2)$$

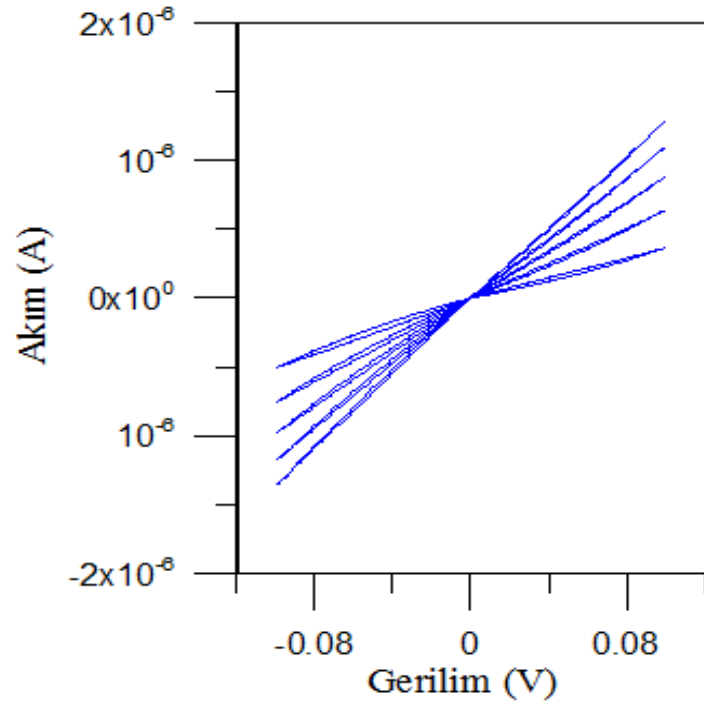
Hesaplanan Q değerlerinin döngü sayısına bağlı olarak grafikleri çizildi ve memristiv özellikleri incelendi.

Bu amaçla üretilen numuneler; S97, S98, S100,S102, S110, S111, S114'dür. Bu numuneler için ölçümler tekrarlanarak farklı isimlerle kodlanmıştır.

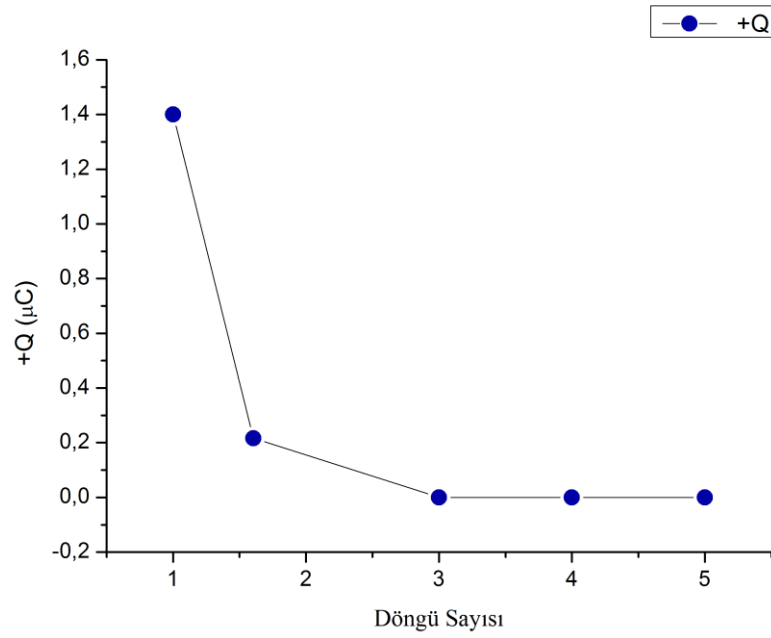
Çizelge 4.4. S97 numunesine ait parametreler

Alttaş Malzeme	Hedef	Altlık Sıcaklık	RF(W)	Kalınlık (Å)	Ar (ccm)	O2 (ccm)	rpm
p++Si	Ti	39	140	60	20	-	4
Ti/Si	Ti	39	87	100	20	0.5	4

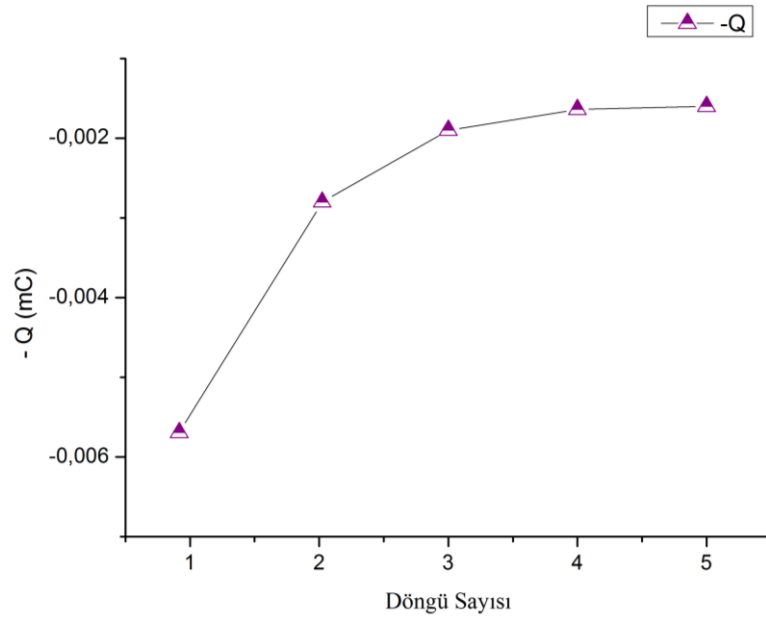
(S97_nokta_5b) ölçümüne ait I-V ve +Q ve -Q grafikleri;



Şekil 4.9. (S97_nokta_5b) ölçümüne ait I-V grafiği



Şekil 4.10.a. (S97_nokta_5b) ölçümüne ait +Q grafiği

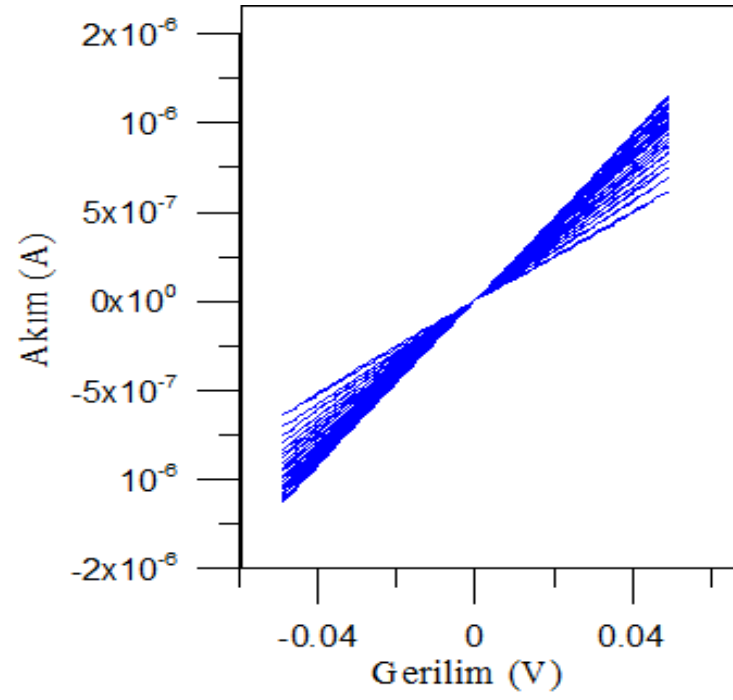


Şekil 4.10.b. (S97_nokta_5b) ölçümüne ait -Q grafiği

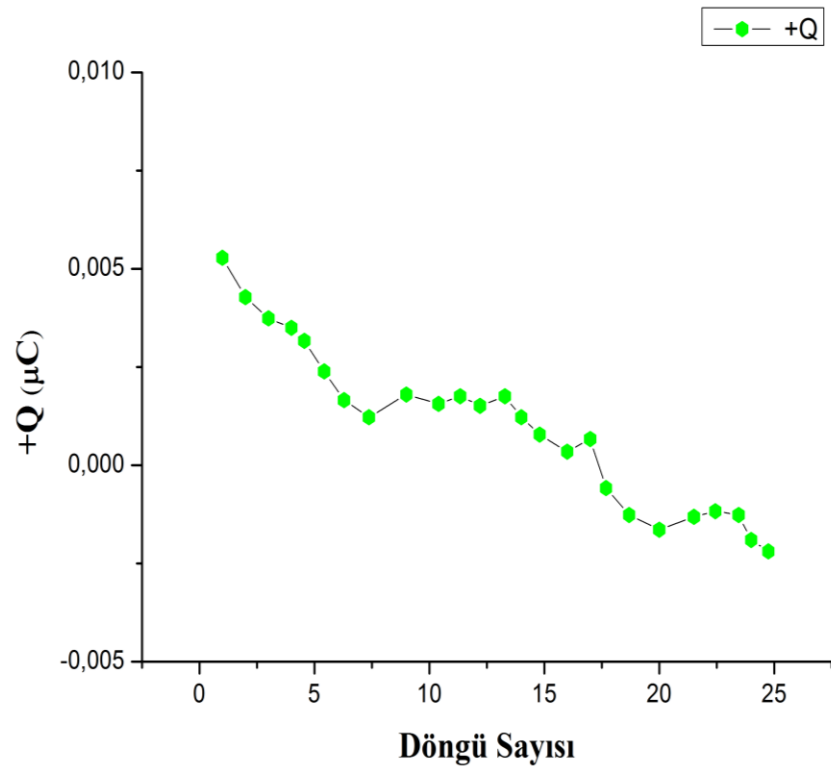
Çizelge 4.5. S98 numunesine ait parametreler

Alttaş Malzeme	Hedef	Altlık Sıcaklık	RF(W)	Kalınlık (Å)	Ar (ccm)	O2 (ccm)	rpm
p++Si	Ti	39	150	50	20	-	4
Ti/Si	Ti	40	90	100	20	0.5	4

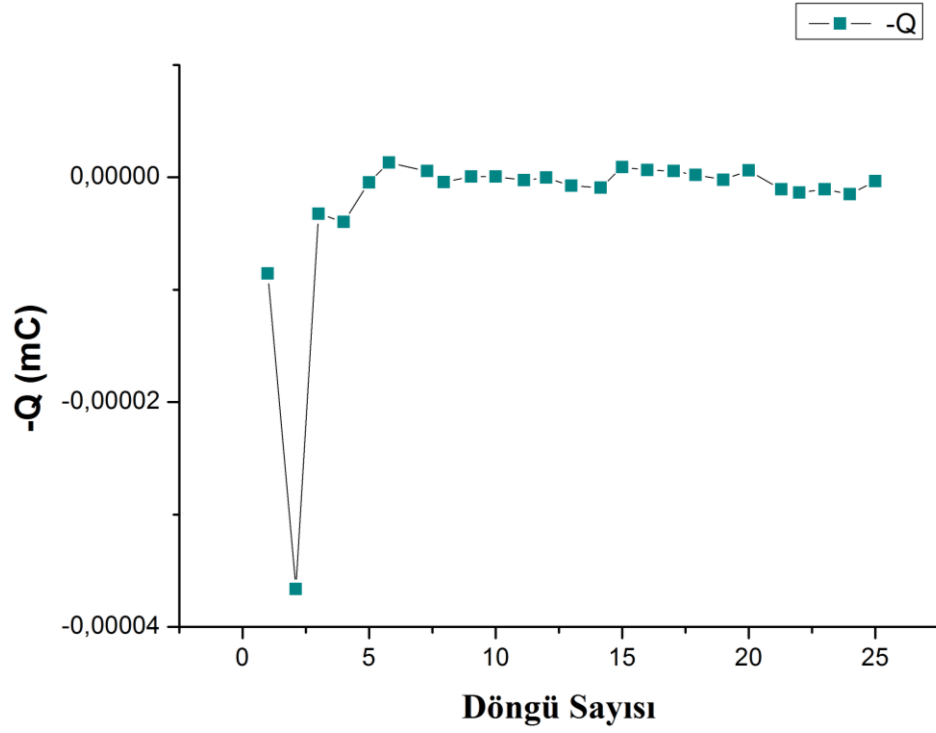
(S98_nokta_11a) ölçümüne ait I-V ve +Q ve -Q grafikleri;



Şekil 4.11. (S98_nokta_11a) numunesine ait I-V grafiği



Şekil 4.12.a.(S98_nokta_11a) ölçümüne ait +Q grafiği



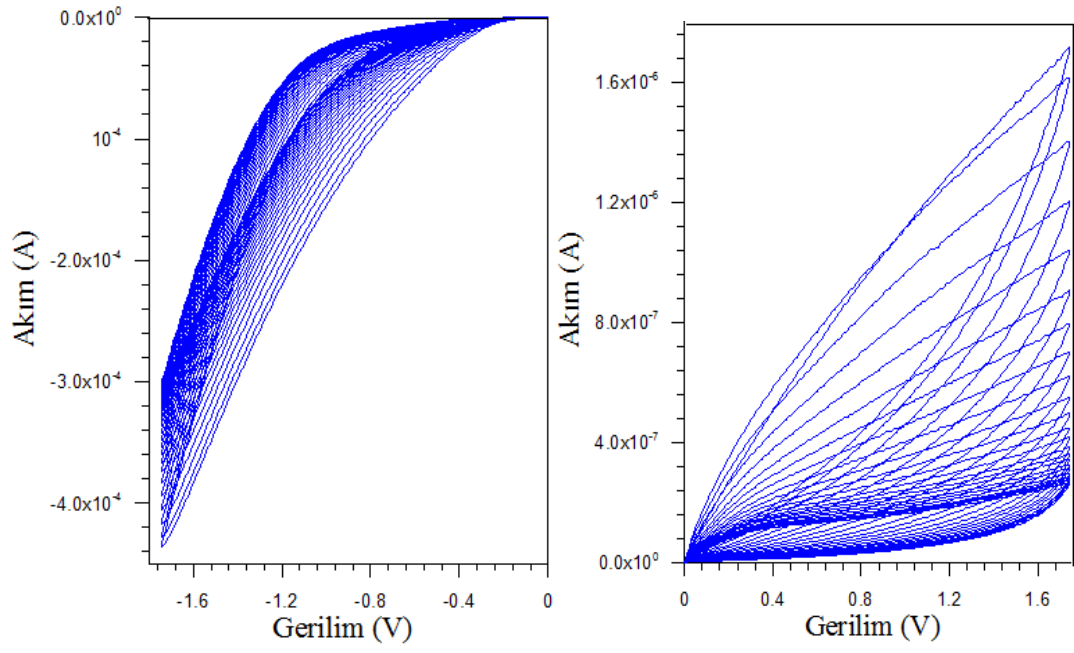
Şekil 4.12.b. (S98_nokta_11a) ölçümüne ait -Q grafiği

S97 numunesinde görülen lineer ilişki S98 numunesinde de görülmektedir.

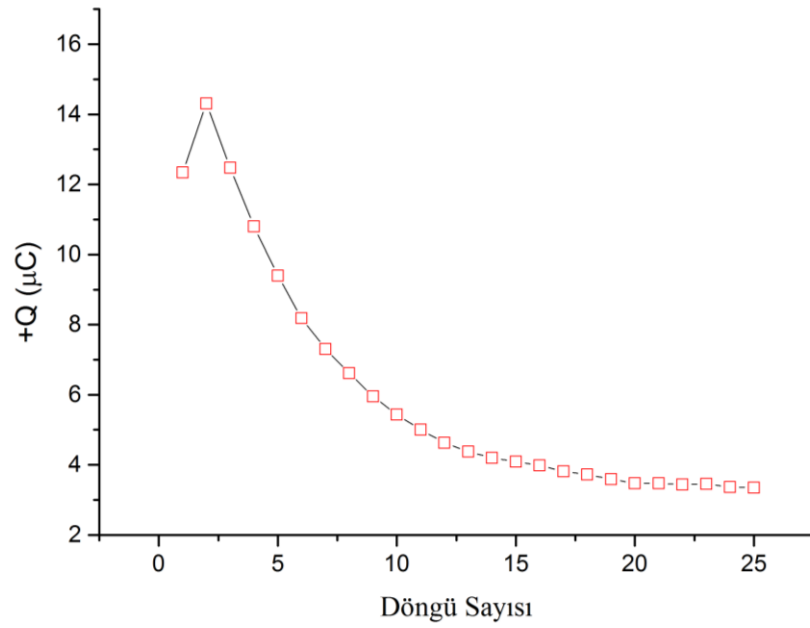
Çizelge 4.6. S100 numunesine ait parametreler

Alttaş Malzeme	Hedef	Altlık Sıcaklık	RF(W)	Kalınlık (Å)	Ar (ccm)	O2 (ccm)	rpm
p++Si	Ti	42	100	100	20	-	4
Ti/Si	Pt	38	150	20	20	-	4
Pt/Ti/Si	Ti	38	90	100	20	0.5	4

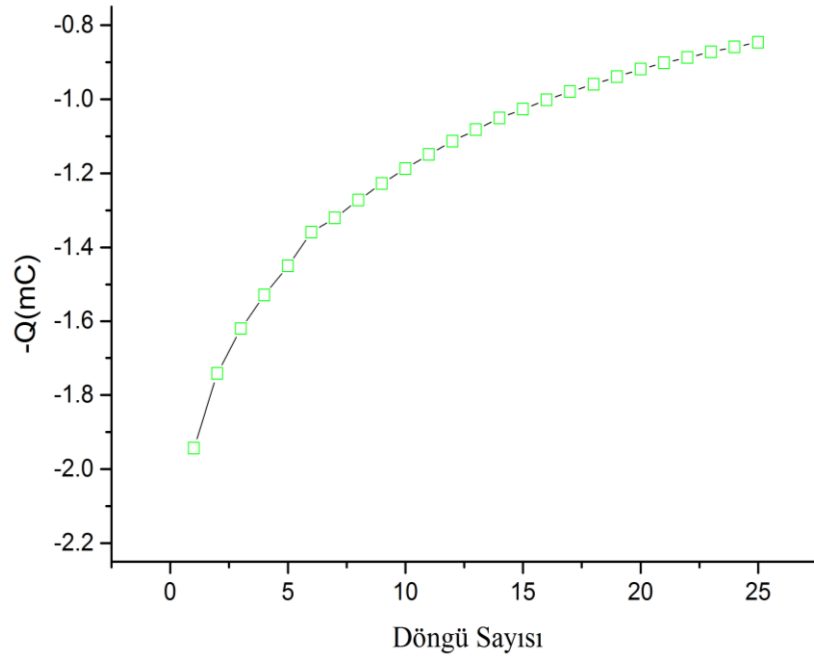
(S100_2c) ölçümüne ait I-V ve +Q ve -Q grafikleri



Şekil 4.13. (S100_2c) ölçümüne ait negatif ve pozitif bölgede I-V grafikleri



Şekil 4.14.a. (S100_2c) ölçümüne ait +Q grafiği

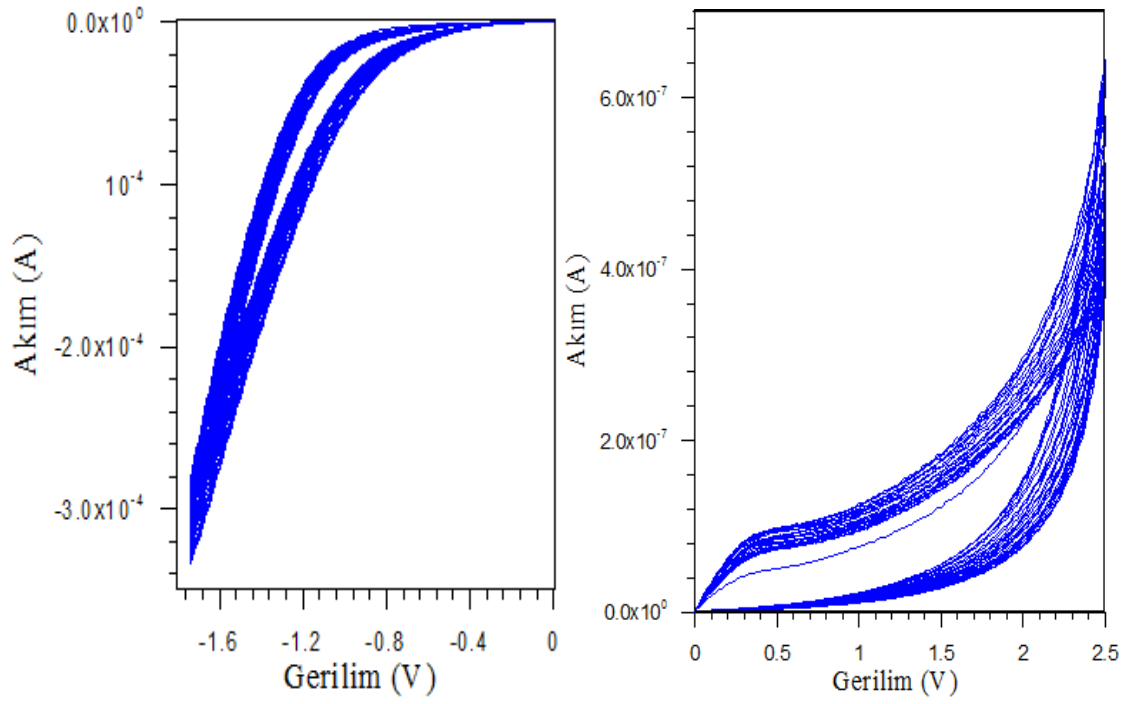


Şekil 4.14.b. (S100_2c) ölçümüne ait +Q grafiği

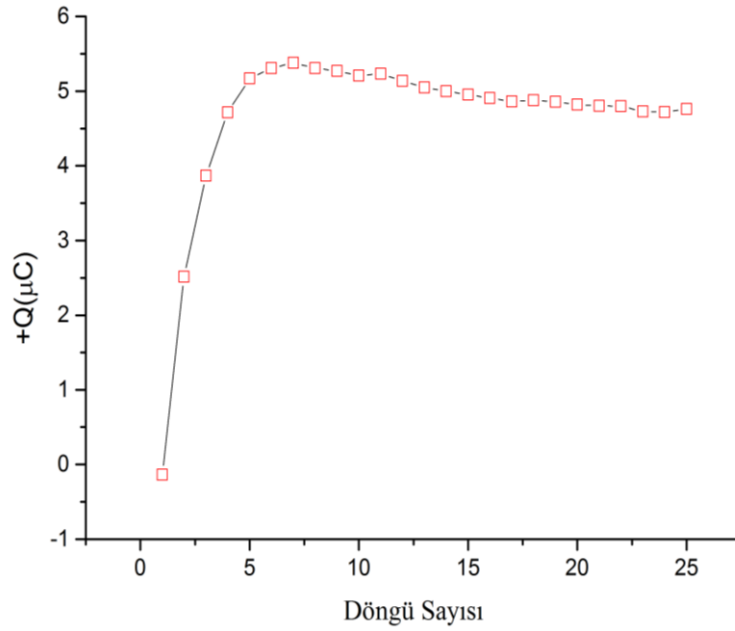
Pt kontak yapılan S100 numunesi ± 1.75 V aralığında 0.1 V/s aralığında 25 döngü ile tarandı ve Şekil 4.13'deki I-V grafiği elde edildi. Grafikte memristiv yapının oluştuğu görülmektedir. Yine döngü sayısı arttıkça direnç artmasına bağlı olarak akım azaldığı görüldü. Formül 4.2'ye bağlı olarak +Q yükü azalmış -Q yükü artmıştır.

Akımdaki bu değişikliğin süreklilik arz edip etmediğini anlamak için ölçümler 25 döngü için 5 defa farklı tarama aralıklarında tekrar edilmiştir.

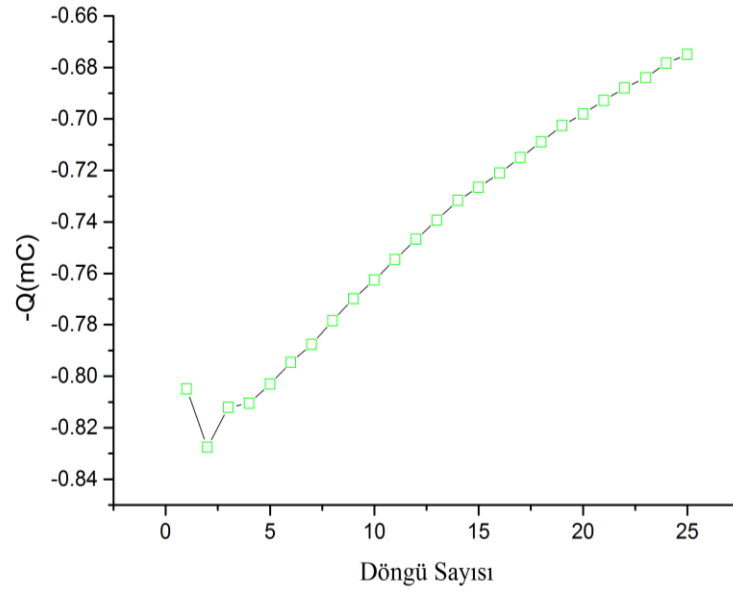
(S100_2d) ölçümüne ait I-V ve +Q ve -Q grafikleri;



Şekil 4.15. (S100_2d) ölçümüne ait negatif ve pozitif bölgede I-V grafikleri

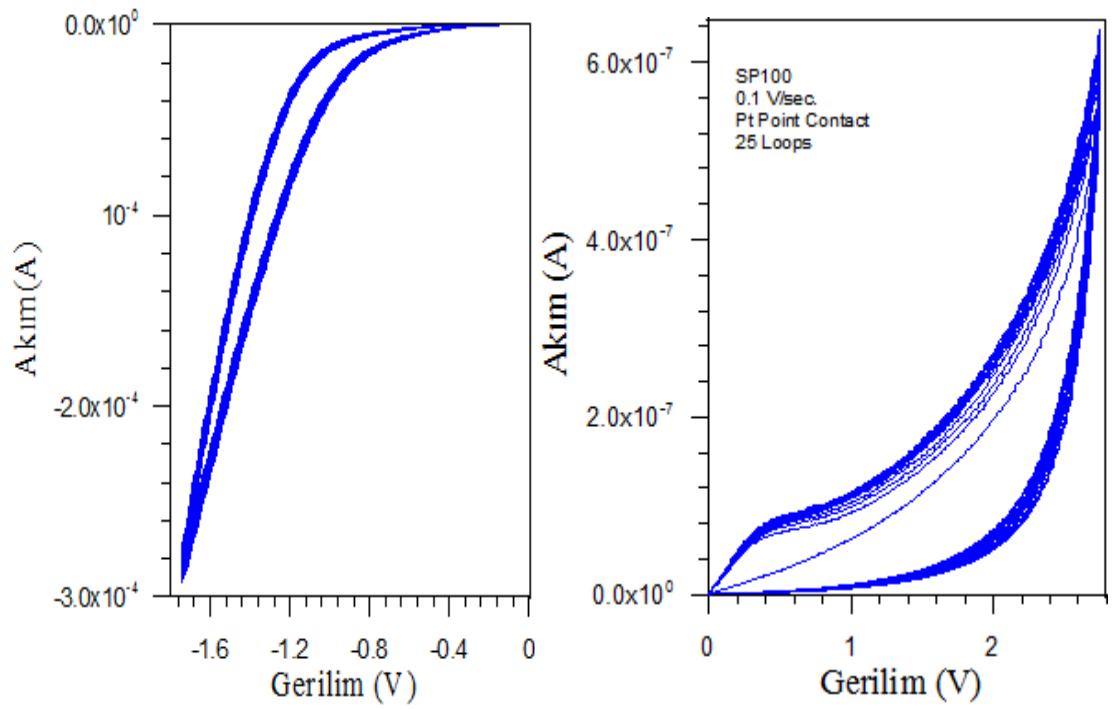


Şekil 4.16.a. (S100_2d) ölçümüne ait +Q grafiği

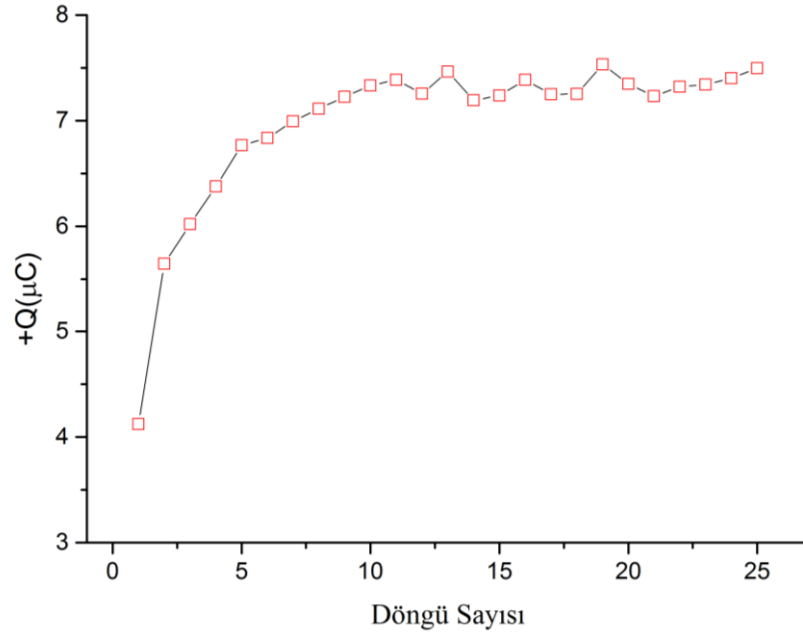


Şekil 4.16.b. (S100_2d) ölçümüne ait -Q grafiği

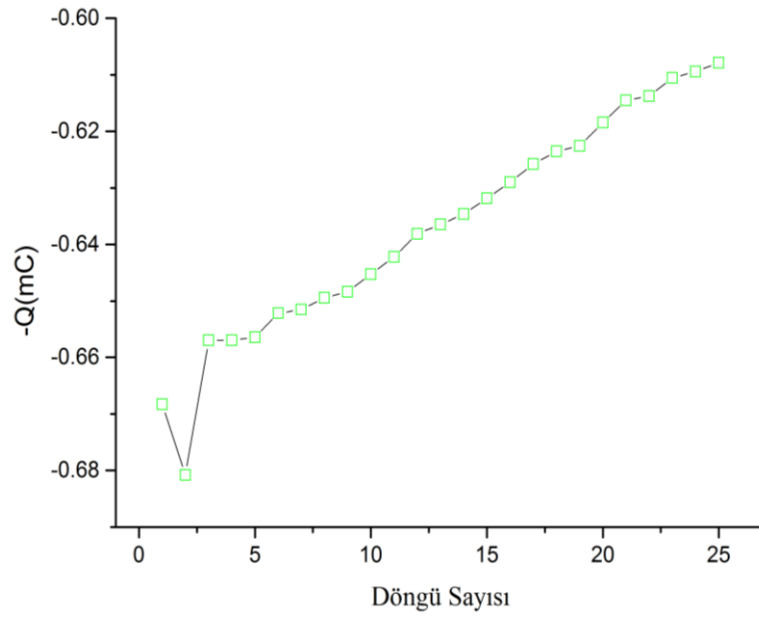
(S100_2e) ölçümüne ait I-V ve +Q ve -Q grafikleri



Şekil 4.17. (S100_2e) ölçümüne ait negatif ve pozitif bölgede I-V grafikleri

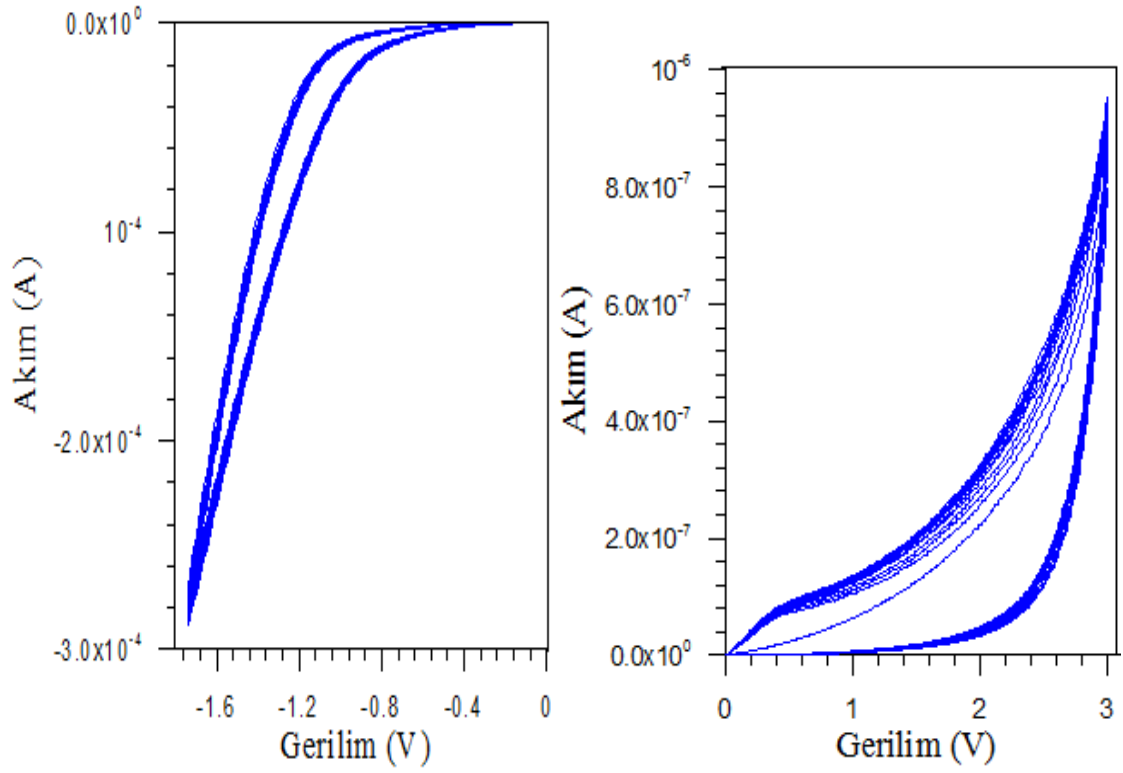


Şekil 4.18.a. (S100_2e) ölçümüne ait +Q grafiği

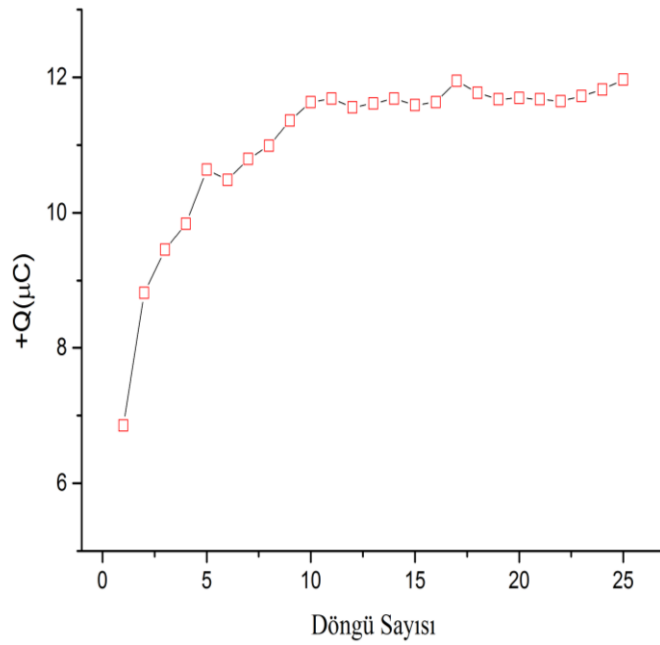


Şekil 4.18.b. (S100_2e) ölçümüne ait -Q grafiği

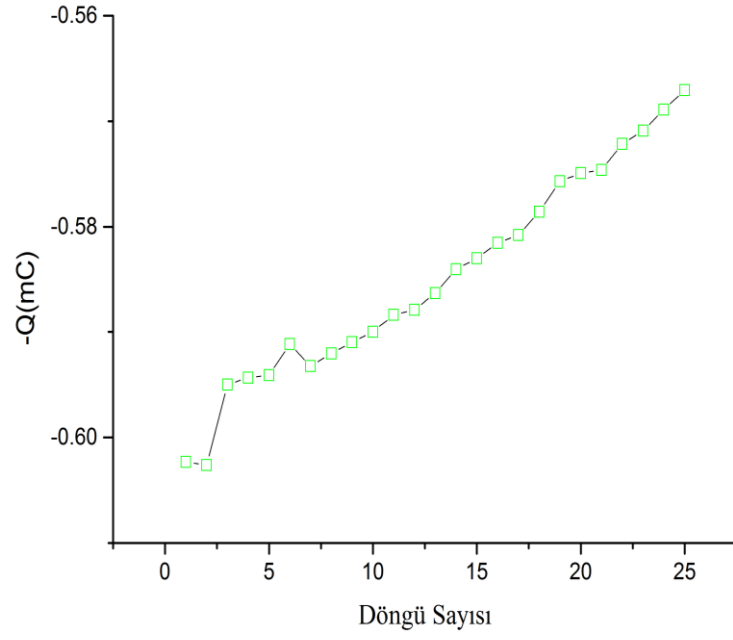
(S100_2f) ölçümüne ait I-V ve +Q ve -Q grafikleri



Şekil 4.19. (S100_2f) ölçümüne ait negatif ve pozitif bölgede I-V grafikleri

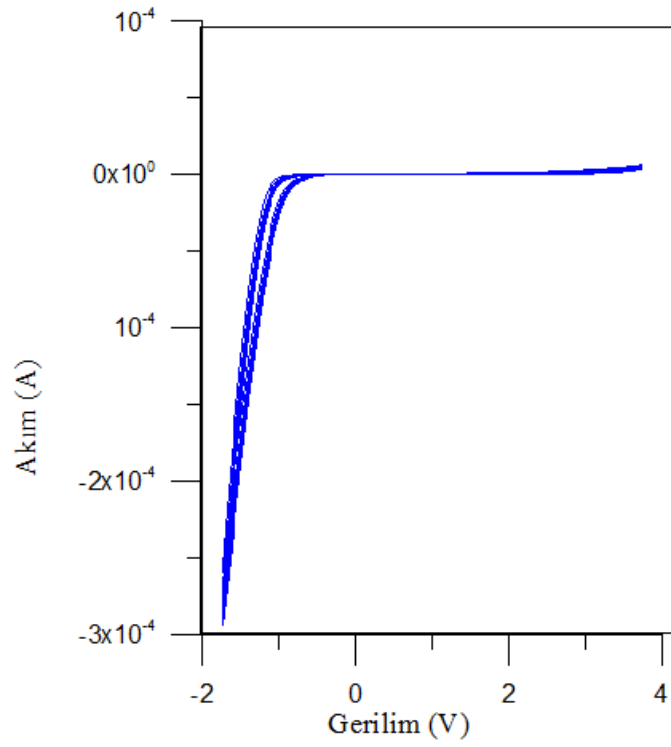


Şekil 4.20.a. (S100_2f) ölçümüne ait +Q grafiği

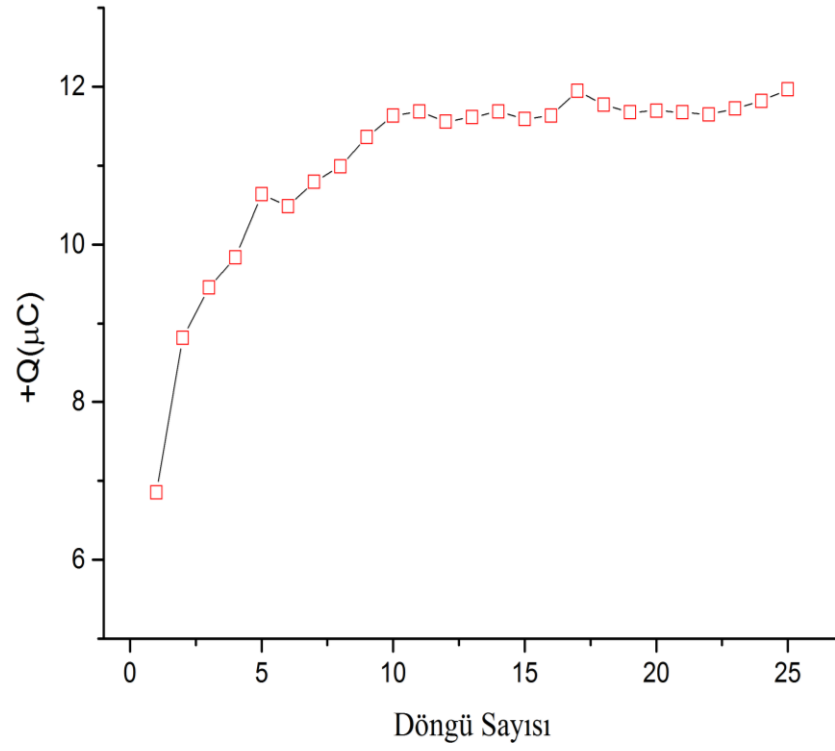


Şekil 4.20.b. (S100_2f) ölçümüne ait $-Q$ grafiği

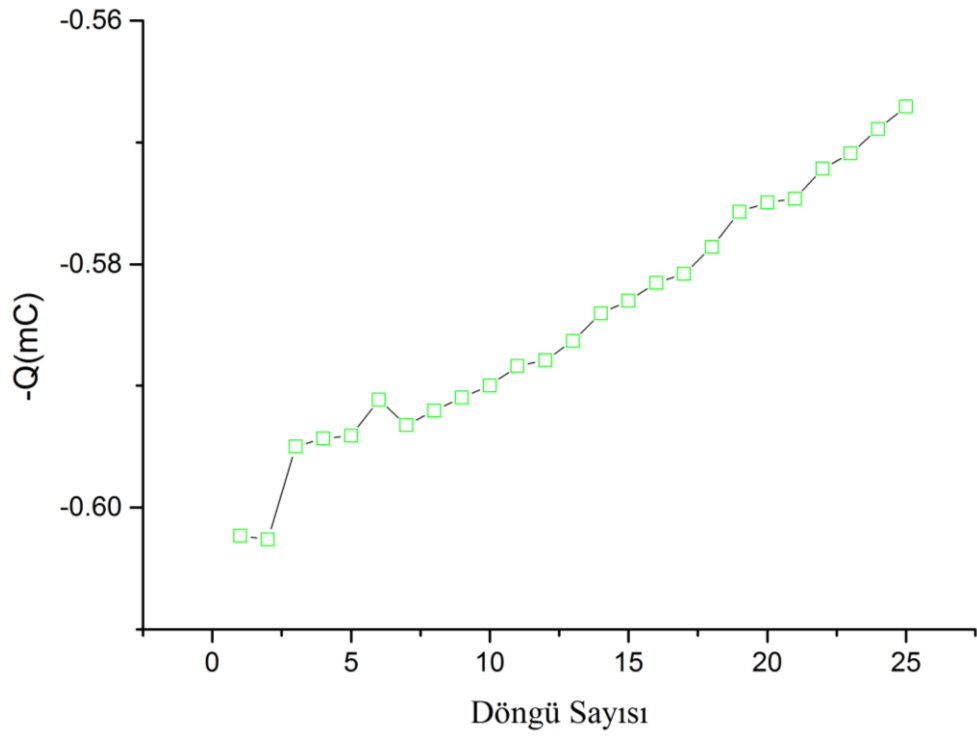
(S100_2g) ölçümüne ait I-V ve +Q ve $-Q$ grafikleri



Şekil 4.21. (S100_2g) ölçümüne ait I-V grafiği

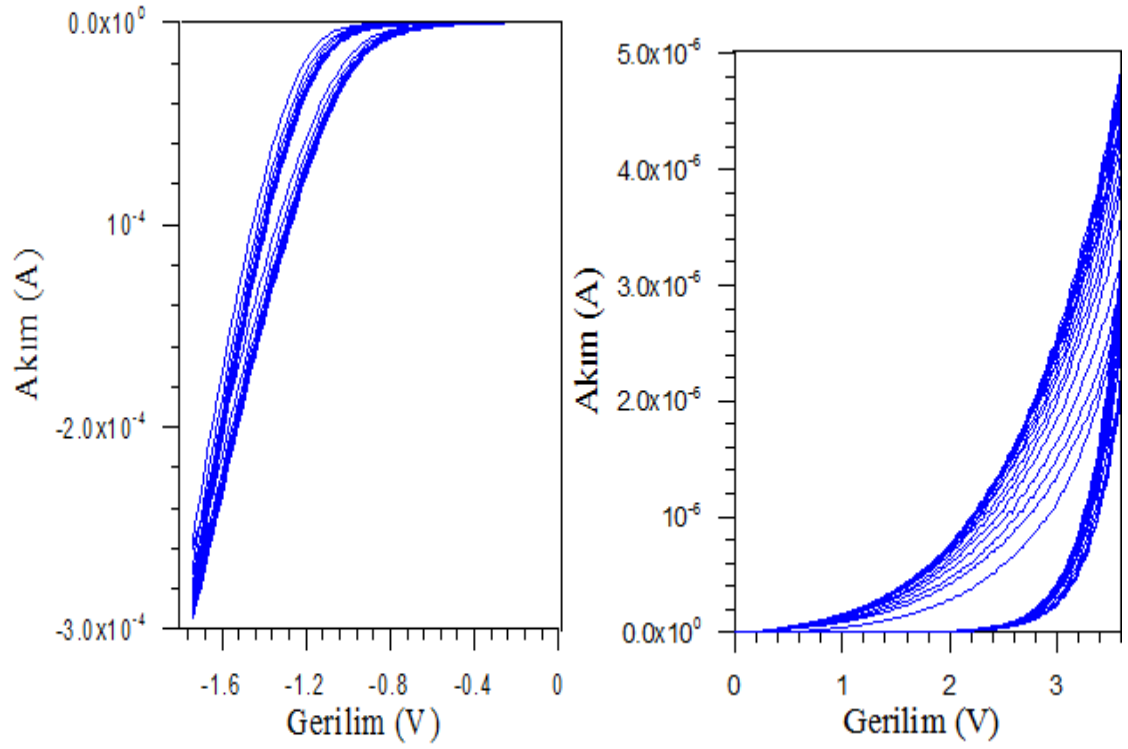


Şekil 4.22.a. (S100_2g) ölçümüne ait +Q grafiği

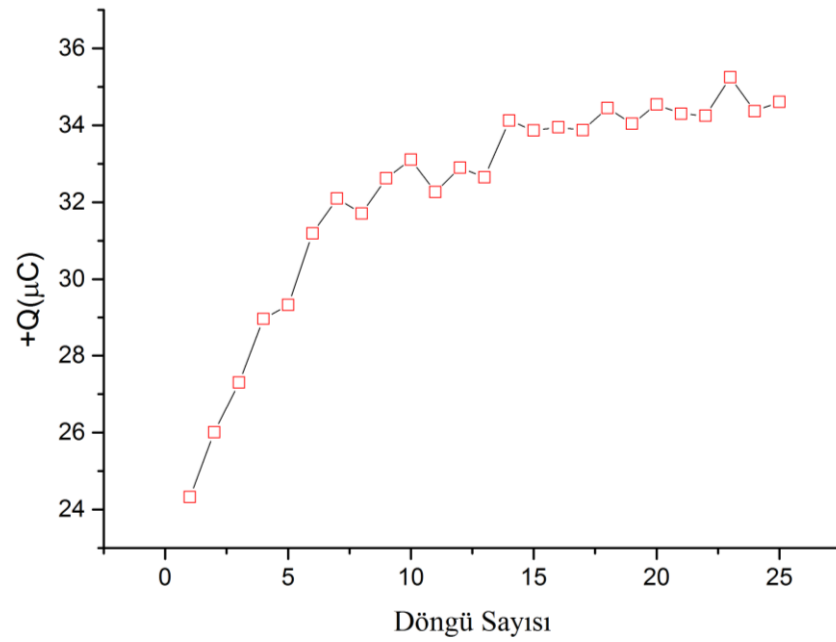


Şekil 4.22.b. (S100_2g) ölçümüne ait -Q grafiği

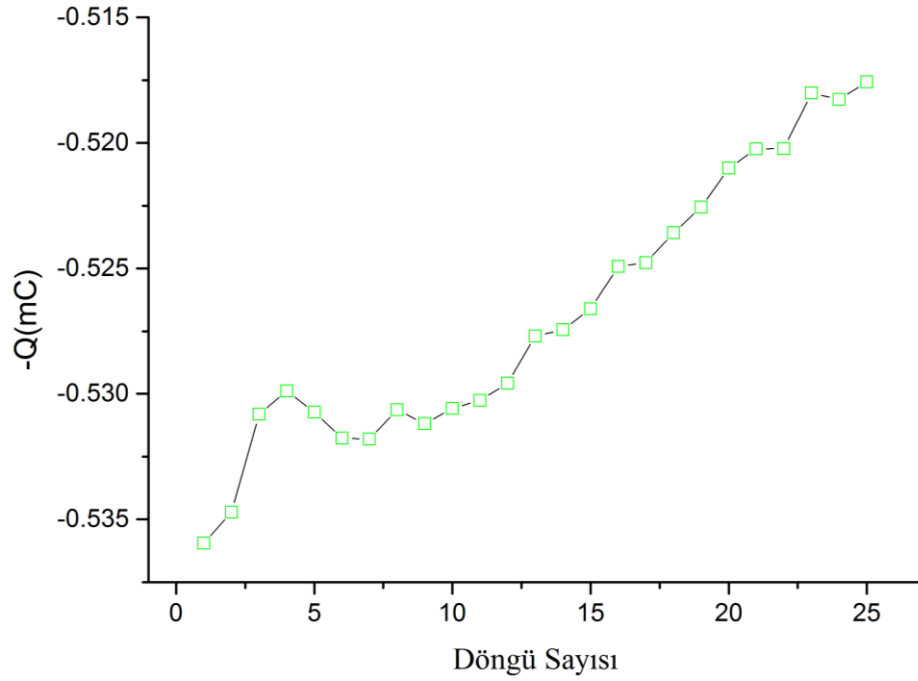
(S100_2h) ölçümüne ait I-V ve +Q ve -Q grafikleri



Şekil 4.23. (S100_2h) ölçümüne ait negatif ve pozitif bölgede I-V grafikleri



Şekil 4.24.a. (S100_2h) ölçümüne ait +Q grafiği



Şekil 4.24.b. (S100_2h) ölçümüne ait -Q grafiği

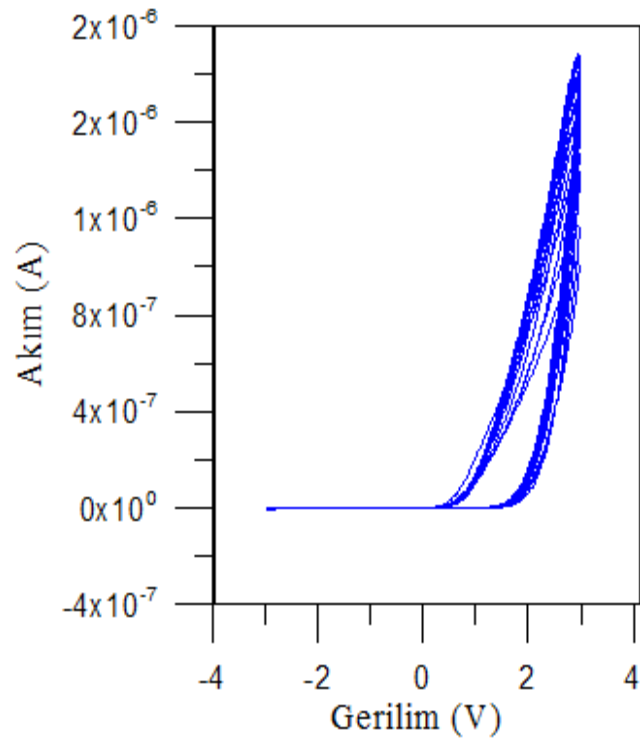
S100 numunesi için alınan ölçümlerden elde edilen sonuçlara göre genel olarak döngü sayısının artmasıyla birlikte eğim yavaş yavaş değişirken döngünün tekrar eden ölçümlerde kararlı hale geldiği görülmektedir. +Q ve -Q grafikleri de akım değişimleriyle orantılı olarak değişim göstermiştir.

Çizelge 4.7 S102 numunesine ait parametreler

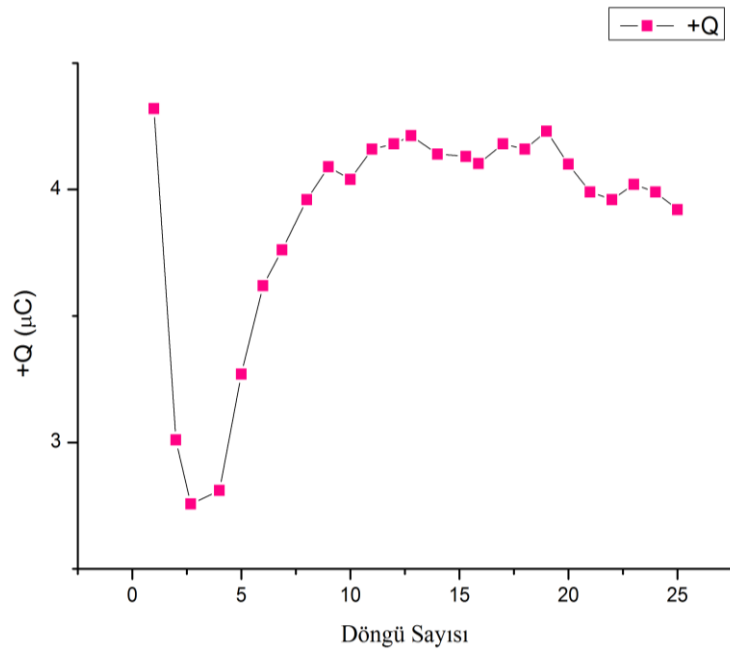
Alttaş Malzeme	Hedef	Altlık Sıcaklık	RF(W)	Kalınlık (Å)	Ar (ccm)	O2 (ccm)	rpm
Al/p++Si	Ti	37	150	200	20	-	4
Ti/Al/Si	Ti	38	86	50	20	0.5	4

P⁺⁺Si üzerine termal buharlaştırma ile Al kaplandıktan sonra RF magnetron saçtırma ile TiO₂ ince film büyütüldü ve I-V ölçümü yapıldı. Yapılan ölçüm $\pm 3V$ aralığında 25 döngü ile yapıldı

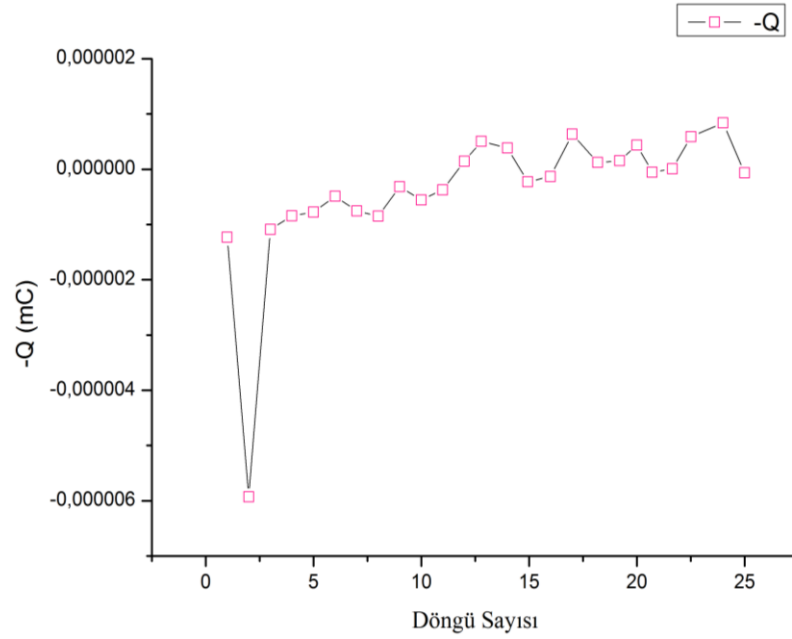
(S102) ölçümüne ait I-V ve +Q ve -Q grafikleri



Şekil 4.25. (S102_döngü_V1) ölçümüne ait I-V grafiği



Şekil 4.26.a. (S102_döngü_V1) ölçümüne ait +Q grafiği



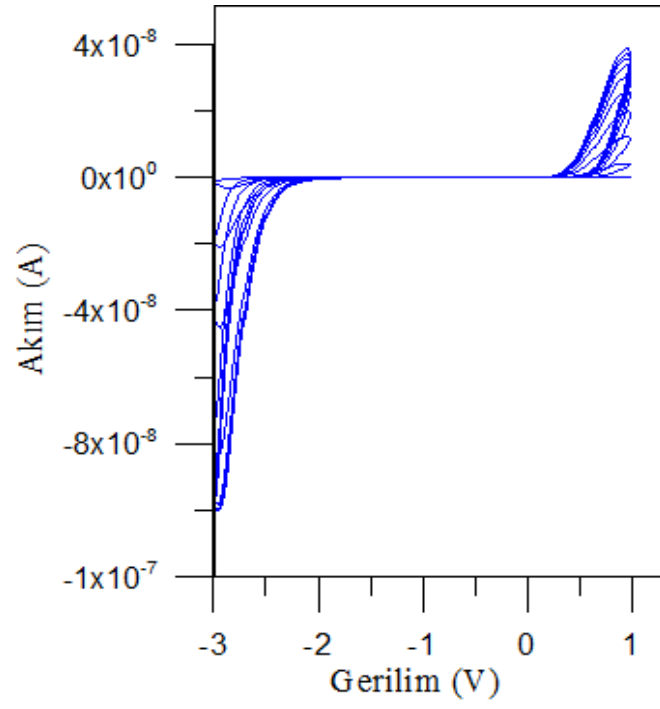
Şekil 4.26.b. (S102_döngü_V1) ölçümüne ait -Q grafiği

Çizelge 4.8. S110 numunesine ait parametreler

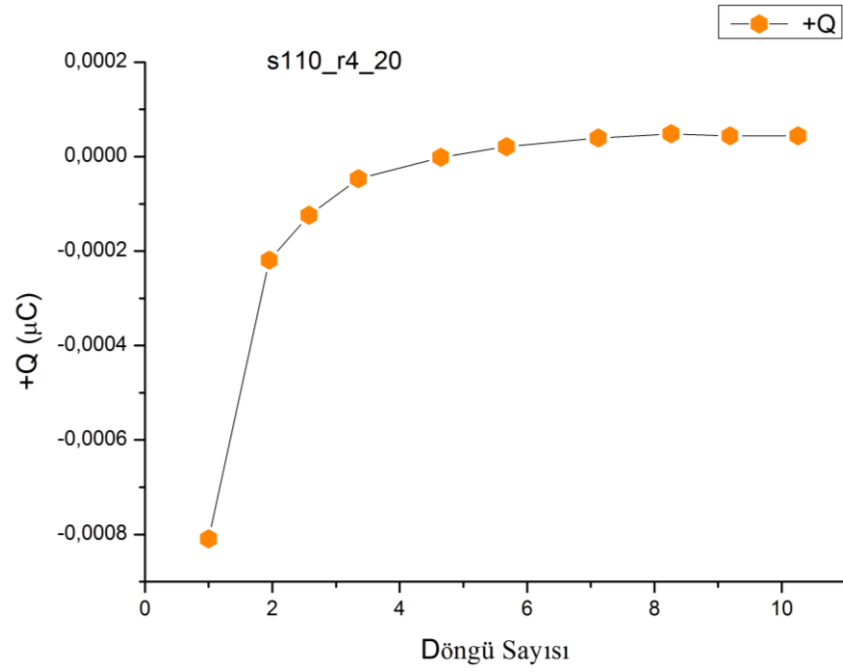
Alttaş Malzeme	Hedef	Altlık Sıcaklık	RF(W)	Kalınlık (Å)	Ar (ccm)	O2 (ccm)	rpm
p++Si	Ti	36	150	108	20	-	4
Ti/Si	Ti	36	80	50	20	0.5	4

S110 numunesi taban temizlemesi yapıldıktan ve 200°C’de O₂ gazı altında ısıtılma işlemi tabi tutulduktan sonra TiO₂ ince film ile kaplandı ve I-V ölçümü yapıldı.

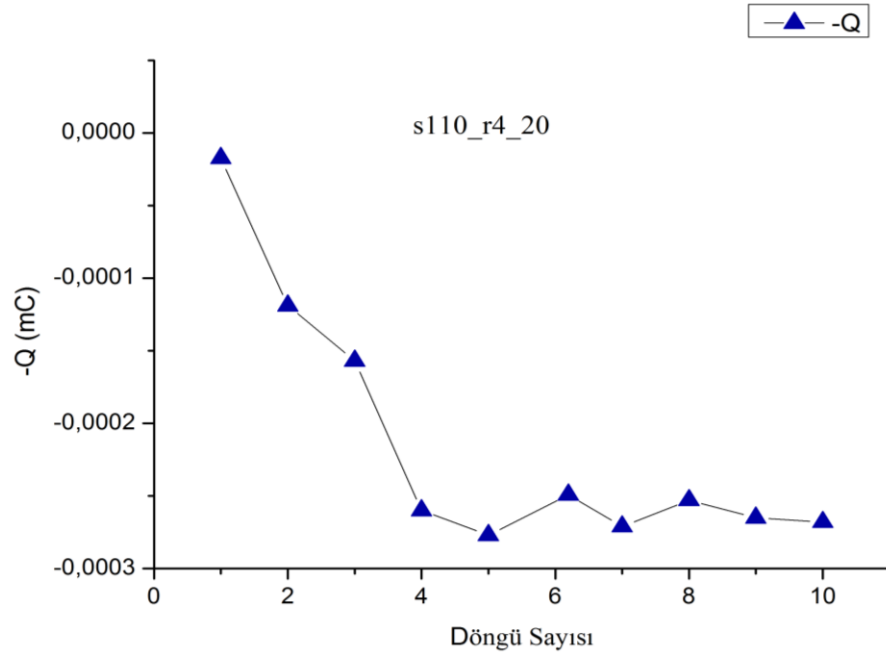
(S110) ölçümüne ait I-V ve +Q ve -Q grafikleri



Şekil 4.27. (S110_r4_20) ölçümüne ait I-V grafiği



Şekil 4.28.a. (S110_r4_20) ölçümüne ait +Q grafiği



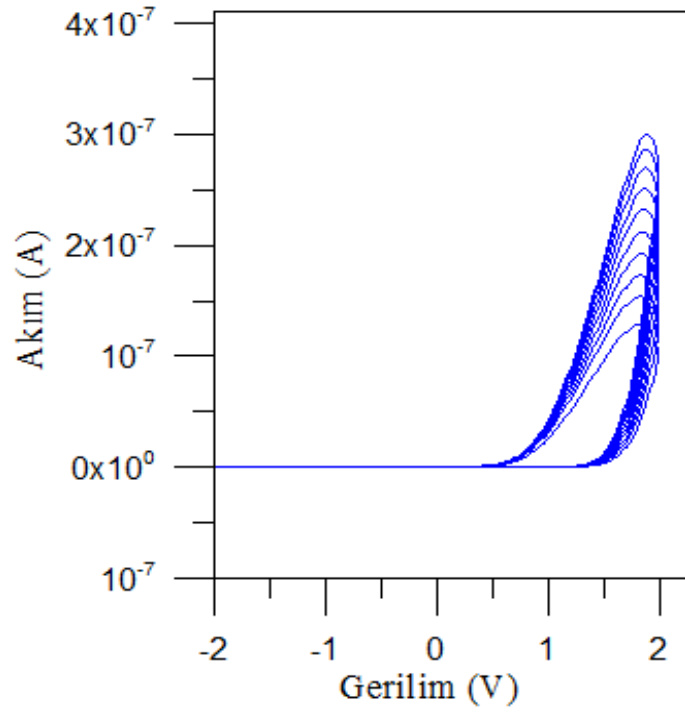
Şekil 4.28.b. (S110_r4_20) ölçümüne ait -Q grafiği

Çizelge 4.9. S111 numunesine ait parametreler

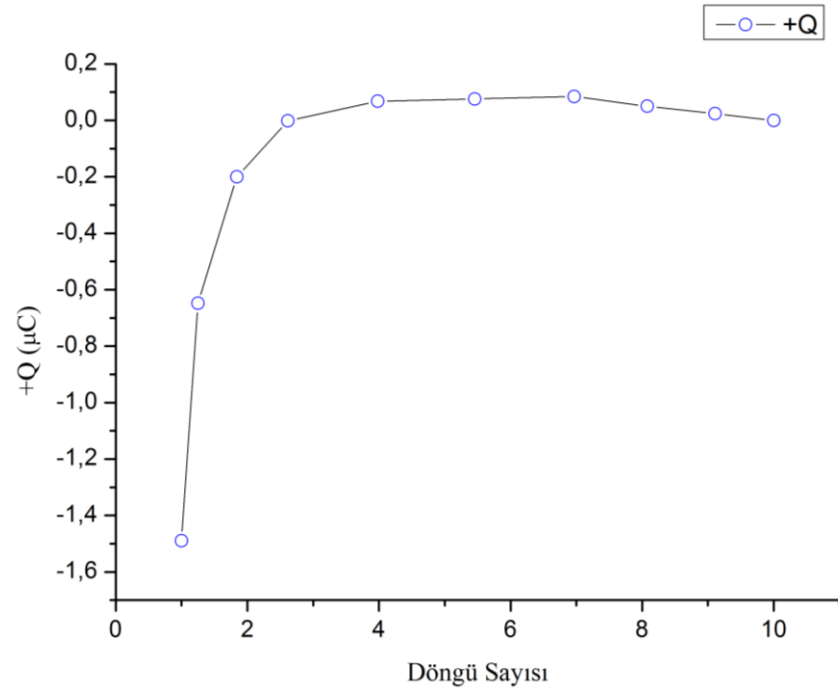
Alttaş Malzeme	Hedef	Altlık Sıcaklık	RF(W)	Kalınlık (Å)	Ar (ccm)	O2 (ccm)	rpm
p++Si	Ti	37	150	100	20	-	4
Ti/Si	Ti	37	80	100	20	0.5	4

S111 numunesi de S110 numunesi ile aynı parametrelerle oluşturuldu ve 10 döngü için ölçümü yapıldı.

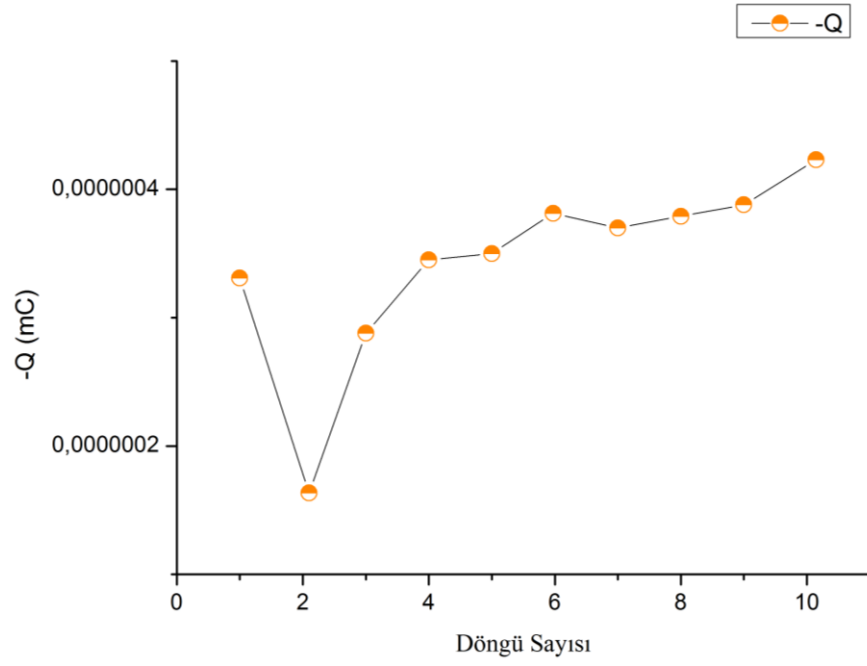
(S111) ölçümüne ait I-V ve +Q ve -Q grafikleri



Şekil 4.29. (S111_r5_04) ölçümüne ait I-V grafiği

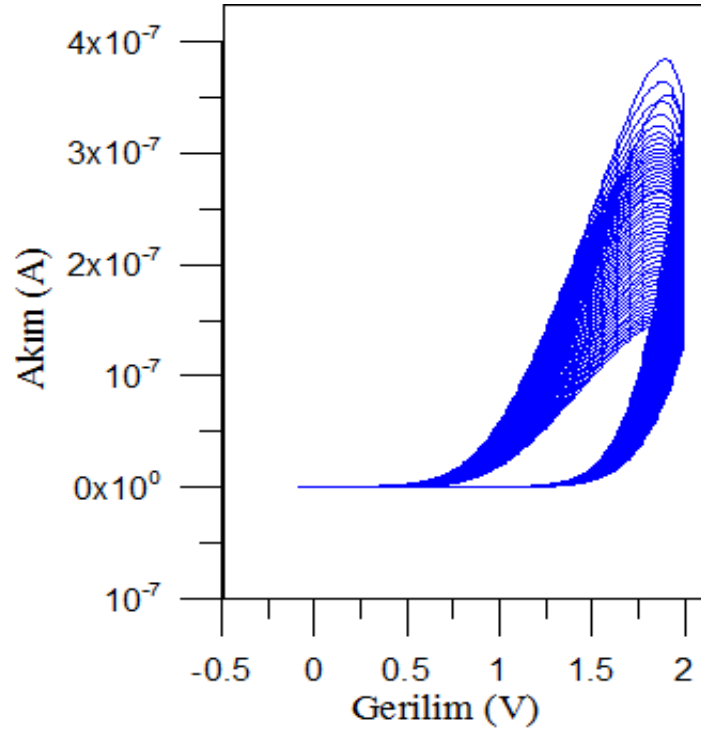


Şekil 4.30.a. (S110_r5_04) ölçümüne ait +Q grafiği

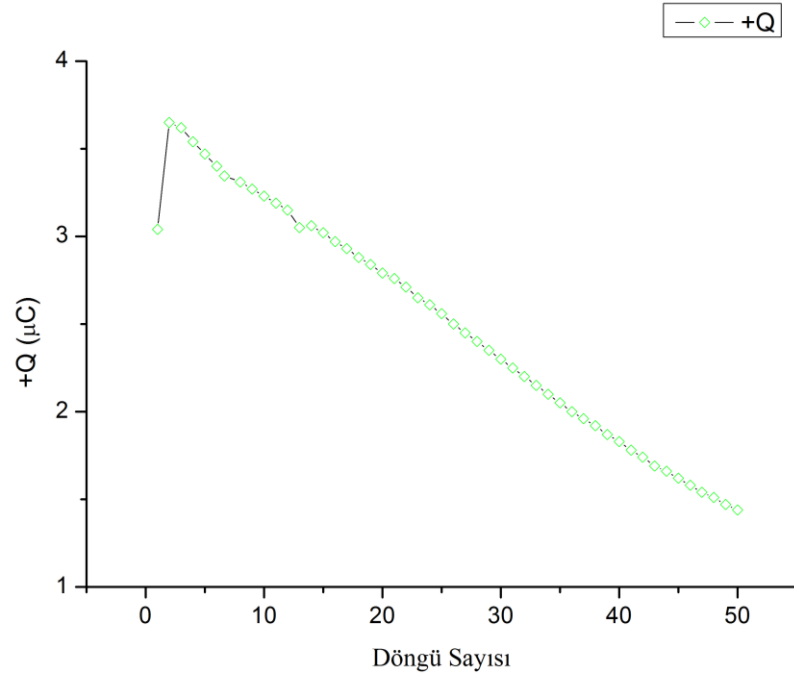


Şekil 4.30.b. (S111_r5_04) ölçümüne ait -Q grafiği

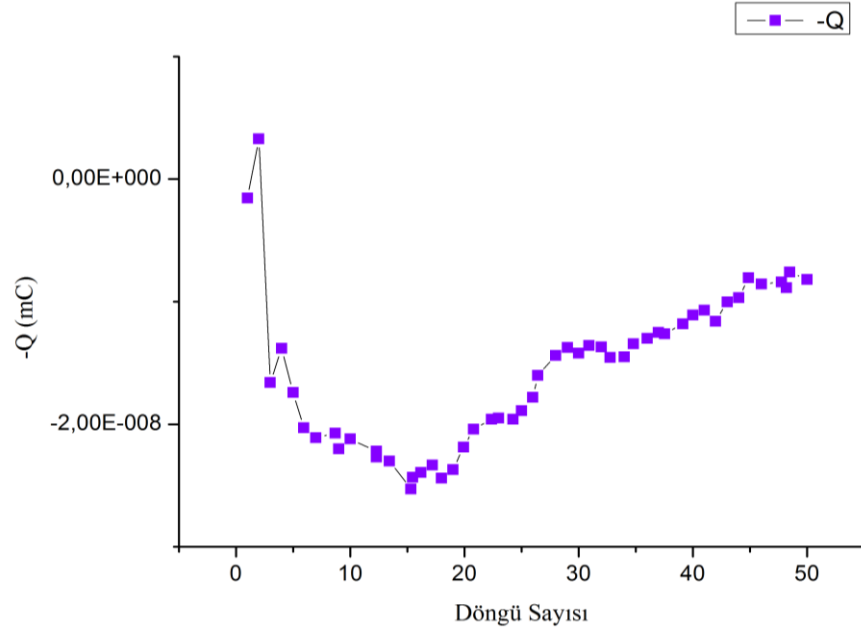
(S111_r5_05) ölçümüne ait I-V ve +Q ve -Q grafikleri



Şekil 4.31. (S111_r5_05) ölçümüne ait I-V grafiği

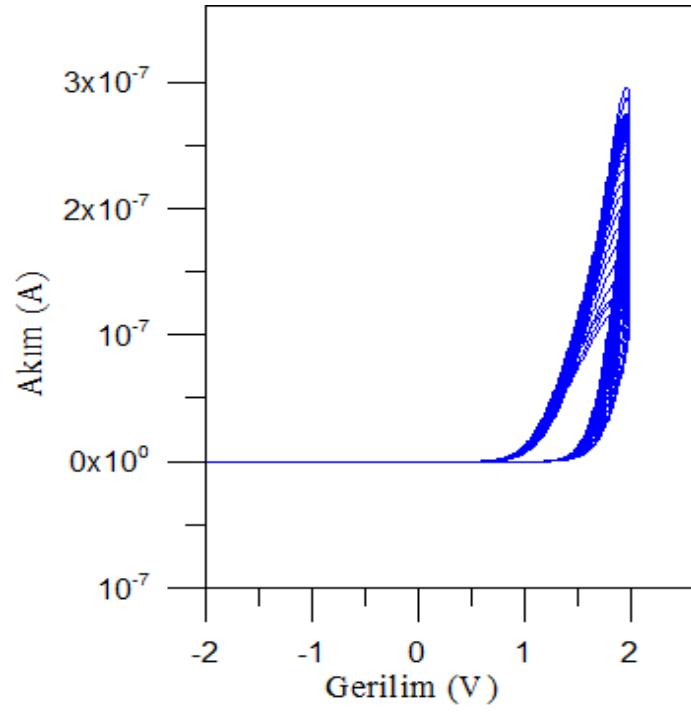


Şekil 4.32.a. (S111_r5_05) ölçümüne ait +Q grafiği

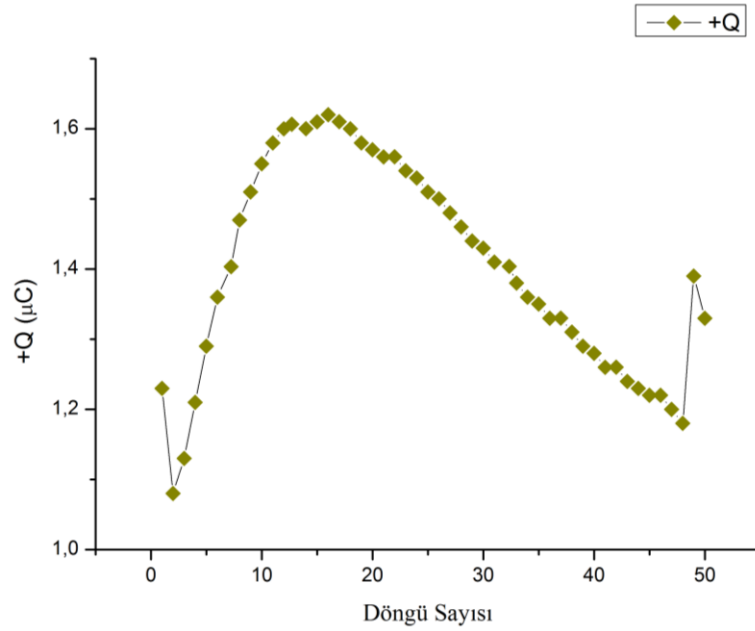


Şekil 4.32.b. (S111_r5_05) ölçümüne ait -Q grafiği

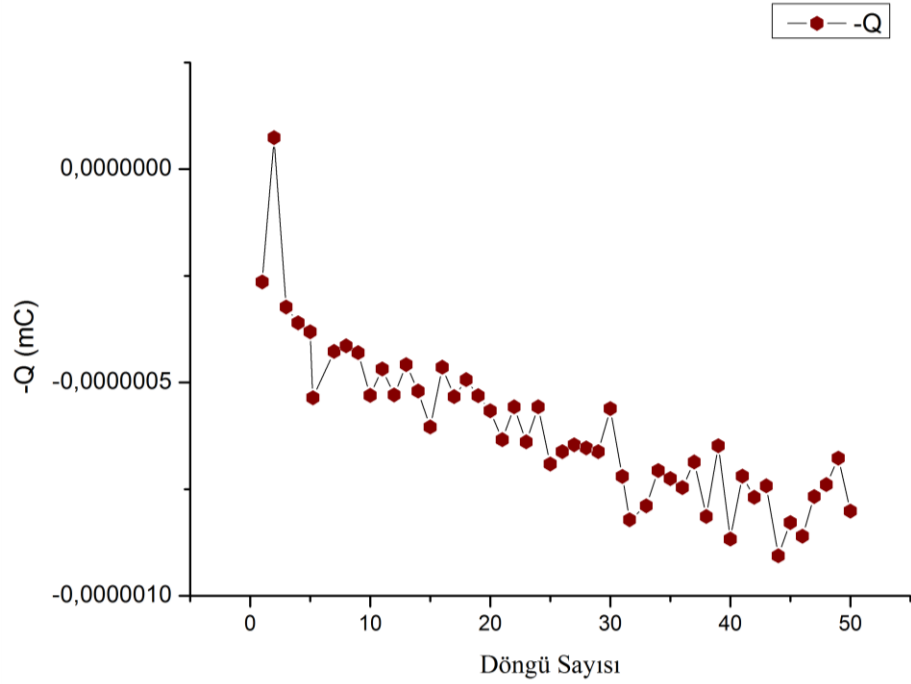
(S111_r5_06) ölçümüne ait I-V ve +Q ve -Q grafikleri



Şekil 4.33. (S111_r5_06) ölçümüne ait I-V grafiği



Şekil 4.34.a. (S111_r5_06) ölçümüne ait +Q grafiği



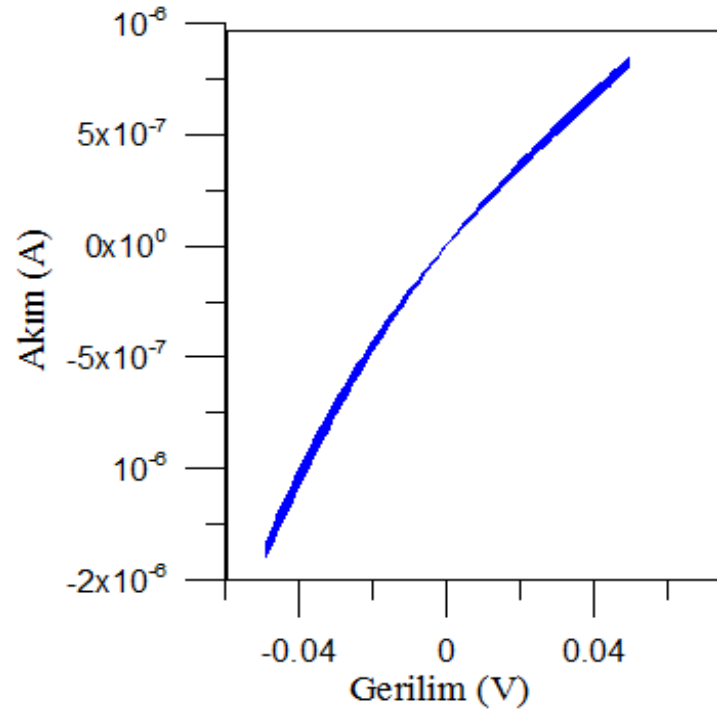
Şekil 4.34.b. (S111_r5_06) ölçümüne ait -Q grafiği

Çizelge 4.10. S114 numunesine ait parametreler

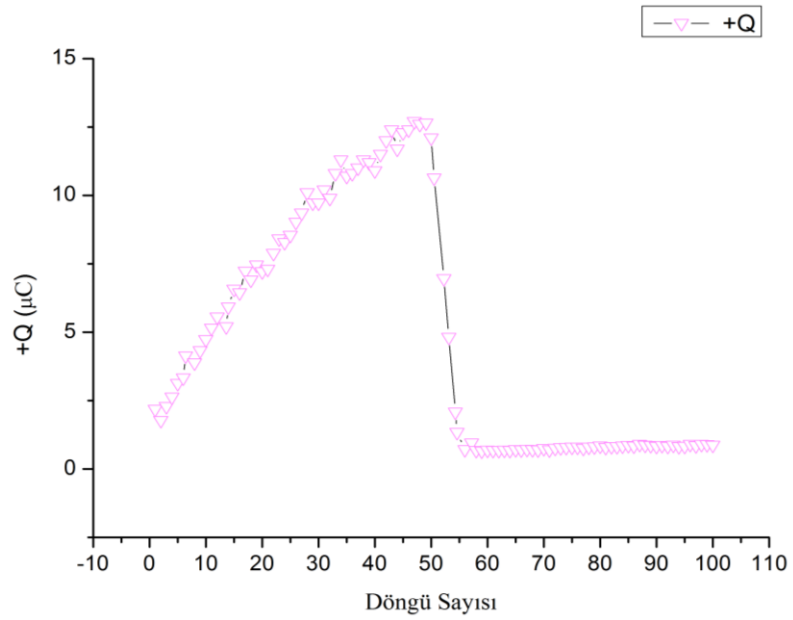
Alttaş Malzeme	Hedef	Altlık Sıcaklık	RF(W)	Kalınlık (A)	Ar (ccm)	O2 (ccm)	rpm
p++Si	Ti	38	150	100	20	-	4
Ti/Si	Ti	38	95	100	20	0.5	4

Yukarıdaki parametrelere göre hazırlanan numunene için ± 0.04 V da 100 döngü ölçüm alındı ve I-V grafiği çizildi. Daha sonra +Q ve -Q değerleri hesaplanarak grafikleri çizildi.

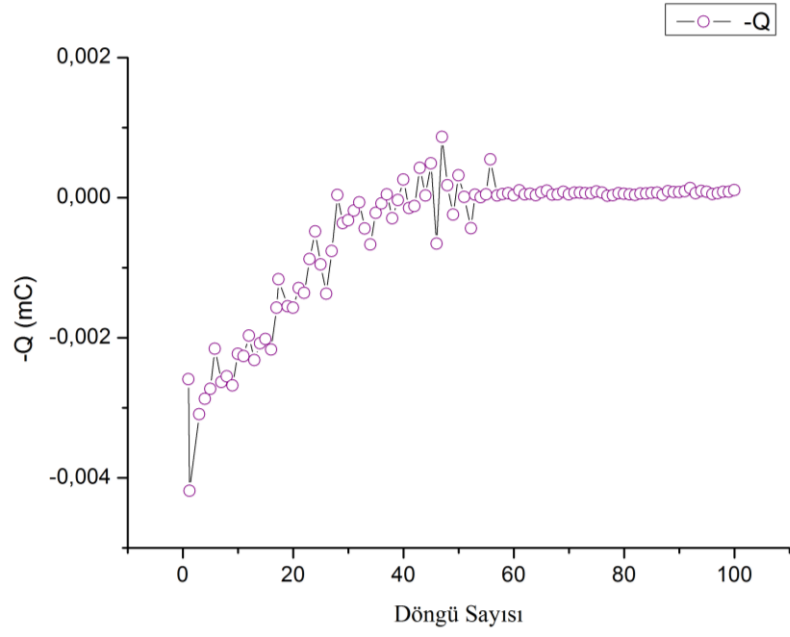
(S114_10_03) ölçümüne ait I-V ve +Q ve -Q grafikleri



Şekil 4.35. (S114_10_03) ölçümüne ait I-V grafiği

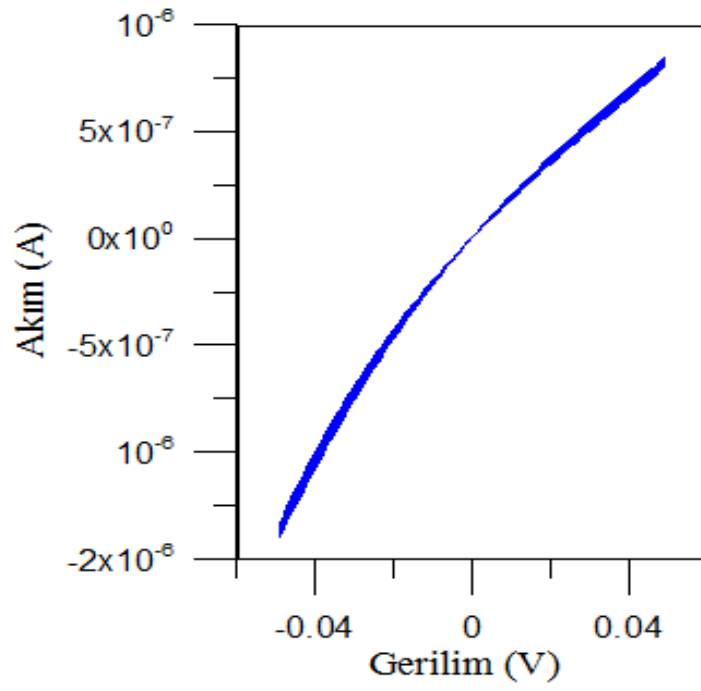


Şekil 4.36.a. (S114_10_03) ölçümüne ait +Q grafiği

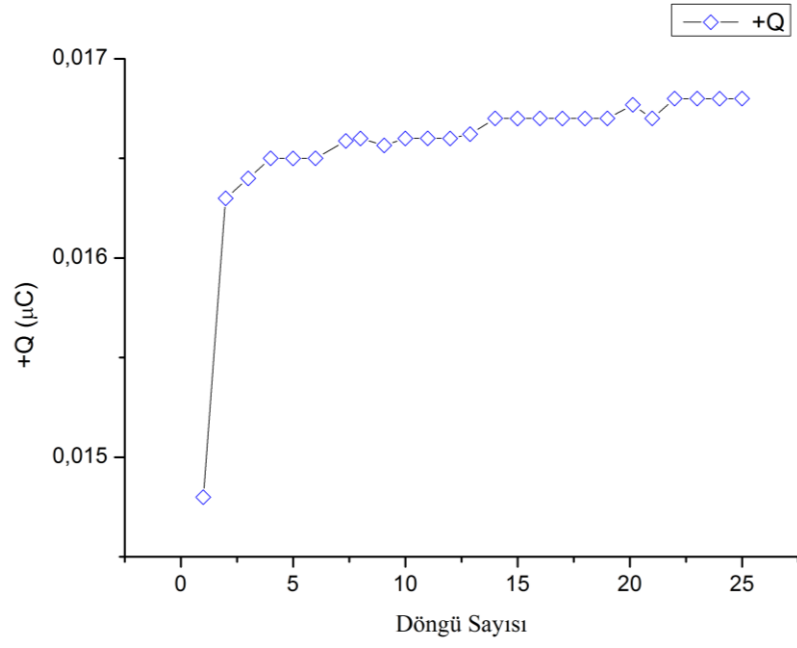


Şekil 4.36.b. (S114_10_03) ölçümüne ait -Q grafiği

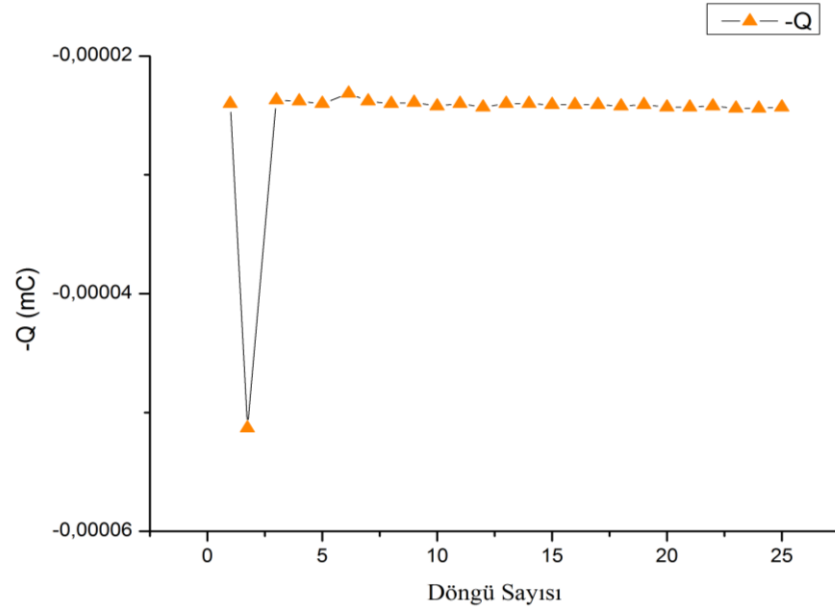
(S114_r2_03) ölçümüne ait I-V ve +Q ve -Q grafikleri



Şekil 4.37. (S114_r2_03) ölçümüne ait I-V grafiği



Şekil 4.38.a. (S114_r2_03) ölçümüne ait +Q grafiği



Şekil 4.38.b. (S114_r2_03) ölçümüne ait -Q grafiği

5. SONUÇ

Bu çalışmada RF magnetron saçtırma ve termal buharlaştırma yöntemleri kullanılarak Si altlıklar üzerinde TiO_2 ince filmler hazırlandı ve metal kontakları I-V ölçüm için Al ve Pt ile yapıldı. Metal/ TiO_2 /Metal formunda hazırlanan numunelerin I-V ölçümlerinden elde edilen veriler ile memristiv davranışın proses parametrelerine bağlılığı incelendi. Daha sonra +Q ve -Q yükleri hesaplanarak net Q yükü değişiminin memristiv özellik ile olan ilişkisi incelendi.

İlk olarak RF magnetron saçtırma ve termal buharlaştırma metoduyla üretilen TiO_2 ince filmlerin memristiv özelliğinin farklı tarama hızlarında ve ısıtma işlemi ile olan ilişkisi incelendi. Farklı tarama hızlarında yapılan ölçümlerde tarama hızının azalmasıyla iletkenliğin arttığı görüldü. Bu davranış toplam yük miktarına bağlı olarak memristörün direncinin değişmesi gerekir özelliğini desteklemektedir. Daha sonra 400°C de ısıtma işlemi uygulandı ve ısıtma işleminin memristiv davranış üzerinde önemli bir etki yapmadığı görüldü.

Sonraki aşamalarda altlık sıcaklığının memristiv davranış üzerine etkisini incelemek üzere yine aynı metotla TiO_2 ince filmler hazırlandı. Değişken parametre olarak ince filmin alttaş sıcaklığı seçildi. Filmlerin alttaş sıcaklıkları $50-400^\circ\text{C}$ aralığında 50°C farklarla artırılarak memristiv davranışları incelendi. Yapılan ölçümlerde oluşturulan yapılarda memristiv özelliğinin var olduğu görüldü. Alttaş sıcaklığının etkisine bakıldığında ise; alttaş sıcaklığı 50°C olan numunede zayıf memristiv özellik görülürken $100-150^\circ\text{C}$ altlık sıcaklığındaki numunelerde memristiv özellik görülmemektedir. $250-300^\circ\text{C}$ altlık sıcaklığındaki numunelerde ise simetrik olmayan davranış daha da belirginleşmiş durumdadır. $350-400^\circ\text{C}$ de ise memristiv davranış belirginleşirken, ani akım değişimleri de görülmektedir.

Son olarak farklı parametrelerle hazırlanan numunelerin I-V ölçümleri alınarak elde edilen veriler ile net Q yükünün değişimine bakıldı ve memristiv özellikle ilişkisi incelendi.

Fabrikasyonu yapılan yapıların genelinde memristiv özellik gözlemlendi ve direncin toplam yüke bağlı olarak sürekli değişim gösterdiği gözlemlendi. Yine döngü sayısının artışıyla birlikte akımın azaldığı ve net yük değişimi ile paralellik arz ettiği görüldü.

KAYNAKLAR

- Arıer, Ü.Ö.A., Tepehan, F.Z., 2011. Influence of heat treatment on the particle size of nanobrookite TiO₂ thin films produced by sol–gel method. *Surf. Coatings Technol.* 206, 37–42. doi:10.1016/j.surfcoat.2011.06.039
- Anonim, 2014a. [http://tr.wikipedia.org/wiki/TiO₂](http://tr.wikipedia.org/wiki/TiO2) Erişim Tarihi: 15.04.2014.
- Anonim, 2014b. <http://networksandservers.blogspot.com.tr/2011/01/future-of-computers-electronic.html> Erişim Tarihi: 16.04.2014
- Anonim, 2014c. <http://networksandservers.blogspot.com.tr/2011/01/future-of-computers-electronic.htmlsystems.html> Erişim Tarihi: 05.06.2014
- Anonymous, 2014a. <http://en.wikipedia.org/wiki/Anatase>, Erişim Tarihi: 15.04.2014.
- Anonymous, 2014b. <http://marriott.tistory.com/97> Erişim Tarihi:16.04.2014.
- Benderli, S., Wey, T.A., 2009. On SPICE macromodelling of TiO₂ memristors. *Electron. Lett.* doi:10.1049/el.2009.3511
- Bersani, D., Lottici, P.P., Lopez, T., Ding, X., 1998. A Raman Scattering Study of PbTiO₃ and TiO₂ Obtained by Sol-Gel. *Physics (College. Park. Md).* 853, 849–853.
- Biolek, D., Biolková, V., Biolek Z., 2009. SPICE Model of Memristor with Nonlinear Dopant Drift. *Radioengineering.* 210–214.
- Böer, K.W., 2010. Introduction to Space Charge Effects in Semiconductors. Springer. ISBN: 3642022359
- Chang, S.-I.C.S.-I., Yoon, J.-B.Y.J.-B., 2005. 3D diffuser lithography: a novel method to fabricate various rounded microstructures. 13th Int. Conf. Solid-State Sensors, Actuators Microsystems, 2005. Dig. Tech. Pap. TRANSDUCERS '05. 2. doi:10.1109/SENSOR.2005.1497357
- Chua, L., 1971. Memristor- The Missing Circuit Element *IEEE transactions on circuit theory*, ct-18, no5.
- Davitaya, F.A., Badoz P.A., Campidelli Y., Chroboczek J.A., Duboz J.Y., Perio A. Pierre J., 1990. Growth, Characterization and Electrical-Properties of Epitaxial Erbium Silicide. *Thin Solid Films*, 184, 283–293
- Davey, J.E. and Pankey, T.J., 1968. Epitaxial GaAs Films Deposited By Vacuum Evaporation. *Journal of Applied Physics*, 39, 1941(8 pages).
- Evcin, A., 2006. *Kaplama Teknikleri Ders Notları*. Kocatepe Üniversitesi, 46, Afyonkarahisar
- Fujishima, A., Hashimoto, K., Watanabe, T., 1999. *TiO₂ Photocatalysis: Fundamentals and Applications*. ISBN: 9784939051036
- Heo, C.H., Lee, S.-B., Boo, J.-H., 2005. Deposition of TiO₂ thin films using RF magnetron sputtering method and study of their surface characteristics. *Thin Solid Films*. doi:10.1016/j.tsf.2004.08.033
- Hu, Y., Yuan, C., 2005. Low-temperature preparation of photocatalytic TiO₂ thin films from anatase sols. *J. Cryst. Growth* 274, 563–568. doi:10.1016/j.jcrysgro.2004.10.146
- Joglekar, Y.N., Wolf, S.J., 2009. The elusive memristor: properties of basic electrical circuits. *Eur. J. Phys.* 30, 661–675. doi:10.1088/0143-0807/30/4/001

- Karvinen, S., Hirva, P., Pakkanen, T.A., 2003. Ab initio quantum chemical studies of cluster models for doped anatase and rutile TiO₂. *J. Mol. Struct.* 62, 271–277. doi:10.1016/S0166-1280(03)00108-8
- Kumar, M.J., 2010. Memristor: Why do we have to know about it? 3–6.
- Lee, H.S., Yoon, J.-B., 2005. A simple and effective lift-off with positive photoresist. *J. Micromechanics Microengineering*. doi:10.1088/0960-1317/15/11/020
- Lehtonen, E., Laiho, M., 2010. CNN using memristors for neighborhood connections. *Cell. Nanoscale Networks Their Appl. (CNNA)*, 2010 12th Int. Work.
- McDonald, N.R., Pino, R.E., Rozwood, P.J., Wysocki, B.T., 2010. Analysis of dynamic linear and non-linear memristor device models for emerging neuromorphic computing hardware design, in: *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*. doi:10.1109/IJCNN.2010.5596664
- Mohammad, B., Homouz, D., Elgabra, H., 2012. Robust Hybrid Memristor-CMOS Memory: Modeling and Design. *IEEE Trans. VLSI Syst.* 1–11. doi:10.1109/TVLSI.2012.2227519
- Moiz, S.A., Ahmed, M.M., Karimov, K.S., Rehman, F., Lee, J.H., 2009. Space charge limited current-voltage characteristics of organic semiconductor diode fabricated at various gravity conditions. *Synth. Met.* 159, 1336–1339. doi:10.1016/j.synthmet.2009.03.003
- Pickett, M.D., Strukov, D.B., Borghetti, J.L., Yang, J.J., Snider, G.S., Stewart, D.R., Williams, R.S., 2009. Switching dynamics in titanium dioxide memristive devices. *J. Appl. Phys.* 106, 074508. doi:10.1063/1.3236506
- Strukov, D.B., Snider, G.S., Stewart, D.R., Williams, R.S., 2008. The missing memristor found. *Nature* 453, 80–3. doi:10.1038/nature06932
- Wijnhoven, J.E., 1998. Preparation of Photonic Crystals Made of Air Spheres in Titania. *Science* (80-.). doi:10.1126/science.281.5378.802

ÖZGEÇMİŞ

Süheyla GÜLLÜLÜ 1985 yılında Erzurum’da doğdu. İlköğretiminin ilk beş yılını Erzurum merkez İnönü İlköğretim okulunda, kalan üç yılını da Erzurum Nenehatun Kız Lisesinde tamamladı. Orta öğretimini Erzurum Anadolu Lisesinde tamamladı. 2005 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik bölümünü kazandı. 2009 yılında mezuniyetinin ardından Kazım Karabekir Eğitim Fakültesinde Fen ve Matematik alanlarında Fizik Eğitimi Bölümünde tezsiz yüksek lisansını tamamladı. 2012 yılında Atatürk Üniversitesi Nano Bilim ve Nano Mühendislik Anabilim dalı Nano Malzeme bilim dalında tezli yüksek lisansa başladı.