

**NANO ÖLÇEKLİ VANADYUM OKSİT
İNCE FİLMLERDE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN VE
1/F GÜRÜLTÜSÜNÜN KARAKTERİZASYONU**

Ahmet Murat YAĞCI

Yüksek Lisans Tezi

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Şubat-2016

Bu tez çalışması 1307F298 tez nolu Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Tezleri Komisyonu Başkanlığı ve 213M494 nolu TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Ahmet Murat Yağcı'nın "Nano Ölçekli Vanadyum Oksit İnce Filmlerde Elektriksel Özelliklerinin ve 1/f Gürültüsünün Karakterizasyonu" başlıklı **İleri Teknolojiler** Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 19.01.2016 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof. Dr. R. MUSTAFA ÖKSÜZOĞLU
Üye	: Prof. Dr. H. HÜSEYİN ERKAYA
Üye	: Doç. Dr. FERİDUN AY

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

NANO ÖLÇEKLİ VANADYUM OKSİT İNCE FİLMLERDE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN VE 1/F GÜRÜLTÜSÜNÜN KARAKTERİZASYONU

Ahmet Murat YAĞCI

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. R. Mustafa ÖKSÜZOĞLU

2016, 144 sayfa

Vanadyum Oksit (VO_x), sıcaklıkla yarı iletken fazdan iletken faza geçiş göstermektedir ve mikroeletromekanik (MEMS) aygıtlarda kullanılmaktadır. Yüksek TCR (direncin sıcaklık sabiti) değeri, düşük elektriksel gürültüsü ve düşük elektriksel direnç (R) değerlerine sahip olması nedeniyle Vanadyum Oksit bu alanda ön plana çıkmaktadır. Endüstriyel uygulamalardaki Vanadyum Oksit ince filmlerle yapılan çalışmalarda filmlerin elektriksel gürültüsü minimize edilmek istenmektedir. Bu yüksek lisans tezi kapsamında, endüstriyel uygulamalar için istenilen elektriksel direnç ve TCR değerine sahip Vanadyum Oksit ince filmleri elde etmek amacıyla üretim parametrelerinin etkisi incelenmiş, uygun elektriksel direnç ve TCR değerleri için üretim parametreleri optimize edilmiştir ve üretilen filmlerin yapısal özellikleri X-Işını Yansıması ve Kırınımı teknikleri ile incelenmiştir. En uygun elektriksel direnç ve TCR değeri elde edilen üretim parametreleri ile filmler parmak yapıda şekillendirilen elektrotlar üzerine kaplanarak, elektriksel ve 1/f elektronik gürültü özellikleri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Vanadyum Oksit, Vurmalı - DC Magnetron reaktif sıçratma, Yarı iletken fazdan iletken faza geçiş, TCR, 1/f gürültü

ABSTRACT

Master of Science Thesis

ELECTRICAL AND 1/F NOISE CHARACTERIZATION OF NANO SCALE VANADIUM OXIDE THIN FILMS

Ahmet Murat YAĞCI

**Anadolu University
Graduate School of Sciences
Department of Advanced Technologies**

Supervisor: Prof. Dr. R. Mustafa ÖKSÜZOĞLU

2016, 144 pages

Vanadium oxide shows semiconductor to metal transition with temperature; thus it is used in microelectromechanical devices. Vanadium oxides are getting attention with their high temperature coefficient of resistance (TCR), low electrical noise and lower resistivity. For industrial applications, lower noise values are preferable, thus investigations on Vanadium Oxide based systems are still being investigated intensively. In the present study, the deposition parameters of the VOx thin films have desired properties for industrial applications will be determined. Structural properties studied by X-Ray diffraction and reflection techniques. Then, the VOx thin films will be deposited onto the finger type electrodes, and influence of structural properties and their relationship with electrical properties will be investigated. Electrical properties will be carried out by analyzing the TCR, electrical resistance and electrical noise values of the VOx thin films.

Keywords: Vanadium Oxide, Pulsed-DC Magnetron Reaktif Sputtering, Semiconductor to Metal Transition, TCR, 1/f Noise

TEŞEKKÜR

Bu çalışma sırasında beni yönlendiren, bilimsel katkılarını ve engin tecrübelerini benimle paylaşan değerli hocam Prof. Dr. Ramis Mustafa ÖKSÜZOĞLU'na en samimi duygularıyla saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma sırasında üretim sistemimde, X-ışınları ve elektriksel ölçüm cihazlarında bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan arkadaşım sayın Dr. Mustafa YILDIRIM'a en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca, deneysel çalışmalarım sırasında çalışma fırsatı bulduğum diğer çalışma arkadaşlarım Sami PEKDEMİR, Şükran GÜRCAN, Ece ÖZKAN, Sinan ÖZGÜN, Emrah DİRİCAN, Rıfat KAÇAR ve Can YAVRU'ya yaptıkları katkı ve yardımlardan ötürü teşekkür ederim.

Bu tez kapsamında ODTÜ-MEMS Merkezi'nde yapılan çalışmalarda bana desteklerini veren sayın Prof. Dr. Tayfun Akın ve Orhan AKAR'a da en içten teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, tez çalışmalarım süresince benden her türlü desteklerini esirgemeyen aileme en içten duygularıyla teşekkür ediyorum, minnetlerimi sunuyorum. Bu tez çalışmasını özellikle abim Mustafa Nuri YAĞCI'ya armağan etmek istiyorum.

Saygılarımla

Ahmet Murat YAĞCI

Şubat 2016

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	xviii
1. GİRİŞ ve AMAÇ	1
2. VANADYUM OKSİTLERİN ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI	3
2.1. Bilinen Vanadyum Oksitler ve Özellikleri.....	3
2.2. Faz Geçişi Sırasındaki Yapısal Değişimleri.....	4
2.3. Faz Geçişi Sırasındaki Elektriksel Özelliklerin Değişimi.....	5
2.4. Faz Geçişi Sırasındaki Optik Değişimler	6
2.5. Faz Geçişini Etkileyen Faktörler	7
2.6. Vanadyum Oksitlerle İlgili Yapılan Çalışmalar	7
3. MİKROBOLOMETRELER ve ÖZELLİKLERİ	10
3.1. Diyot Tipi Mikrobolometreler.....	11
3.2. Direnç Tipi Mikrobolometreler	12
3.3. Direnç Tipi Mikrobolometrelerde Gürültü.....	12
3.3.1. Johnson gürültü	13
3.3.2. 1/f gürültü	13
3.3.3. Termal gürültü	13

4.	İNCE FİLM ÜRETİM METOTLARI	14
	4.1. Vurmalı DC Reaktif Magnetron Sıçratma Tekniği	14
5.	İNCE FİMLERİN KARAKTERİZASYONUNDA KULLANILAN TEKNİKLER	18
	5.1. Dört Nokta İğne Tekniği.....	18
	5.1.1. Dört nokta iğne tekniği ile elektriksel direnç ve özdirenç ölçümleri	18
	5.1.2. Dört Nokta İğne Tekniği ile Elektriksel Direncin Sıcaklık Sabiti Ölçümü	21
	5.2. X-Işını Temelli Teknikler	21
	5.2.1. X-Işını Kırınımı (XRD) ve Sıyırma Açısında X-Işını Kırınımı (GIXRD) Teknikleri	22
	5.2.2. X-Işını Yansıması (XRR) Tekniği	23
	5.3. 1/f Gürültü Ölçümü	25
	5.3.1. 1/f Gürültü Ölçüm Düzeneği	26
	5.3.2. 1/f Gürültü Ölçüm Düzeneğinin Kurulumu	31
6.	DENEYSEL SÜREÇLER	35
	6.1. Altaş Seçimi	35
	6.2. Numune Hazırlama ve Temizleme İşlemi	36
	6.3. VOx İnce Filmlerin Üretimi	37
	6.3.1. Magnetron reaktif sıçratma sistemi	37
	6.3.2. Üretim süreci.....	38
	6.4. VOx İnce Filmlerin X-Işını Ölçümleri	41
	6.4.1. XRR ölçümleri.....	42
	6.4.2. GIXRD ölçümleri.....	43
	6.5. Elektriksel Ölçümler	43
	6.6. Litografi Süreci	46
7.	ARAŞTIRMA BULGULARI.....	48
	7.1. VOx İnce Filmlerin Üretimindeki Argon Gaz Akış Oranı Optimizasyonu	48
	7.2. VOx İnce Filmlerin Üretimindeki Oksijen Gaz Akış Oranı Optimizasyonu ...	74

7.3. VOx İnce Filmlerin Şekillendirilmiş Alttaş Üzerine Büyütülmesi ve Elektriksel Karakterizasyonları	92
7.3.1. VOx İnce Filmlerin Üzerine Büyütüleceği Alttaşın Şekillendirilmesi ..	92
7.3.2. VOx İnce Filmlerin Alttaş Üzerine Büyütülmesi Şekillendirilmesi	98
7.3.3. Şekillendirilen VOx İnce Filmlerin Elektriksel Karakterizasyonları ..	101
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	110
KAYNAKLAR	114
Ek-1: INA 106 Datasheet	121
EK-2: Elektriksel Gürültü Ölçümü Matlab Kodları.....	123

ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1. Jarominek ve arkadaşlarının çalışmasında VO ₂ için SMT 'nin sıcaklığa bağlı elektriksel özdirenç değişimlerinin gözlenmesi	5
2.2. S. Ramanathan ve arkadaşlarının çalışmasında VO ₂ için SMT'nin sıcaklığa bağlı elektriksel özdirenç değişimlerinin gözlenmesi.....	6
2.3. Bazı VO _x bileşenlerinin, etki eden sıcaklığa bağlı olarak değişim gösteren iletkenlik grafikleri	8
3.1. Wheatstone köprüsü elektrik şeması.....	10
3.2. Basit bir mikrobolometrenin bir pikseli	11
4.1. Magnetron Sıçratma sisteminin şematik resmi	15
4.2. Reaktif sıçratma sürecinde sistem basıncı ve gaz akış histerezis eğrisi (a) ve reaktif sıçratma süreci sırasında gaz kış ve katot voltajı histerezis eğrisi (b).....	16
4.3. Vurmalı DC gücünün hedefe etkisi	17
5.1. FPP tekniğinin düzeni ve iğnenin (probe) kendi direnci R_p , kontak direnci R_c , yayılım direnci olan R_{sp} ' nin şematik olarak gösterimi	18
5.2. Düzgün geometrik şekle sahip olan ince filmlere FPP tekniği uygulanırken dikkate alınacak parametreler.....	19
5.3. Düzgün geometrik şekle sahip olan ince filmlere FPP tekniğinin uygulanması [61]	20
5.4. XRD ölçüm ve X-ışını kırınım geometrisi.....	22
5.5. XRD ölçümünde: a) yüksek açı ve b) sıyırma açı ölçüm geometrileri.....	23
5.6. İnce filmler için örnek bir XRR eğrisi	24
5.7. Zaman ve frekans eksenlerinde elektronik gürültü çeşitleri	25
5.8. Transimpedans yükselticinin kullanıldığı 1/f gürültü ölçüm düzeneği	27
5.9. INA106 fark yükselticisinin iç yapısı	28
5.10. Örnek bir fark yükselticisi devresi.....	29

5.11. 1/f gürültü ölçüm düzeneği elektronik devre şeması	30
5.12. 1/f gürültüsü ölçüm düzeneği elektronik devresi baskı şeması.....	31
5.13. 1/f gürültüsü ölçüm düzeneğinin elektronik devre kartı.....	31
5.14. 1/f gürültüsü ölçüm düzeneği elektronik kartının Faraday kafesi içerisine yerleştirilmesi	32
5.15. Signatone marka mikro-pozisyonlayıcı	33
5.16. Anadolu Üniversitesi İleri Teknoloji İnce Film Laboratuvarı'na kurulan 1/f gürültüsü ölçüm düzeneği	33
6.1. 10x10 mm ² boyutlarında kesilen Si/Si ₃ N ₄ alttaş malzemesi.....	36
6.2. Anadolu Üniversitesi İleri Teknoloji İnce Film Laboratuvarı'nda bulunan sıçratma sistemi	37
6.3. Anadolu Üniversitesi İleri Teknoloji İnce Film Laboratuvarı'nda bulunan sıçratma sistemine entegre artık gaz analiz cihazı.....	39
6.4. RGA cihazı ile temizlik ve fırınlama sonrasında vakum odasında kalan gazların miktarı (X eksen atom numaralarını, Y eksen kısmi basınçlarını belirtmektedir)	39
6.5. Bruker D8 Advance marka X-ışını ölçüm cihazı	41
6.6. VOx ince filmleri için örnek XRR eğrisi. Kalınlık, yoğunluk, yüzey ve arayüzey pürüzlülükleri modellenerek hesaplanabildiği gibi, Fourier dönüşüm metodu yardımıyla kalınlık gibi niceliklerin doğrudan tespiti yapılır	42
6.7. Anadolu Üniversitesi İleri Teknoloji İnce Film Laboratuvarı'nda bulunan dört nokta iğne tekniği elektriksel ölçüm düzeneği	44
6.8. FPP sistemi, sisteme entegre edilen ısıtıcı ve filmin yüzeyindeki sıcaklığı ölçmek için kullanılan sıcaklık ölçüm aparatı.....	45
6.9. SiN alttaş üzerine büyütülen elektrot metalleri (Metal-1: Krom, Metal-2: Altın).....	46
6.10. Kimyasal aşındırma süreçleri ile şekillendirilen elektrotlar.....	47

6.11. Parmak yapı elektrotlar üzerine büyütülen VOx ince film (şeffaf yeşil) ve koruma tabakası olarak VOx ince film üzerine büyütülen SiN tabakalarının (şeffaf kırmızı) şekillendirilmesi	47
7.1. 4/0.2 sccm Ar/O ₂ gaz akış oranında üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri	49
7.2. 4/0.4 sccm Ar/O ₂ gaz akış oranında üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri	50
7.3. 4/0.6 sccm Ar/O ₂ gaz akış oranında üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri	50
7.4. 4/0.8 sccm Ar/O ₂ gaz akış oranında üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri	51
7.5. 4/1.2 sccm Ar/O ₂ gaz akış oranında üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri	51
7.6. Si/SiN alttaş üzerine 20 nm kalınlıkta 4 sccm argon gaz akış ve % 5, 10, 15, 20 ve 30 O ₂ /Ar gaz oranlarında üretilen VOx ince filmlerin GIXRD kırınımı desenleri	52
7.7. 4 sccm argon ve 0.2 sccm O ₂ gaz akış oranında SiN alttaş üzerine 20 nm büyütülen VOx ince filmin TCR-sıcaklık eğrisi	54
7.8. 4 sccm argon ve 0.2 sccm O ₂ gaz akış oranında SiN alttaş üzerine 20 nm büyütülen VOx ince filmin TCR-sıcaklık eğrisi	55
7.9. 4 sccm argon ve 0.2 sccm O ₂ gaz akış oranında SiO ₂ alttaş üzerine 20 nm kalınlıkta büyütülen VOx ince filmin 30, 50 ve 70 µA akım değerlerindeki elektriksel gürültüsü.....	56
7.10. 4 sccm argon ve 0.2 sccm O ₂ gaz akış oranında SiN alttaş üzerine 20 nm kalınlıkta büyütülen VOx ince filmin 30, 50 ve 70 µA akım değerlerindeki elektriksel gürültüsü.....	56
7.11. Si/SiN alttaş üzerine 100 nm kalınlıkta 4 sccm argon gaz akış ve % 5, 10, 15, 20 ve 30 O ₂ /Ar gaz oranlarında üretilen VOx ince filmlerin GIXRD kırınım desenleri.....	57

7.12.4 sccm argon ve değişen O ₂ /Ar oranlarında 100 nm üretilen VO _x ince filmlerin elektriksel direnç değerlerinin değişim grafiği	58
7.13.4 sccm argon ve %10 O ₂ /Ar gaz oranında Si/SiN alttaş üzerine 100 nm büyütölen VO _x ince filmin direncinin doğal logaritmasının sıcaklıkla değişimi	59
7.14.4 sccm argon ve % 5 O ₂ /Ar gaz oranında SiO ₂ alttaş üzerine 100 nm kalınlıkta büyütölen VO _x ince filmin 30, 50 ve 70 µA akım değerlerindeki elektriksel güröltüsü.....	60
7.15.4 sccm argon ve % 5 O ₂ /Ar gaz oranında SiN alttaş üzerine 100 nm kalınlıkta büyütölen VO _x ince filmin 30, 50 ve 70 µA akım değerlerindeki elektriksel güröltüsü.....	61
7.16. Si/SiN alttaş üzerine 20 nm kalınlıkta 6 sccm argon gaz akış ve % 5, 10, 15, 20 ve 30 O ₂ /Ar gaz oranlarında üretilen VO _x ince filmlerin GIXRD kırınım desenleri	62
7.17.6 sccm argon ve 0.3 sccm O ₂ gaz akış oranında SiN alttaş üzerine 20 nm büyütölen VO _x ince filmin TCR-sıcaklık eğrisi	63
7.18.6 sccm argon ve 5% O ₂ /Ar gaz akış oranında Si/SiO ₂ alttaş üzerine 20 nm kalınlıkta büyütölen VO _x ince filmin 30, 50 ve 70 µA akım değerlerindeki elektriksel güröltüsü.....	64
7.19. 6/0.3 Ar/O ₂ gaz oranlarında 20 nm üretilen VO _x ince filmin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri.....	65
7.20. 6/0.6 Ar/O ₂ gaz oranlarında 20 nm üretilen VO _x ince filmin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri.....	65
7.21.6 sccm argon ve %10 O ₂ /Ar gaz oranında Si/SiN alttaş üzerine 100 nm büyütölen VO _x ince filmin TCR-sıcaklık eğrisi	66
7.22. Si/SiN alttaş üzerine 100 nm kalınlıkta 6 sccm argon gaz akış ve 5, 10 % O ₂ /Ar gaz oranlarında üretilen ince filmlerin GIXRD kırınım desenleri	67
7.23.6 sccm argon ve 5% O ₂ /Ar gaz akış oranında Si/SiO ₂ alttaş üzerine 100 nm kalınlıkta büyütölen VO _x ince filmin 30, 50 ve 70 µA akım değerlerindeki elektriksel güröltüsü.....	68

7.24. 8/0.4 Ar/O ₂ gaz oranlarında 20 nm üretilen VO _x ince filmin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri.....	69
7.25. Si/SiN alttaş üzerine 20 ve 100 nm kalınlıkta 8 sccm argon gaz akış ve 5 % O ₂ /Ar gaz oranında üretilen VO _x ince filmlerin GIXRD kırınım desenleri	70
7.26. 8 sccm Ar ve %5 O ₂ /Ar gaz oranında Si/SiN alttaş üzerine 100 nm büyütülen VO _x ince filmin TCR-sıcaklık eğrisi	70
7.27. 4, 6 ve 8 sccm argon gaz akış ve % 5 O ₂ /Ar oranlarında üretilen 100 nm VO _x ince filmlerin elektriksel direnç ve TCR değerleri karşılaştırma grafiği	72
7.28. 4 ve 6 sccm argon gaz akış ve % 10 O ₂ /Ar oranında üretilen 100 nm VO _x ince filmlerin elektriksel direnç ve TCR değerleri karşılaştırma grafiği	73
7.29. 4/0.22 Ar/O ₂ gaz oranlarında 20nm üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri	75
7.30. 4/0.26 Ar/O ₂ gaz oranlarında 20nm üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri	75
7.31. 4/0.30 Ar/O ₂ gaz oranlarında 20nm üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri	76
7.32. 4/0.34 Ar/O ₂ gaz oranlarında 20nm üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri	76
7.33. 4/0.38 Ar/O ₂ gaz oranlarında 20nm üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri	77
7.34. 4 sccm Ar ve 0.38 sccm O ₂ gaz akış oranında Si/SiN alttaş üzerine 20 nm büyütülen VO _x ince filmin TCR-sıcaklık eğrisi	78
7.35. 4 sccm argon ve % 9,5 O ₂ /Ar gaz akış oranında SiN alttaş üzerine 20 nm kalınlıkta büyütülen VO _x ince filmin 10 ve 20 µA akım değerlerindeki elektriksel gürültüsü.....	79
7.36. 8/0.22 sccm Ar/O ₂ gaz oranlarında 20nm üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri.....	80

7.37. 8/0.26 sccm Ar/O ₂ gaz oranlarında 20nm üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri.....	81
7.38. 8/0.30 sccm Ar/O ₂ gaz oranlarında 20nm üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri.....	81
7.39. 8/0.34 sccm Ar/O ₂ gaz oranlarında 20nm üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri.....	82
7.40. 8/0.38 sccm Ar/O ₂ gaz oranlarında 20nm üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri.....	82
7.41. 8 sccm Ar ve 0.26 sccm O ₂ gaz akış oranında Si/SiN alıtış üzerine 20 nm büyütülen VOx ince filmin TCR-sıcaklık eğrisi	84
7.42. 4 sccm argon ve 0.38 sccm O ₂ gaz akış oranında Si/SiN alıtış üzerine 20 nm üretilen VOx ince filmin TCR-sıcaklık eğrisi	85
7.43. 4 sccm argon ve 0.39 sccm O ₂ gaz akış oranında Si/SiN alıtış üzerine 20 nm üretilen VOx ince filmin TCR-sıcaklık eğrisi	86
7.44. #4 serisi 20 nm VOx ince filmlerin üretimlerindeki akım-voltaj değerlerinin grafiği.....	87
7.45. #44 serisi 100 nm VOx ince filmlerin üretimlerindeki akım-voltaj değerlerinin grafiği	87
7.46. #6 serisi 20 nm VOx ince filmlerin üretimlerindeki akım-voltaj değerlerinin grafiği.....	88
7.47. #42 serisi 20 nm VOx ince filmlerin üretimlerindeki akım-voltaj değerlerinin grafiği	88
7.48. 200 nm Si ₃ N ₄ kaplı 4” alıtış malzemesi	93
7.49. Farklı parmak sayısı ve parmak uzunluklarındaki elektrot yapıları için şekillendirilen fotorezist malzemelerinin optik mikroskop görüntüleri.....	94
7.50. Kimyasal aşındırma ve rezist kaldırma süreçleri sonrasında 4” alıtışın resmi.....	95
7.51. 25/75 nm Cr/Au kaplı elektrotların şekillendirildikten sonraki optik mikroskop görüntüsü.	96

7.52. Anizotropik (a) ve izotropik (b) aşındırma.	96
7.53. 25/75 nm Cr/Au kaplı farklı parmak yapılarıdaki elektrotların şekillendirildikten sonraki SEM resmi. Parmak yapılarıda 0.3 µm fazladan aşınmaların olduğu görülmektedir.	97
7.54. Elektrotların şekillendirildiği alttaş dairesel kesim işlemi sonrasında 3” boyutuna küçültülmüştür.	98
7.55. 25/75 nm Cr/Au üzerine 100 nm VOx kaplı iki farklı elektrodun şekillendirildikten sonraki optik mikroskop görüntüleri.	99
7.56. Aşındırma sonucu şekillendirilen alttaşın (a), kullanılan maskenin (b), şekillendirilen VOx ince filmlerin optik (c) ve SEM (d) (e) resimleri.	100
7.57. 3” alttaş üzerinde elektrotların dağılımı. Her bir numara ile gösterilen parçada aynı sayıda ve şekilde elektrot yapıları bulunmaktadır.	101
7.58. 3” alttaş üzerine parmak yapıda şekillendirilen elektrotlar.	101
7.59. VOx ince filmlerin #5, #8, #9, #10 ve #13 numaralı parçalardaki direnc değerleri göz önüne alındığında, değişmezlik % 5.1 olarak hesaplanmıştır.	103
7.60. 60 kΩ dirence sahip VOx ince filmler için TCR - sıcaklık (T) grafiği verilmiştir ve TCR değeri 2.63%/°C olarak hesaplanmıştır.	104
7.61. VOx ince filmler için 5, 10 ve 20 µA akım değerlerinde 10 Hz – 40 kHz arasında 1/f gürültü ölçümleri yapılmıştır. Gürültü değerlerinin akıma bağlı değiştiği gözlenmiştir ancak yapılan hesaplamalarda köşe frekansının yaklaşıl (f_c) 40 kHz olduğu görülmüştür. Grafikte “TNF (teoretical noise floor)” ile belirtilen seviyeler, teorik hesaplamalar sonucu çıkan teorik gürültü seviyelerini göstermektedir.	105
7.62. 200 °C’de 3 saat ısı işlem gören VOx ince filmin 5, 10 µA akımlarında 1/f gürültüsü ölçüm grafikleri.	106
7.63. 300 °C’de 3 saat ısı işlem gören VOx ince filmin 5, 10 µA akımlarında gürültü ölçüm grafikleri.	107

7.64.200 °C azot atmosferinde farklı sürelerde tavlanan filmlerin sıcaklık – TCR grafikleri.....	108
7.65.200 °C azot atmosferinde farklı sürelerde tavlanan VOx ince filmlerin 1/f gürültü ölçümü sonuçları.....	108

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge.2.1: Mikrobolometre uygulamalarında kullanılan malzemelerin 1/f gürültü değerleri [51, 70]	9
Çizelge 6.1. VOx ince filmlerin üretim planı	41
Çizelge 7.1. 4 sccm Ar ve değişen O ₂ oranlarında üretilen VOx ince filmlerin kalınlık değerleri.....	49
Çizelge 7.2. 4 sccm Ar ve değişen O ₂ oranlarında SiN alttaş üzerine büyütülen VOx ince filmlerin elektriksel özellikleri	53
Çizelge 7.3. 4 sccm argon ve değişen oksijen oranlarında SiN alttaş üzerine 100 nm üretilen VOx ince filmlerin elektriksel özellikleri.....	58
Çizelge 7.4. 4 sccm Ar ve farklı oksijen oranlarında 100 nm üretilen VOx ince filmlerin üretim güç parametreleri.....	60
Çizelge 7.5. 6 sccm Ar ve değişen O ₂ oranlarında üretilen VOx ince filmlerin kalınlık değerleri.....	61
Çizelge 7.6. 6 sccm Ar ve farklı O ₂ oranlarında 20 nm üretilen VOx filmlerin elektriksel değerleri.....	62
Çizelge 7.7. 6 sccm Ar ve farklı O ₂ oranlarında üretilen 100 nm VOx filmlerin elektriksel değerleri.....	66
Çizelge 7.8. 8 sccm Ar ve 0,4 sccm O ₂ oranında 20 nm üretilen VOx filmin elektriksel değerleri.....	68
Çizelge 7.9. 8/0.4 sccm Ar/ O ₂ oranında 100 nm üretilen VOx filmlerin elektriksel özellikleri.....	69
Çizelge 7.10. Si/SiN alttaş üzerine 4, 6 ve 8 sccm argon gaz akış ve % 5, 10, 15, 20 ve 30 O ₂ /Ar oranlarında üretilen VOx ince filmlerin elektriksel özellikleri.....	71
Çizelge 7.11. 4 sccm argon gaz akış ve % 5-10 arası O ₂ /Ar oranlarında üretilen VOx ince filmlerin üretim parametreleri	74

Çizelge 7.12. 4 sccm argon gaz akış ve % 5-10 arası O ₂ /Ar oranlarında üretilen VOx ince filmlerin kalınlık değerleri.....	77
Çizelge 7.13. 4 sccm argon gaz akış ve % 5-10 arası O ₂ /Ar oranlarında SiN altaş üzerine 20 nm büyütülen VOx ince filmlerin elektriksel özellikleri	78
Çizelge 7.14. 8 sccm argon gaz akış ve 2.5-5 % O ₂ /Ar oranlarında üretilen 20 nm VOx ince filmlerin üretimlerinin listesi.	80
Çizelge 7.15. 8 sccm argon gaz akış ve % 2.5-5 O ₂ /Ar oranlarında üretilen 20 nm VOx ince filmlerin kalınlık değerleri.....	83
Çizelge 7.16. 8 sccm argon gaz akış ve % 2.5-5 O ₂ /Ar oranlarında üretilen 20 nm VOx ince filmlerin elektriksel özellikleri	83
Çizelge 7.17. 4 sccm Ar ve % 9,25-9,75 arası O ₂ /Ar oranlarında 20 nm üretilen VOx ince filmlerin O ₂ /Ar gaz akış parametreleri.....	84
Çizelge 7.18. 4 sccm Ar ve % 9,25-9,75 arası O ₂ /Ar oranlarında 20 nm üretilen VOx ince filmlerin elektriksel özellikleri	85
Çizelge 7.19. 4 sccm Ar ve 0.38-0.39 sccm O ₂ oranlarında SiN altaş üzerine 100 nm üretilen VOx ince filmlerin elektriksel özellikleri.....	86
Çizelge 7.20. 4 sccm Ar ve 0.38 sccm O ₂ oranlarında SiN altaş üzerine 100 nm büyütülen VOx ince filmin elektriksel özellikleri.	89
Çizelge 7.21. 4/0.38 Ar/O ₂ gaz oranlarında 100 nm kalınlıkta adım adım üretilen VOx ince filmlerin elektriksel özellikleri	90
Çizelge 7.22: 2 sccm Ar ve 0.40, 0.44, 0.48 sccm O ₂ gaz akış oranlarında 20 nm kalınlıkta üretilen VOx ince filmlerin elektriksel direnç değerleri.....	91
Çizelge.7.23: 2 sccm Ar ve 0.40 sccm O ₂ gaz akış oranında 100 nm kalınlıkta üretilen VOx ince filmin elektriksel direnç değerleri.	92
Çizelge.7.24: 3” altaş üzerine şekillendirilen elektrotların boyutları	102
Çizelge.7.25: VOx ince filmlerin #5, #8, #9, #10 ve #13 numaralı parçalardaki elektrot grubundan ölçülen elektriksel direnç değerleri.....	103
Çizelge.7.26: 200 ve 300 °C sıcaklıklarda 3 saat ısıl işleme tabi tutulan VOx ince filmlerin elektriksel özellikleri verilmiştir.	106

Çizelge.7.26: 200 °C sıcaklıklarda 1 ve 2 saat ısıtılma tabii tutulan VOx ince filmlerin elektriksel özellikleri	107
Çizelge.8.1: Üretilen VOx ince filmin TCR performansının literatürdeki diğer üretim yöntemleri ile ve diğer aktif malzemeler ile karşılaştırılması	112
Çizelge.8.2: Farklı aktif malzemelerin 1/f gürültü değerlerinin karşılaştırılması [51, 70].....	112

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

VO _x	: Vanadyum Oksit
SMT	: Yarı iletken Metale Geçiş
IR	: Kızılötesi ışınım (Infrared Radiation)
SiO ₂	: Silisyum Oksit
Si ₃ N ₄	: Silisyum Nitrür
PDC	: Vurmalı Direkt Akım (Pulsed Direct Current)
XRD	: X-Işını kırınımı (X-ray Diffraction)
XRR	: X-Işını yansımaları (X-ray Reflectivity)
GIXRD	: Sıyırma açısında X-ışını kırınımı (Grazing Incidence X-ray Diffraction)
TCR	: Elektriksel direncin sıcaklık sabiti (Temperature Coefficient of Resistance)
FPP	: Dört nokta iğne (Four Point Probe)
ROS	: Yaprak direnci (Resistance of Square)
MEMS	: Mikro elektro mekanik sistemler (Mikro Electro-Mechanical Systems)
R	: Direnç (Resistance)
ρ	: Özdirenç
Ω	: Ohm
A	: Akım (Amper)
AC	: Alternatif akım (Alternative current)

DC	: Direkt akım (Direct current)
mTorr	: militorr
nA	: nano-amper
sccm	: Standart santimetreküpten dakika başına akan gaz miktarı (Standard cubic centimeters per minute)
MOS	: Metal oksit yarı-iletken (Metal Oxide Semiconductor)
CMOS	: Bütünleyici metal oksit yarı-iletken (Complimentary Metal Oxide Semiconductor)
α	: Alfa
ω	: Omega
λ	: Dalga boyu (Wavelength)
Hz	: Hertz
kV	: Kilovolt
mm	: milimetre (10^{-3} metre)
nm	: nanometre (10^{-9} metre)
$^{\circ}\text{C}$: Santigrat derece
$^{\circ}\text{K}$: Kelvin derece
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme (Chemical Vapor Deposition)
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme (Physical Vapor Deposition)
Ar	: Argon gazı
N_2	: Azot gazı
O_2	: Oksijen gazı
E	: Elektrik Alan

B	: Manyetik Alan
V	: Gerilim (Voltage)
I	: Akım (Current)
C	: Kapasitans (Capacitance)
Å	: Angstrom (10^{-10} metre)
W	: Watt
PSD	: Güç spektral analizi (Power Spectrum Analyses)
PCB	: Baskı devre kartı (Printed Circuit Board)
RGA	: Kalıntı gaz analiz cihazı (Residual Gas Analyzer)

1. GİRİŞ ve AMAÇ

Vanadyum Oksitler (VOx) 3d geçiş metalleri ailesinin bir üyesi olarak karşımıza çıkmaktalar ve belirli sıcaklıklarda yarıiletken fazdan metal faza geçiş (Semiconductor to Metal Transition, SMT) özelliği göstermektedirler [1, 2]. VOx bileşenlerinin on beşten fazla kararlı fazı vardır ve bu bileşenler genel olarak iki gruba ayrılarak incelenir. Bunlar; V_nO_{2n+1} tipi VO₂-V₂O₅ aralığında olanlar ve V_nO_{2n-1} tipi VO₂-V₂O₃ aralığında olan bileşiklerdir. VO₂-V₂O₅ fazları arasında V₃O₇, V₄O₉ ve V₆O₁₃ ara fazları bulunmaktadır. VO₂-V₂O₃ fazları arasında kalan fazlara ise Magneli fazları denilmektedir [2].

VOx'un SMT araştırmalarının büyük bir çoğunluğu tek kristal malzemeleri üzerine odaklanmıştır [3] ve sıcaklığa bağlı olarak görülen faz geçişiyle değişen bant aralığı ve histerezis değerleri sadece VO₂ tek kristalinde ortaya çıkmaktadır. VO₂'nin birinci derece SMT sıcaklığı, oda sıcaklığına yakın olan 67 °C'de ortaya çıkarak, faz geçişi sırasında, belirgin, ani ve tersine çevrilebilir değişiklikler belirlenmektedir. Bu değişiklikler VOx'ların elektronik ve optik uygulamalarda kullanım potansiyelini önemli ölçüde arttırmaktadır [4-8]. Özellikle filmin elektriksel özelliklerinde olan değişimler, VOx bileşenlerini soğutmasız IR-detektörlerde (mikrobolometre) kullanılan en önemli malzemelerden biri yapmaktadır [9-13].

Bu tez çalışmasında, iki farklı altlık üzerine aynı üretim parametreleri kullanılarak biriktirilmiş VOx ince filmlerin yapısal ve elektriksel özelliklerinin incelenmiştir. İstenilen elektriksel özellikleri gösteren VOx ince filmler, litografi işlemleri sonucunda parmak yapıda şekillendirilen elektrot malzemelerinin üzerine büyütülmüştür. Büyütülen bu filmlerin 1/f gürültü ve TCR ölçümleri analizlerinin yapılması ve bu değerlerin mikrobolometre sistemleri için uygunluğunun değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü İleri Teknoloji İnce Film Laboratuvarı'nda bu konuyla ilgili daha önce yapılan yüksek lisans tezlerinde, VOx ince filmlerin yapısal ve elektriksel özellikleri ile ısıl işlem süreçleri ve bunun VOx ince filmin özelliklerine etkisi çalışmaları yapılmıştır [1,2]. Bu tez kapsamında, daha önce yapılmamış olan litografi süreçleri ile alttaşlar şekillendirilerek ve bu alttaşların

üzerine büyütülen filmlerin yapısal, elektriksel ve yine daha önce yapılmamış 1/f gürültüsü karakterizasyonu çalışmalarının yapılması amaçlanmıştır.

Bu amaç kapsamında VO_x ince filmler 1000 nm termal silisyum dioksit(SiO₂) ve 250 nm silisyum nitrür (Si₃N₄) kaplı silisyum [Si(100)] altlıklar üzerine aynı üretim koşulları altında, vurmali (pulsed) DC (PDC) magnetron sıçratma metodu ile 20 ve 100 nm kalınlığa ulaşacak şekilde oda sıcaklığında üretilmiştir. Filmlerin kalınlıkları, yüzey ve ara yüzey pürüzlülükleri X-Işını teknikleri ile belirlenmiştir. Elektriksel direnç, elektriksel özdirenç ve filmlerin dirençlerinin sıcaklık katsayıları (TCR) dört nokta iğne (FPP) tekniği ile hesaplanmıştır. Uygulamalar için istenilen elektriksel özellikleri gösteren VO_x ince filmler, litografisi yapılmış ve parmak yapıda şekillendirilmiş Krom(Cr)/Altın(Au) elektrotlar üzerine büyütülmüştür. İleri Teknoloji İnce Film Laboratuarına elektriksel gürültü ölçüm düzeneği kurulup, filmlerin litografi süreçleri öncesi elektriksel gürültü ölçümleri bu düzende yapılmıştır. Litografi süreçleri sonrasında şekillendirilen VO_x ince filmlerin TCR ve 1/f gürültü ölçümleri ODTÜ-MEMS Merkezi'nde yapılmıştır. Elde edilen sonuçların mikrobolometre sistemleri için uygunluğu değerlendirilmiştir.

2. VANADYUM OKSİTLERİN ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI

Geçiş metal oksitlerinden olan VOx'ların, gösterdikleri ilginç fiziksel fenomenler nedeniyle bilimsel araştırma ve uygulamalarda geniş alana sahiptirler. Bu metal oksitlerin bazıları faz geçişleri göstermektedirler [6,7]. Bu geçiş esnasında elektriksel direnç ve optik özelliklerinde önemli değişimler olmaktadır [4,5]. Bu değişimlerin birçok alanda uygulama potansiyeli olduğundan dolayı bu malzemeye olan ilgiyi son yıllarda arttırmıştır. VOx ince filmler, yüksek elektriksel direncin sıcaklık sabiti (TCR) ve düşük elektriksel direnç değerlerinden dolayı özellikle mikrobolometre uygulamalarında kullanılan en önemli ince film direnç malzemesidir [9,11].

2.1. Bilinen Vanadyum Oksitler ve Özellikleri

Dördüncü periyot, 5B grubu, d-blok elementi olan Vanadyum birçok değerlik durumuna sahiptir. Kendisinin elektronik dizilimi olan 3d³ 4s²'deki yarı dolu d kabuğundan kaynaklı olarak birçok oksit değerliliğine sahiptir ve hepsinin birbirinden farklı özellikleri bulunmaktadır [14]. Vanadyum oksitleri ve vanadyum oksit temelli malzemeleri çeşitli uygulamalarda kullanılabilir kılan özellikleri, vanadyumun kısmen dolu d-bandından kaynaklanmaktadır. Vanadyumun bu çok değerlikli karakteri (+2, +3, +4, +5) nedeniyle oluşan bu bağlar, kristal yapısında, kusur oluşumunda ve dışarıdan elektron transferini etkilemektedir [15]. Vanadyum sahip olduğu birçok oksit değerliliğine rağmen, VO, VO₂, V₂O₃, V₂O₅ ve VO₃ gibi tek fazda bulunabildiği gibi, karışık fazda da bulunabilmektedir [14, 16]. Bununla beraber, Vanadyum-Oksijen oranına bağlı olarak kristal yapısı ve malzemenin özellikleri tamamen değişmektedir. Örneğin, VO kaya-tuzu yapısında, V₂O₃ 165 °K'in üstündeki sıcaklıklarda korundum yapısında ve paramanyetik metalik fazda bulunurken, 165 °K'in altındaki sıcaklıklarda monoklinik yapıda ve antiferromanyetik yalıtkan fazda bulunmaktadır [14]. VO₂ 340 °K'de diamanyetik yalıtkan fazından paramanyetik metalik faza geçiş gözlenmektedir. V₂O₅ ise oda sıcaklığında diamanyetik yalıtkan ortorombik yapıda bulunmaktadır [14].

Vanadyum oksitler bileşenlerinin bir kısmı sıcaklık, basınç ve elektrik alan gibi dış etkenler ile yarıiletken fazdan metal faza geçiş özelliği gösterir [17]. Bu geçişler sırasında kristal yapısı değişime uğrayan malzemenin manyetik, optik

ve elektriksel özelliklerinde belirgin değişimler meydana gelmektedir. Örneğin dönüştüğü faza göre IR bölgede geçirgenliği artar veya azalır, elektriksel direnç ve öz direncinde artış veya düşüş gözlemlenebilir [17].

VO_x ile ilgili olarak bildirilen bütün stokiyometrilere, 2:2 Vanadyum Oksijen oranı (VO) ile 2:5 Vanadyum Oksijen oranı (V₂O₅) arasında değiştiği bildirilmiştir [16, 18]. Ancak faz geçiş özelliği ancak VO, V₂O₃ ve VO₂ fazlarında gözlemlenmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda V₂O₅ ve VO₂ fazlarının özellikleri dikkat çekmektedir [16, 18-21]. V₂O₅ valans hali en yüksek vanadyum oksit bileşimidir ve aynı zamanda en kararlı fazı olarak bilinir. V₂O₅ katmanlı yapıya sahip olması nedeni ile katkılama malzemesini kolayca kabul etmesi ve VO₂ de oda sıcaklığı civarında faz geçişi göstermesinden dolayı dikkatleri üzerine çekmektedir [18-21].

VO_x'lere en yakın stokiyometriye sahip VO₂'nin üretimi, üretim sırasında ve üretim sonrasında başka birçok oksidin oluşabilme ihtimali yüzünden oldukça zordur. Buna rağmen, VO₂'nin sahip olduğu benzersiz yapısal ve elektriksel özellikler, özel işlemlerle üretebilen bu malzemenin oda sıcaklığında gösterdiği SMT özelliği ile değişen birçok özelliğinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu özellikler bu bölümün devamında ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

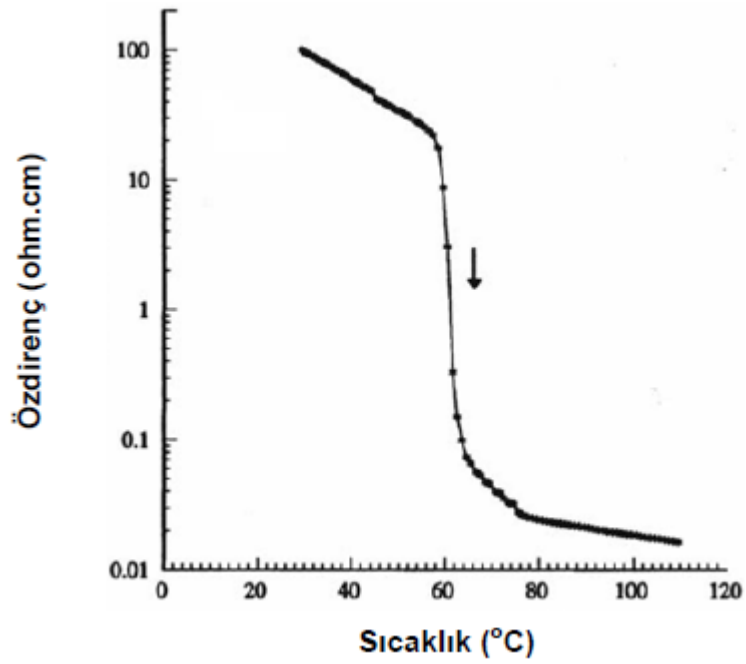
2.2. Faz Geçiş Sırasındaki Yapısal Değişimleri

VO₂ 68 °C'ye yakın sıcaklıklarda yapısal olarak faz geçişi göstermektedir. Yapısal olarak VO₂, düşük sıcaklıklarda düşük simetriye sahip monoklinik yapıdan, yüksek sıcaklıklara doğru çıktığında yüksek simetriye sahip tetragonal yapıya değişime uğramaktadır [4-7,14].

Malzemenin elektronik bant yapısı kristal yapıya bağlı olduğundan, kristal yapıdaki değişim nedeniyle bant yapısı da değişmektedir. Değişen kristal yapıları, faz geçişinin doğasını anlamak için modellemeler ve çalışmalar halen devam etmektedir [22]. Faz geçişine bağlı, hesaplanarak yapılan bazı modellemeler sonucunda, VO₂'nin bant yapısının da değiştiği anlaşılmıştır. Bu geçişin doğasına bağlı olarak, malzemenin teorik çalışmalarının büyük çoğunluğu, bant yapısı, Fermi seviyeleri, yasak enerji aralıkları ve elektriksel özellikleri üzerine yoğunlaşmaktadır [23,24].

2.3. Faz Geçişi Sırasındaki Elektriksel Özelliklerin Değişimi

VO₂'nin SMT özelliği aslında elektriksel özdirence bağlı olarak açıklanmaktadır [18]. Jarominek ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaların [25] sonucunda, Şekil 2.1'de 68°C'nin altındaki sıcaklıklarda, 20 Ω.cm özdirence sahip yarıiletken fazda olan VO₂, sıcaklığın artışıyla beraber metal faz olan 8x10⁻² Ω.cm'ye kadar düşerek SMT özelliği gösterdiği belirtilmiştir.

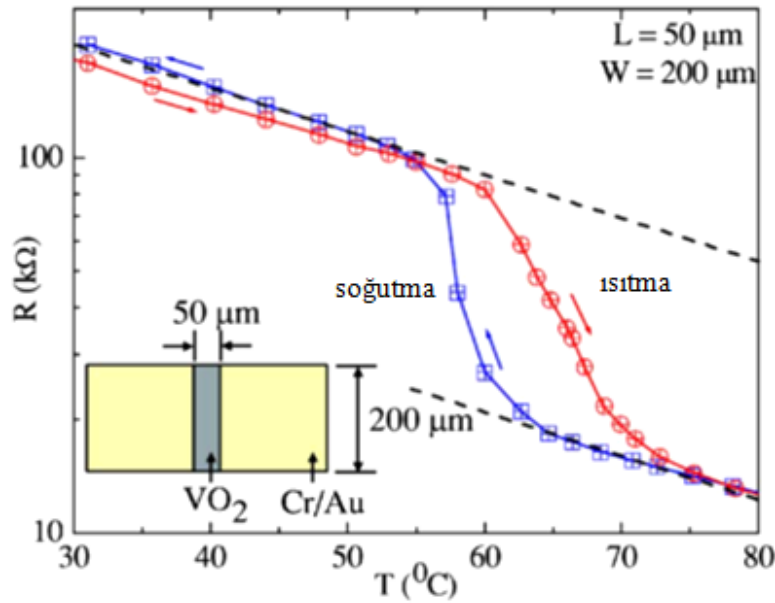


Şekil 2.1. Jarominek ve arkadaşlarının çalışmasında VO₂ için SMT 'nin sıcaklığa bağlı elektriksel özdirenç değişimlerinin gözlenmesi [25]

SMT sırasındaki elektriksel değişimin büyüklüğünü göstermek için ise, elektriksel direncin sıcaklık sabiti (Temperature Coefficient of Resistance, TCR) kullanılmaktadır. Malzemenin elektriksel özelliklerindeki değişimler ile belirlenen TCR değeri üstün nitelikteki algılayıcılar, termal detektörler ve benzeri elektronik cihazların üretimi için en önemli parametredir [26-29]. Mikro elektro-mekanik sistemlerin üretimi (Micro Electro-Mechanical Systems, MEMS) ve elektronik uygulamalarda, yüksek yüzey direnci (Resistance of Square, ROS) değeriyle beraber gelen 1/f gürültü oranı cihazların performanslarını ve hassasiyetlerine

doğrudan etkisi olup kısıtlamaktadır [30,31]. Bu nedenle ideal ROS değeri $\sim 20 \text{ k}\Omega/\square$ sınırlandırılmış, istenilen TCR değeri ise birim sıcaklık başına $-\% 2$ 'nin altında olması beklenmektedir [32,33].

VO_x ince filmlerin elektriksel özellikleri incelenirken kullanılan elektriksel direnç-sıcaklık ilişkisinde, ısıtma ve soğutma ile belirlenen Şekil 2.2'de gösterilen ısıtma ve soğutma sonucu oluşan histerezis eğrisi, genel olarak ince filmin elektriksel özellik ile yapısal özellikler arasındaki bağlantıyı içermektedir.



Şekil 2.2. S. Ramanathan ve arkadaşlarının çalışmasında VO₂ için SMT'nin sıcaklığa bağlı elektriksel öz direnç değişimlerinin gözlenmesi [7]

2.4. Faz Geçişi Sırasındaki Optik Değişimler

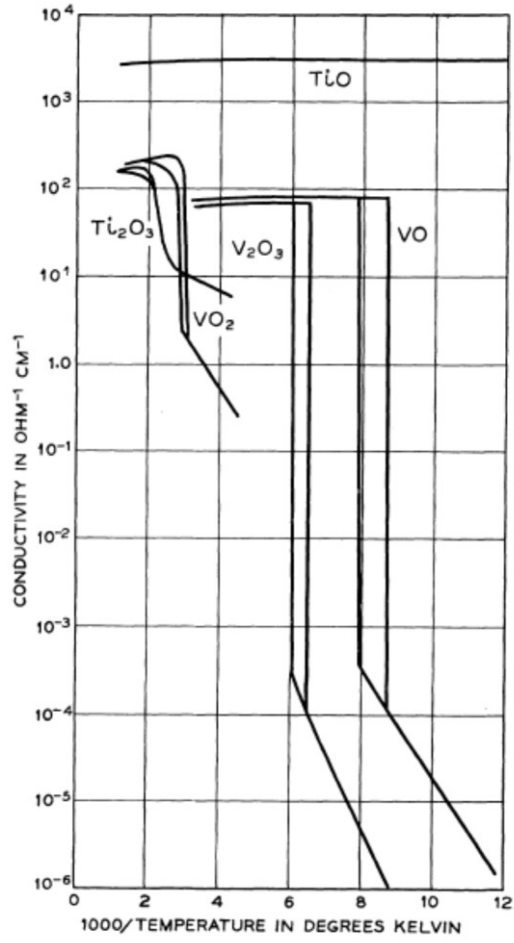
VO₂'nin optik özellikleri 1959 yılında Morin'in yayımladığı makalenin ardından incelenmeye başlanmıştır. VO₂ ince filmlerin optik geçirgenliğinin kızılötesi bölgede olduğunun belirlenmesiyle [5,34,35] histerezis ve geçiş hızı bağlantılı çalışmalar için başlangıç teşkil etmektedir. Bu noktadaki en önemli ayrıntı, VO₂'nin faz geçişi sırasındaki optik değişimin piko saniyenin de altındaki mertebelerde gerçekleşmesidir [36].

2.5. Faz Geçişini Etkileyen Faktörler

VO₂'nin faz geçişinin gözlemlendiği sıcaklık 68 °C olsa da, faz geçişine sıcaklıktan başka etki eden faktörler de bulunmaktadır. Bu faktörler, stokiyometri, parçacık boyutu, stres, tanecikler (grain) arasındaki yönelim bozuklukları, kalınlık, morfolojik hatalar, katkılardır. Bu faktörler geçiş sıcaklığını, hatta gidiş dönüş arasında oluşan farkı ve geçişin keskinliğini etkilemektedir [29,37,38].

2.6. Vanadyum Oksitlerle İlgili Yapılan Çalışmalar

1959 yılında F. Morin'in keşfettiği bu faz geçiş özelliğinden beri VO_x ince filmler üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır [18]. Morin'in makalesinde, VO, VO₂, V₂O₃ ve farklı bazı metal oksitlerin faz geçiş ve iletkenlik özellikleri incelenmiştir. Yalıtkan fazdan metalik faza olan geçiş süresince, VO ve V₂O₃'ün VO₂'ye göre çok hızlı ve fazla oranda iletkenliklerinde değişim olduğu gözlenmektedir; fakat VO₂'nin en önemli özelliği oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda bu geçiş özelliğini göstermesidir. Oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda gerçekleşen bu faz geçişi birçok karakterizasyon tekniğinin de kullanımına olanak sağlamaktadır.



Şekil 2.3. Bazı VO_x bileşenlerinin, etki eden sıcaklığa bağlı olarak değişim gösteren iletkenlik grafikleri [18]

Yapılan çalışmalar Vanadyum oksitlerde, üretim sırasındaki O₂/Ar oranının filmin TCR ve öz direnç değerlerini etkilediğini göstermektedir. O₂/Ar oranı arttıkça birikme oranının aniden düştüğü ve sonrasında sabit kaldığı, filmin elektriksel öz direncinin, direncinin ve TCR değerinin arttığı gözlenmiştir. Yüksek TCR ve düşük direnç değerlerinin % 15-20 O₂/Ar oranlarında elde edileceği gözlenmiştir [28,29,39-41].

Vanadyum oksitlerde basınç veya elektrik alan altında da faz geçişi gözlenmektedir. İletkenlik mekanizmasının düşük elektrik alanlarda Schottky mekanizması, yüksek alanlarda ise Poole-Frankel mekanizması olduğu tespit edilmiştir [22].

Üretim sonrası uygulanan ısı işlem süreci, filmlerin yapısını değiştirmektedir [6,42,43]. Üretim sonrası tavlama işlemi, filmlerin kristallenmesine, tane boyutunun ve pürüzlülüğün değişmesine neden olmaktadır. Tavlama işlemi sonucunda filmlerin elektriksel özdirenç, direnç ve TCR değerlerinde değişimler gözlenmiştir [43,44]. Ayrıca amorf yapıda büyüyen filmlerde, tavlama işlemleri sonucunda kristallenme gözlenmiştir [7,43]. Tane boyunun ve kristallenmenin histerezis döngü genişliğine etkisi olduğu ve bunların filmin kalınlığına bağlı olduğu, ayrıca kalın filmlerde histerezis döngü genişliğinin daha düşük çıktığı gözlenmiştir [42,43,45]. Yapılan diğer çalışmalarda ise üretim sonrası yapılan periyodik ısıtma-soğutma işleminin de histerezis genişliğini düşürdüğü gözlenmiştir [6,7].

VOx ince filmlerin 1/f gürültüsü üzerine yapılan çalışmalarda, gürültünün filmdeki mekanik streten kaynaklandığı, filmin karışık fazlarının ve tane boyutunun da gürültüyü etkilediği belirlenmiştir [47,48]. Bütünleyici metal-oksit yarı iletken (CMOS) teknolojisinde Vanadyum Oksit ince filmler YBCO ince filmlerden daha düşük elektriksel gürültü değerine sahip oldukları için tercih edilmektedir [27,49]. Gürültü ölçümleri 10-10000 Hz frekans aralığında farklı bias akımlarında gerçekleştirilmiştir [11,29,50-54,62].

Vanadyum oksitleri mikrobolometre uygulamalarında diğer malzemelerden değerli kılan özelliği düşük 1/f gürültüsüdür. 1/f gürültüsü bolometre uygulamalarında baskın olan gürültü parametresidir. Bu değer düşük olması istenmektedir. Çizelge 2.1’de bolometre uygulamalarında kullanılan malzemelerin 1/f gürültü değerleri verilmektedir. Çizelge 2.1’de de görüldüğü gibi VOx ince filmlerin elektriksel gürültü değerleri diğer malzemelerden daha düşük seviyelerdedir.

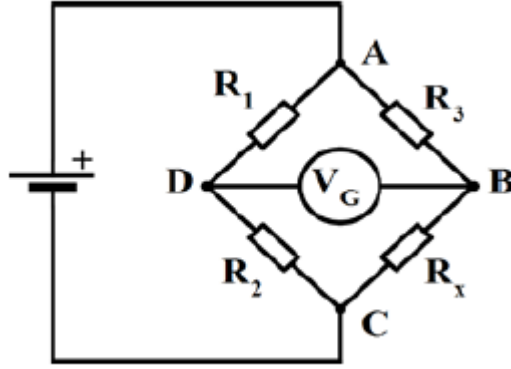
Çizelge.2.1: Mikrobolometre uygulamalarında kullanılan malzemelerin 1/f gürültü değerleri [51, 70]

Malzeme	1/f Gürültü (V ² /Hertz)
VOx	2.3x10 ⁻¹⁴ @ 30 Hz, 25 µA
a-Si	4x10 ⁻¹² @ 1Hz, 33 nA
Si _x Ge _{1-x}	7x10 ⁻¹³ @ 250 Hz, 4 µA
YBCO	9x10 ⁻¹⁴ @ 20 Hz, 0.41 µA

3. MİKROBOLOMETRELER ve ÖZELLİKLERİ

Bolometre; metallerin elektrik akımına karşı gösterdikleri direncin, ısı etkisiyle değişmesinden yararlanarak ışık şiddetlerini ölçen termal detektörlerdir.

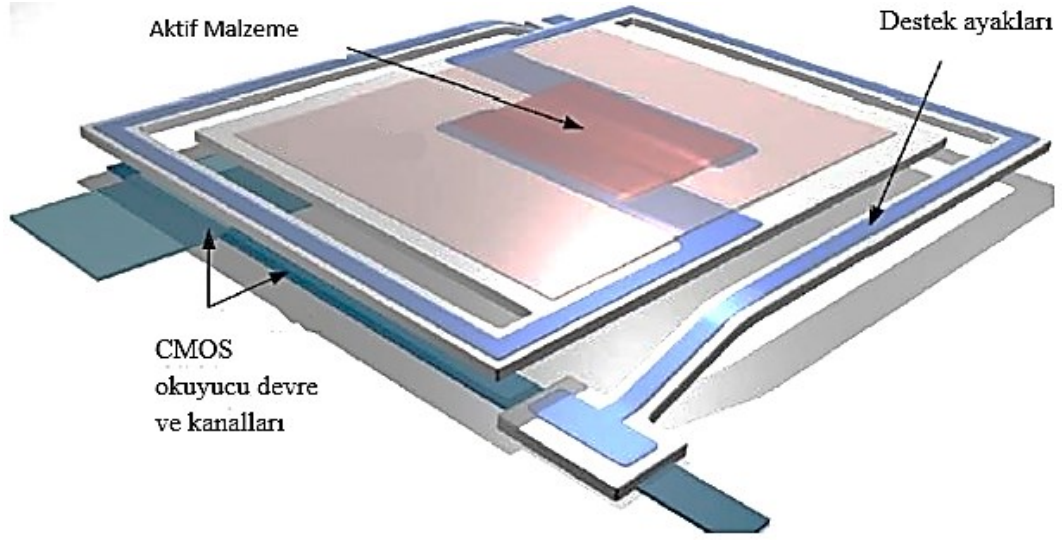
İlk bolometre 1880 yılında Samuel Pierpont Langley tarafından yapılmıştır [55]. Tasarımı çok basit ve başarılı olmuştur. Tasarımında, Şekil 3.1'deki Wheatstone köprüsü kullanmış ve şekildeki R_1 ve R_2 yerine aynı elektriksel dirence sahip iki platin tel kullanmıştır. Bu tellerden sadece bir tanesi siyah bir lamba ile kapatıp kızılötesi radyasyona maruz kalması engellenmiştir. Kızılötesi radyasyona maruz kalıp ısınan telin direncindeki değişim Wheatstone köprüsünün dengesini bozmuştur. Böylece ilk bolometre tasarımında kızılötesi radyasyon ile direnç değişimi gözlenmiştir.



Şekil 3.1. Wheatstone köprüsü elektrik şeması

İlk bolometrenin yapımından yaklaşık 100 yıl sonra R.Andrew Wood ve ekibi tarafından mikron boyutta bolometre sensörü yapılmıştır [55,56].

Günümüzde mikrobolometreler, CMOS okuyucu devrelerinin üzerine mikro fabrikasyon yöntemleri ile VO_x , amorf silikon veya YBCO direnç köprüleri atılarak yapılmaktadır (Şekil.3.2).



Şekil 3.2. Basit bir mikrobolometrenin bir pikseli

Şekil.3.2’de sensörün gövdesinden termal olarak yalıtılmış direnç malzemesinin elektriksel direnci kızılötesi radyasyon ile değişmekte ve bu değişimi okuyucu CMOS devresi algılayıp dijital ortamda görüntüye dönüştürmektedir.

Mikrobolometreler iki kategoriye ayrılır: diyot tipi mikrobolometreler ve direnç tipi mikrobolometreler.

3.1. Diyot Tipi Mikrobolometreler

Bu tip mikrobolometrelerde, diyotun sıcaklık değişimleri ile meydana gelen diyot akım veya voltaj değerlerini kullanarak görüntü oluşturulur. Sıcaklığın diyotun üzerinden geçen akıma olan etkisi aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{qV_d}{nKT}} - 1 \right) \quad (3.1)$$

Denklemdaki I_d diyot ileri akımı, I_s diyot doyum akımı, V_d bias gerilimi, q elektron yükü, k Boltzmann sabiti ve T ise sıcaklıktır.

Fabrikasyonu basit ancak performansı düşüktür. Dolayısıyla bu tip detektörler görüntü kalitesinin fazla önemli olmadığı uygulamalarda tercih edilmektedir [57].

3.2. Direnç Tipi Mikrobolometreler

Direnç tipi mikrobolometrelerin diyot tipi mikrobolometrelerden farkı, kızılötesi radyasyon ile malzemenin direncindeki değişim temel alınarak görüntü oluşturulmasıdır. Sıcaklığın bir fonksiyon olduğu direnç değişimine TCR denir ve denklemi:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \quad (3.2)$$

Bu denklemdeki α TCR, R malzemenin direnci ve T ise sıcaklıktır.

TCR, malzemenin elektriksel direncinin sıcaklık değişimlerinde ne kadar çabuk değiştiğini gösterir. Mikrobolometrelerin hassasiyetini belirleyen bu parametrenin, yüksek performanslı detektörler için 2,5 %/°C değerinden büyük olması istenmektedir.

Mikrobolometrelerde kullanılan en önemli direnç malzemesi VOx'dir. Anadolu Üniversitesi İnce Film Grubu'nda da VOx ince film direnç malzemesinin mikrobolometreler ve diğer uygulama alanları için optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır.

3.3. Direnç Tipi Mikrobolometrelerde Gürültü

Tüm mikrobolometre sistemlerinde, detektörün performansını elektronik gürültüler etkilemektedir. Detektörün hassasiyetini, tepkisini ve çözünürlüğünü arttırmak için bu elektronik gürültülerin en az olması istenmektedir.

Mikrobolometre sistemlerinde, elektronik gürültüler başlıca üç kategoride incelenir [58]:

- Johnson gürültü
- 1/f gürültü
- Termal gürültü

Bu tez çalışmasında mikrobolometrelerin performansını önemli ölçüde etkileyen 1/f gürültü analizi için ölçüm düzeneği inşa edilip, ölçümler bu düzencekle yapılmıştır.

3.3.1. Johnson gürültü

Johnson gürültü, tüm direnç malzemelerinde her frekansta görülmektedir ve direncin üzerindeki gerilimdeki dalgalanmalar nedeniyle içerisindeki yüklerin termal dalgalanmaları sonucu ortaya çıkmaktadır.

3.3.2. 1/f gürültü

1/f gürültü, mikrobolometre sistemlerinde en baskın gürültü kaynağıdır. Frekansa bağlı bir gürültü kaynağı olup, düşük frekanslarda [1-100 Hz] ortaya çıkmaktadır. Gürültünün büyüklüğü düşük frekanslardaki güç spektral yoğunluğu ile belirlenmektedir [55,57].

İnce film malzemelerinin kristal yapısındaki kusur ve mekanik streten kaynaklanan bu gürültü, düşük frekanslarda direncin üzerindeki akım/voltaj değerlerinde dalgalanmaya neden olmaktadır.

Bu tez çalışmasında mikrobolometreler için önemli bir parametre olan 1/f gürültü analizi de yapılacaktır.

3.3.3. Termal gürültü

Termal gürültü, sıcaklık değişimleri sonucu ortaya çıkmaktadır. Mikrobolometrenin bulunduğu gövdede ya da sensor direncinin bulunduğu altlıktaki sıcaklık değişimleri termal gürültüye sebep olmaktadır.

Günümüzde mikrobolometre sistemleri genellikle vakum ortamında ve sabit sıcaklıkta çalışmaktadır. Dolayısıyla detektörün performansını fazla etkilememektedir. Gürültü hesaplamalarında, Johnson ve 1/f gürültülerinin yanında termal gürültü çok etkili olmadığından çoğu zaman ihmal edilmektedir.

4. İNCE FİLM ÜRETİM METOTLARI

Vanadyum oksit ince filmlerin kalitesi, kristal yapısına, kristal tane boyutuna, yüzey morfolojisine ve elektriksel özelliklerine bağlıdır. Farklı kristal yapılara sahip çok sayıda farklı vanadyum oksit fazı mevcuttur. İstenilen fazda vanadyum oksit ince film elde etmek için üretimdeki parametreler önem arz etmektedir.

Film biriktirme metotları kimyasal buhar biriktirme (Chemical Vapor Deposition, CVD), elektron demeti ile buharlaştırma, sıçratma ve pulslu lazer biriktirmenin dâhil olduğu fiziksel buhar biriktirme (Physical Vapor Deposition, PVD), sprej piroliz, elektrospinnig, sol-jel ve döndürerek kaplamanın dâhil olduğu çözelti temelli teknikler ve lazerle yüzey işleme süreçleri olmak üzere dört ana başlık altında gruplandırılabilir.

Bu tez çalışmasında vurmali DC reaktif magnetron sıçratma tekniği ile üretimler yapılmıştır. Bu tekniğin avantajı, üretim sırasında birçok parametre kontrol edilerek farklı fazda vanadyum oksitlerin üretimini kolaylaştırmasıdır.

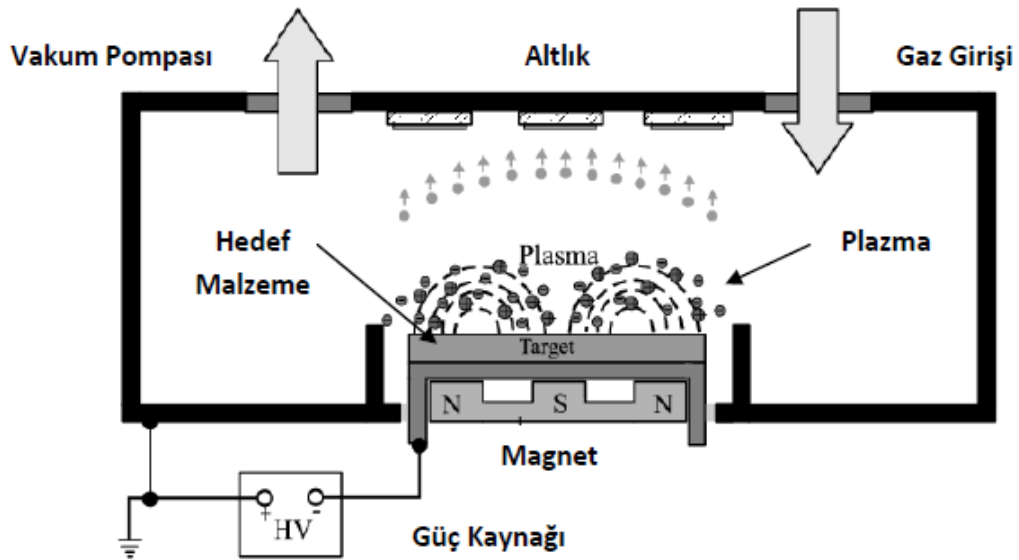
4.1. Vurmali DC Reaktif Magnetron Sıçratma Tekniği

Sıçratma işlemi bir PVD yöntemi olup ince filmlerin büyütülmesi için endüstride de yaygın kullanılan bir üretim tekniğidir. Sıçratma tekniğinde temel prensip vakum odasını argon(Ar) gazı ile doldurup bir plazma oluşturmak ve hedef malzemedan fiziksel yollarla atom kopararak film büyütmeğdir. Argon gazının sıçratma sürecinde kullanılmasının sebebi atom yarıçapının diğere inert gazlara göre büyük olması ve maliyetinin düşük olmasıdır.

DC sıçratma sistemlerinde, vakum odasının içerisinde var olan serbest elektronlar uygulanan elektrik alana ters yönde hızlanarak hareket ederler ve nötral Ar atomları ile çarpışır. Çarpışma sonucunda Ar atomlarının dış kabuklarından bir elektron koparılır ve Ar atomları Ar^+ iyon haline gelir. Artı yüklü argon iyonları elektrik alan doğrultusunda katoda yani hedef malzemeye doğru ilerlerler. Argon iyonlarının hedef malzemeye çarpması sonucu kopan atomlar, anoda yani altlığa doğru hareket ederler ve altlık yüzeyine çarparlar. Bu atomlar termodinamik dengeye ulaşana kadar altlık yüzeyindeki hareketlerine devam ederler ve yüzeye tutunurlar. Argon iyonları hedefe çarptıkça enerji transferinden dolayı daha çok

serbest elektron açığa çıkar ve bu elektronlar plazmanın devamlılığını sağlarlar [44].

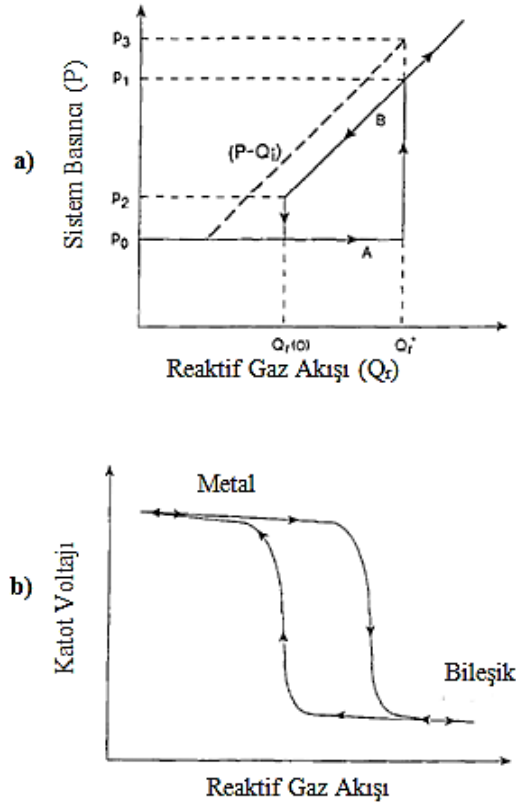
Sıçratma ile birçok malzeme başarılı bir şekilde biriktirebilmesine rağmen, oluşan ikincil elektronlar nedeniyle birikme hızının ve plazma içindeki iyonlaşma etkisinin düşük olması, altlığın sıcaklığının yükselmesi sistemin kullanımını sınırlamıştır. Bu problemi çözebilmek için, son yıllarda sıçratma teknolojisindeki gelişmelerin çoğu manyetik alanda yapılmıştır. Manyetik alanda yapılan sıçratma işlemine magnetron sıçratma adı verilir. Magnetron sıçratma sistemindeki manyetik alan, plazma yoğunluğunu arttırarak katot üzerindeki akımı, beraberinde ise hedef üzerinden yapılan sıçratma oranını da arttırır. Manyetik alan altında yük boşalımındaki elektronlar dairesel hareket yaparlar ve yörüngelerinin merkezi olan $E \times B$ yönünde E/B hızında sürüklenirler. Buradaki E yük boşalımı sırasındaki elektrik alan ve B ise katot üzerinde yer alan etkin manyetik alanı, $E \times B$ elektromanyetik enerjinin iletiminin yönünü ve E/B ise birim yüzeyden birim zamanda iletilen enerjiyi (enerji akısı) belirtir. Manyetik alan elektronları kapalı bir yörüngede sürüklenecek şekilde yönlendirir. Bu elektron tuzağı, elektronlar ve sıçratma gazı moleküllerinin çarpışma oranını arttırır [59,60].



Şekil 4.1. Magnetron Sıçratma sisteminin şematik resmi

Magnetron Sıçratma işleminin içine eklenen reaktif gaz ile hedef metal atomları arasında işlem sırasında bağ oluşumu gerçekleşmesi mümkündür. Bu yolla oksitlerin, nitrürlerin, borürlerin ve karbürlerin oluşması mümkün olur. Reaktif gazın argon sıçratma işlemi sırasında eklenmesiyle yapılan bu işleme “reaktif sıçratma işlemi” adı verilir [59,60].

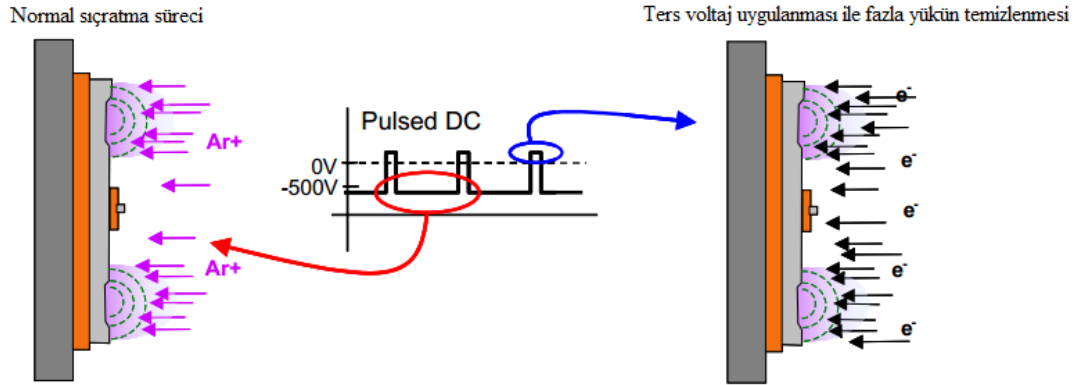
Reaktif gazın eklenmesiyle normal sıçratma işleminin davranışı belirgin ölçüde değişir. Dolayısıyla film kompozisyonundaki biriktirme oranı reaktif gazın akışından ağır şekilde etkilenir [59]. Reaktif gazın eklenmesiyle oluşan sonuçlar sadece alttaş üzerine büyütülen bileşik üzerine değil, aynı zamanda hedef malzeme ya da katot yüzeyi üzerine de etkisi bulunur. Bu nedenle, biriktirme oranında ani düşüşler ya da başka bir ifade ile malzemenin zehirlenmesi gibi sonuçlar gözlenir [60].



Şekil 4.2. Reaktif sıçratma sürecinde sistem basıncı ve gaz akış histerezis eğrisi (a) ve reaktif sıçratma süreci sırasında gaz kış ve katot voltajı histerezis eğrisi (b) [60]

Şekil 4.2’de reaktif süreç sırasında gaz kış oranıyla sistem basıncı ve katot voltajının nasıl değiştiği gösterilmiştir. Şekil 4.2(a)’da A ile gösterilen kısımda artan gaz akış oranında sistem basıncı değişmemektedir. Bunun sebebi, reaktif gazın reaksiyona girerek, sıçratılan metal atomlarla bağ yaparak gaz fazdan katı faza geçerek alttaş ve sistemin diğer parçalarının yüzeyine birikmesidir. Ancak B ile gösterilen kısımda, sistem basıncının değiştiği görülmektedir. Hedef malzemenin reaktif süreç sırasında zehirlenmesi ile sıçratma verimi düşmektedir ve reaktif süreç gazı gaz fazda sistemin içinde bulunmaktadır. Hedef kaynağın zehirlenmesi sonucu uygulanan gerilimde de değişimler meydana gelmektedir. Şekil 4.2(b)’de bu değişim gösterilmiştir. Hedef malzeme zehirlenmeye başladıkça uygulanan gerilimin düştüğü gözlenmektedir.

Vurmalı DC tekniğinde hedef malzemenin ısınması ve zehirlenmesi engellenmektedir. Uygulanan gücün puls (vurmalı) şeklinde olması, süreç sırasında zehirlenen hedef malzemenin yüzeyini elektronlarla döverek temizlemektedir. Bu süreç Şekil 4.3.’te ayrıntılı olarak verilmiştir.



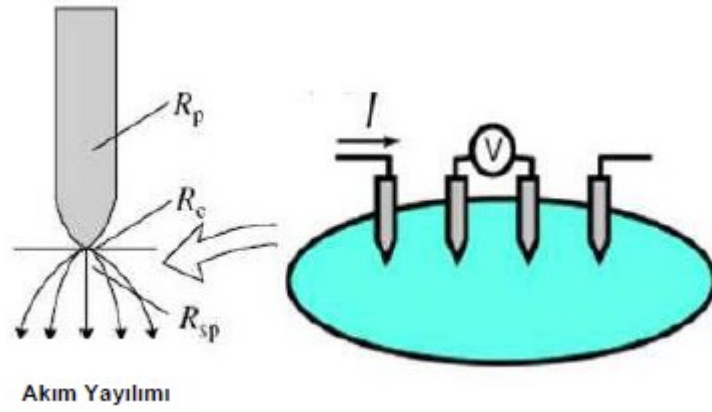
Şekil 4.3. Vurmalı DC gücünün hedefe etkisi[44]

5. İNCE FİLMLERİN KARAKTERİZASYONUNDA KULLANILAN TEKNİKLER

5.1. Dört Nokta İğne Tekniği

5.1.1. Dört nokta iğne tekniği ile elektriksel direnç ve özdirenç ölçümleri

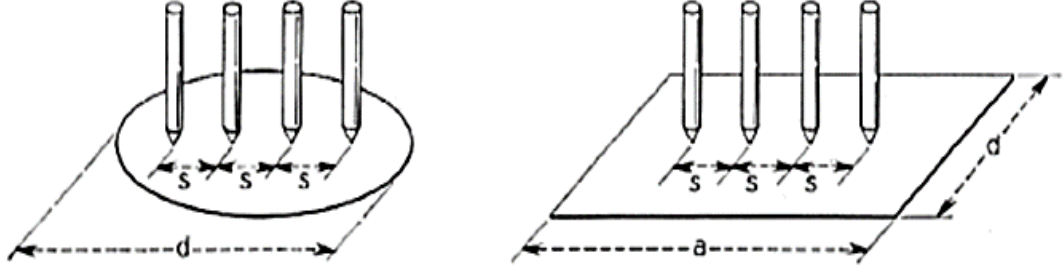
Dört nokta iğne tekniği(Four Point Probe, FPP) genel olarak ince filmlerin elektriksel özelliklerini belirlemek için kullanılır. Bu yöntem, her ölçüm için özel kalibrasyona ihtiyaç duymamakta ve bazen diğer elektriksel ölçümler için kalibrasyon standartlarını belirlemek için kullanılmaktadır. FPP tekniği aşağıda yer alan Şekil 5.1’de şematik olarak gösterilir [61].



Şekil 5.1. FPP tekniğinin düzeni ve iğnenin (probe) kendi direnci R_p , kontak direnci R_c , yayılım direnci olan R_{sp} 'nin şematik olarak gösterimi [61]

Şekil 2.4’te görülebileceği gibi, iğnelerin (probe) kendi malzemesinden gelen direnci R_p ile temsil edilir. Bu direnç değeri iğnenin direnci ölçülerek belirlenebilir. İğnenin ucu ile ince film arasındaki ara yüzeyde, kontak direnci oluşmaktadır ve R_c ile temsil edilir. İğnenin ucundan filme doğru akan akım, filmin içine doğru yayılması ile burada direnç oluşur ve R_{sp} ile temsil edilir. Son olarak ise, filmin kendisinin sahip olduğu yüzey direnci (ROS) değeri bulunur. FPP yönteminde bulunan, Şekil 2.4’te gösterildiği gibi dışarıdaki iki iğne akımı taşıırken, diğer iki iğne ise gerilimi algılar. Her iğnenin kendinden direnci olan R_p ’si bulunmaktadır. FPP sisteminde, iki nokta iğne yöntemine nazaran bu dirençlerden kaynaklı olarak oluşan parazit direnç değerleri belirlenemeyecek kadar küçüktür.

Dolayısıyla voltmetreden okunan gerilim, filmin yaprak direncinden okunan gerilimle denk olur [61].



Şekil 5.2. Düzgün geometrik şekle sahip olan ince filmlere FPP tekniği uygulanırken dikkate alınacak parametreler [61]

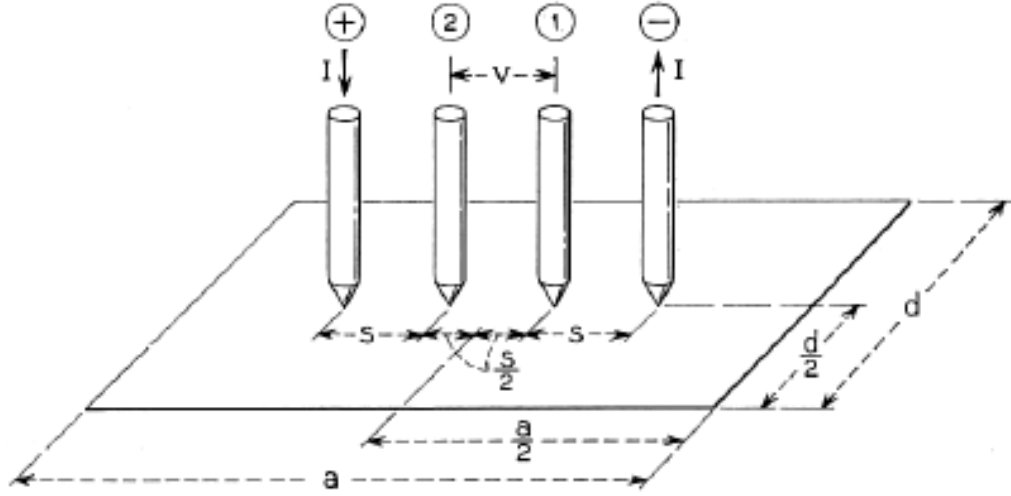
FPP tekniği ile yapılan ölçümlerde, filmlerin geometrik şekilleri önem arz etmektedir. Şekil 5.2.'de düzgün geometrik şekillere sahip olan numunelere FPP tekniği uyguladığında dikkate alınması gereken parametreler belirtilmiştir. Filmlerin yüzey direnci hesaplanırken bu parametrelere bağlı olarak bir düzeltme katsayısı ortaya çıkmaktadır. Bu düzeltme katsayılarını kullanarak filmlerin yüzey direnci (5.1) ile belirlenir.

$$\rho_s = \frac{V}{I} C \quad (5.1)$$

Eşitlikte; ρ_s yüzey direnci, V gerilim, I akım ve C ise düzeltme faktörü düzeltme katsayısıdır. Tablo.5.1'de bu katsayılar verilmiştir.

Tablo 5.1. FPP tekniği kullanılarak yüzey direnci ölçümleri için düzeltme katsayıları [61]

d/s	circle diam d/s	$a/d = 1$	$a/d = 2$	$a/d = 3$	$a/d \geq 4$
1.0				0.9988	0.9994
1.25				1.2467	1.2248
1.5			1.4788	1.4893	1.4893
1.75			1.7196	1.7238	1.7238
2.0			1.9454	1.9475	1.9475
2.5			2.3532	2.3541	2.3541
3.0	2.2662	2.4575	2.7000	2.7005	2.7005
4.0	2.9289	3.1137	3.2246	3.2248	3.2248
5.0	3.3625	3.5098	3.5749	3.5750	3.5750
7.5	3.9273	4.0095	4.0361	4.0362	4.0362
10.0	4.1716	4.2209	4.2357	4.2357	4.2357
15.0	4.3646	4.3882	4.3947	4.3947	4.3947
20.0	4.4364	4.4516	4.4553	4.4553	4.4553
40.0	4.5076	4.5120	4.5129	4.5129	4.5129
∞	4.5324	4.5324	4.5324	4.5325	4.5324



Şekil 5.3. Düzgün geometrik şekle sahip olan ince filmlere FPP tekniğinin uygulanması [61]

Şekil 5.3.'te ince filmlerin yüzey direnci ölçümü sırasındaki iğnelerin düzeni gösterilmiştir. Sağ ve soldaki iğnelerden akım verilerek, ortadaki iki iğneden gerilim ölçülmektedir. İğnelerin arasındaki mesafeler eşittir.

Elektriksel bir dipolde potansiyel fark (5.2)'de verilmiştir.

$$\varphi - \varphi_0 = -\frac{I\rho_s}{2\pi} \ln \frac{r_1}{r_2} \quad (5.2)$$

Bu eşitlik kullanılarak Şekil 5.3.'te gösterilen 1 ve 2 numaralı iğneler arasındaki potansiyel fark hesaplanmış ve (5.3)'de gösterilmiştir.

$$V = \frac{I\rho_s}{2\pi} \ln 4 \quad (5.3)$$

Dolayısıyla filmin ROS değeri (5.4)'te gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$\rho_s = \frac{V}{I} \frac{2\pi}{\ln 4} = \frac{v}{I} 4,532 \quad (5.4)$$

İnce filmlerin bir diğer önemli elektriksel özelliği de elektriksel direncin sıcaklık sabitidir. TCR, direncin sıcaklık ile beraber değişimini belirtir ve α ile gösterilir [1,2].

Metaller için TCR değeri, sıcaklığa bağlı olarak artış göstermesi nedeniyle pozitif değerde, dielektrik ve yarıiletken malzemeler için sıcaklığa bağlı olarak azalma gösterdiği için negatif değerde tanımlanır [1,2]. Yarıiletken malzemelerde görülen TCR değeri, yasak enerji aralığının sahip olduğu değere bağlı olarak, ısı

uyarılma ile elektriksel iletkenlik göstermelerinden kaynaklı olarak negatiftir. Yarıiletkenlerde sıcaklık arttıkça elektronlar valans bandından iletim bandına ısıl uyarılma yoluyla geçerler. Hem iletkenlik bandındaki elektronlar hem de elektronların valans bandında bıraktıkları boşluklar (holler) elektriksel iletkenliğe katkıda bulunurlar.

5.1.2. Dört Nokta İğne Tekniği ile Elektriksel Direncin Sıcaklık Sabiti Ölçümü

TCR ölçümü için, FPP sistemi ile beraber bu sisteme entegre edilmiş sıcaklık kontrollü ortam yeterlidir [63]. Malzemeler için belirlenmek istenen TCR değerleri,

$$\alpha(TCR) = -\frac{1}{R} \times \frac{dR}{dT} \quad (5.5)$$

$$\alpha(TCR) = -\frac{d(\ln R)}{dT} \quad (5.6)$$

denklemleri kullanılarak hesaplanabilir [1,2]. Yukarıda görülen denklemler yer alan R yüzey direncini, T ise sıcaklığı belirtir.

Genel olarak yukarıdaki denklemler sıcaklık aralığı yüksek olan ölçümler için kullanılır. Kısa aralıktaki sıcaklık değerlerinde gerçekleşen ölçümler için belirlenmek istenen TCR değeri,

$$\alpha(TCR) = \frac{R_s - R_i}{R_i(T_s - T_i)} \quad (5.7)$$

eşitliği kullanılarak da hesaplanabilir [61]. Bu eşitlikte, R_i oda sıcaklığındaki yüzey direncini, R_s son okunan sıcaklık değerindeki yüzey direncini ve T_s son sıcaklığı T_i ise ilk sıcaklığı belirtir.

FPP yönteminin tek dezavantajı yüzeyi zedelemesidir; ancak bu zedeleme çok şiddetli olmamasına rağmen, aygıt üretimi için yeterli değildir. Bununla beraber, ölçüm öncesi sürekli tekrar edilen kalibrasyonlara ihtiyaç duymaması ile yarıiletken endüstrisinde uzun zamandır kullanılan ölçüm tekniklerinden biridir. FPP yöntemi, örneklerin haritalanması işlemini gerçekleştirmesi ile işlem kontrol cihazı olarak da ön plana çıkar.

5.2. X-Işını Temelli Teknikler

X-Işınları, kısa dalga boyuna sahip yüksek enerjili elektromanyetik ışımalarıdır. Bir dalga olarak düşünüldüklerinde, sinüs osilasyonu yapan elektrik

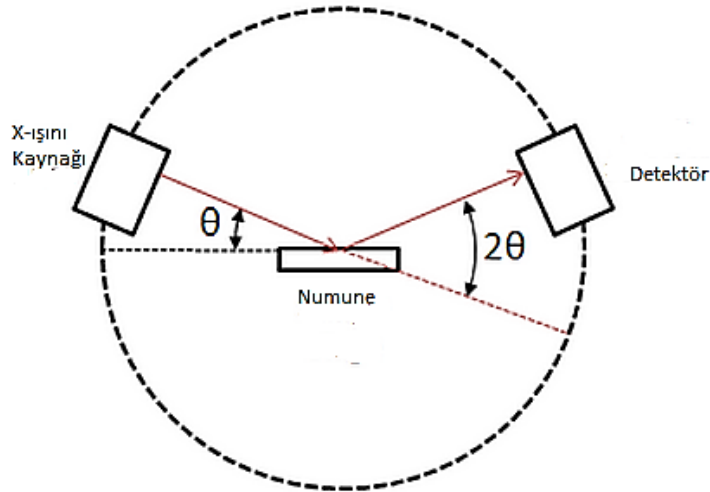
alan olarak tanımlanabilir ve doğru açılarda ise zamana bağlı olarak değişen benzer manyetik çeşitliliğe sahiplerdir. Bir başka tanımlama ise, foton olarak anılan enerji parçacıklarıdır. Bu tanımlamadan, X-Işını foton enerjisi, dalga boyuyla ilişkili olarak,

$$\lambda = \frac{12,4}{E} \quad (5.8)$$

ile hesaplanır [64]. Denklem (5.8)'de yer alan, E X-Işını foton enerjisini keV biriminde ve λ ise dalga boyunu Angström (Å) biriminde temsil eder. X-Işınları, metal hedefin içinde elektronların uyarılmasıyla ortaya çıkmaktadırlar. Bakır hedef malzemesi 1,54 Å ile güçlü dalga boyuna sahiptir. Buna ek olarak, yüksek erime noktası ve ısı iletimi ile bakır iyi bir hedef malzeme olarak günümüz X-Işını cihazlarında kullanılır.

5.2.1. X-Işını Kırınımı (XRD) ve Sıyırma Açısında X-Işını Kırınımı (GIXRD) Teknikleri

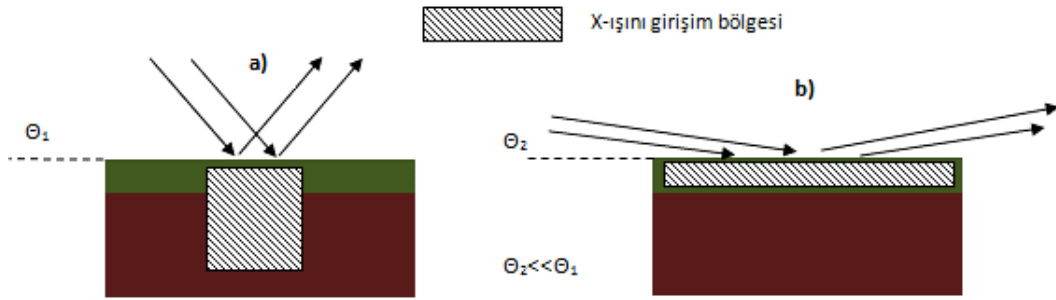
XRD tekniği numunenin içerisinde hangi fazların olduğunu ya da malzemenin hangi yönde büyüdüğünü tayin etmek için kullanılır. XRD ölçümü (Şekil.5.4) ile numunenin atomlarından yansıyan ışınlar arasında aynı fazda olanların yapıcı girişim yaparak kırınım deseni oluşturması ile gerçekleşir [66].



Şekil 5.4. XRD ölçüm ve X-Işını kırınım geometrisi

Bu teknikte X-Işınları numune üzerine farklı açılarla (2θ) gönderilir. Bu ışınlar malzeme içerisinde kristal düzende bulunan atomların oluşturduğu düzlemlerden Bragg açılarındaki kırınımına uğrarlar (2θ , kırınım açısı) ve detektörde toplanırlar. Elde edilen kırınım desenleri belirli bir faz grubuna ait oldukları için, numune içerisindeki filmlerin kristal yapıları ve büyüme doğrultuları hakkında bilgi elde edilir.

GIXRD tekniğinde X-Işınları yüzeyi çok küçük açılarla gönderilir. Nano boyuttaki ince filmlerde filmin yapısını inceleyen alttaşın etkisini en aza indirmek için bu teknik ön plana çıkmaktadır. XRD ölçümleri, yüksek geliş açılarında numune içerisine giriş yaptıkları için (Şekil 5.5(a)) altlık tabakasında da kırınımlar oluşacaktır. Fakat GIXRD tekniğinde ışınlar numuneye çok düşük geliş açılarında (θ) gönderilir ($0,3^\circ < \theta < 1^\circ$). Bu durumda filmin yüzeyinden aşağıya biraz giren ışınlar altlık ile etkilenmeden filmin yapısı hakkında bilgi verecektir.



Şekil 5.5. XRD ölçümünde: a) yüksek açı ve b) sıyırma açı ölçüm geometrileri

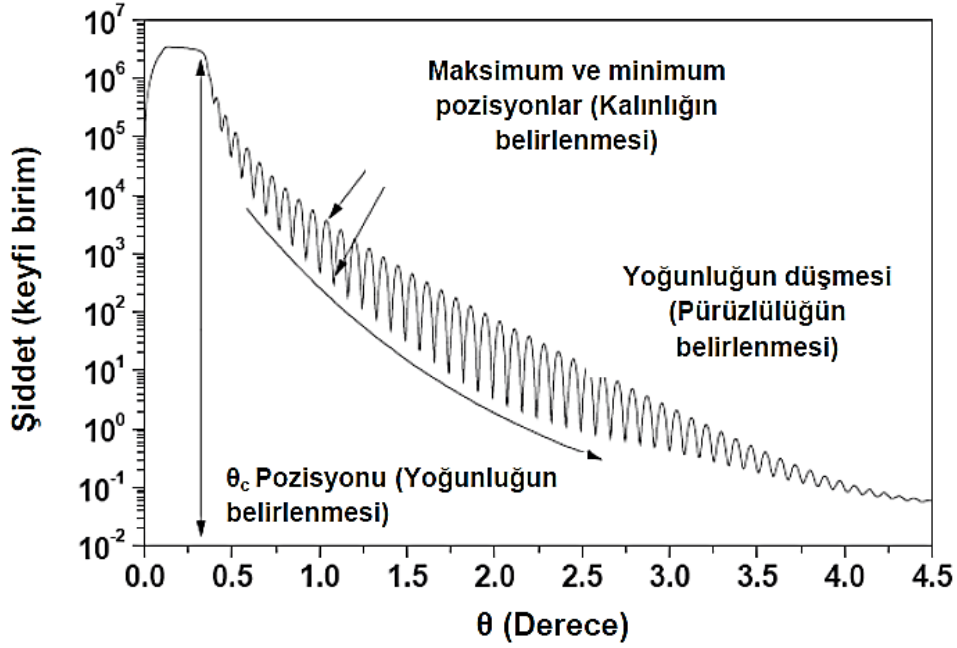
Bu ölçüm yöntemi ileri X-Işını tekniklerinden birisidir. Ölçümün sağlıklı olabilmesi için X-Işınlarının numuneye paralel olarak gönderilmesi gerekir. Ölçüm sırasında X-Işını kaynağı düşük açıda sabit tutularak detektör verilen 2θ açı değerleri arasında hareket ederek numuneden kırılmaya uğrayan ışınları toplar.

5.2.2. X-Işını Yansıması (XRR) Tekniği

XRR tekniği tek ve çoklu tabakaların, elektron yoğunluğunu, kalınlığını ve pürüzlülüğünü belirlemek için kullanılan, temassız ve yüzeye zarar vermeyen bir tekniktir. XRR tekniğini ince tabakaların yüzey ve ara yüzey üzerine yapılan çalışmalarda, hangi kristal yapısına sahip olursa olsun atomik boyutlu çözünürlüklerde

uygulamak mümkündür. Bu teknikte XRD tekniğinden farklı olarak ışınların kırınımı yerine numune içerisindeki ara yüzeylerden yansımaları incelenir [65]. XRR tekniği ile 200 nm'ye kadar kalın olan ince filmler analiz edilebilir.

Şekil 5.6.'da örnek bir XRR eğrisi verilmiştir. Bu eğri incelendiğinde, filmlerin, yoğunluk, kalınlık ve yüzey pürüzlülükleri belirlenebilmektedir.



Şekil 5.6. İnce filmler için örnek bir XRR eğrisi [67]

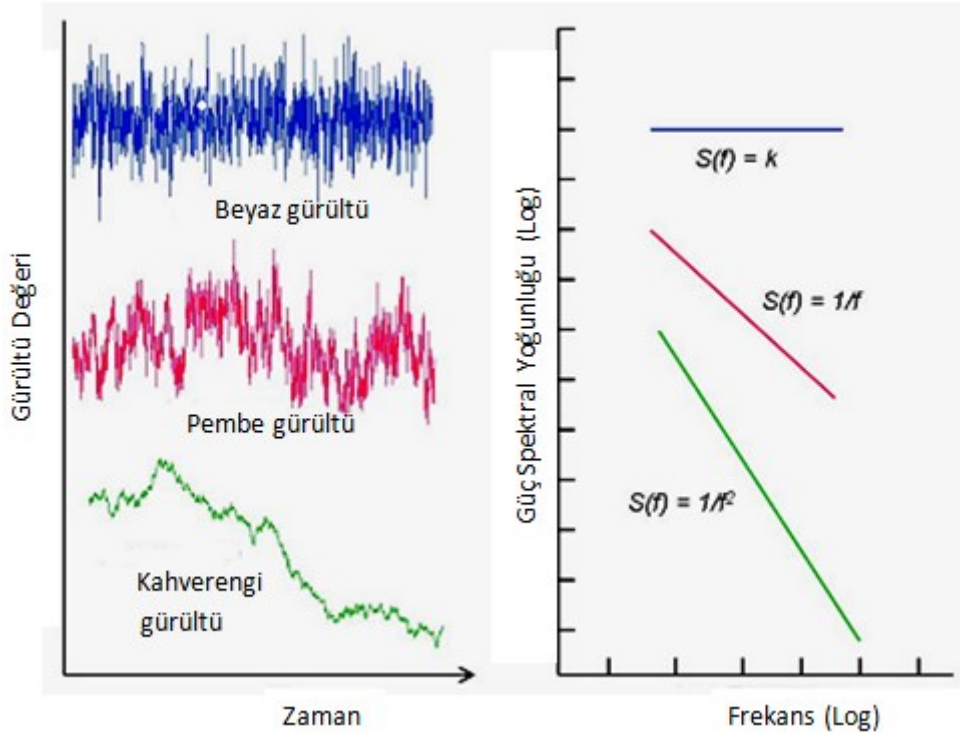
X-Işınları için, numunenin kırılma indisi havanın kırılma indisinden daha düşüktür. Böylece ışının bütününün ortamdan yansımaları için, kritik açıdan (θ_c) daha düşük geliş açısına sahip olmalıdır. Kritik açı θ_c ,

$$\frac{\theta_c^2}{\rho} = \frac{r_e \lambda^2}{\pi} \quad (5.9)$$

ifadesiyle belirlenir. Eşitlik (5.9)'da yer alan r_e klasik elektron yarıçapı ($2,82 \times 10^{-15}$ m) ve λ ise X-Işınının dalga boyunu ifade eder. Geliş açısının kritik açıdan büyük olduğu durumlarda, farklı iki ortam için ışığın kırılma ve yansımalarını belirten Fresnel yasası geçerlidir ve yansımaları şiddeti düşer.

5.3. 1/f Gürültü Ölçümü

Askeri ve sivil endüstride kullanılan mikrobolometrelerde aktif tabaka olarak kullanılan en önemli malzeme vanadyum oksittir. Mikrobolometrelerin performansını büyük ölçüde kullanılan aktif malzemenin TCR, elektriksel direnç ve elektriksel özdeşimin yanı sıra 1/f gürültüsü etkilemektedir. Bu gürültü AC bir elektronik sinyal olup belirli bir formu bulunmamaktadır. 1/f gürültüsü, flicker gürültü ya da pembe gürültü olarak da bilinmektedir.



Şekil 5.7. Zaman ve frekans eksenlerinde elektronik gürültü çeşitleri

Mikrobolometre sistemlerinde düşük 1/f gürültü istenmektedir [68]. Düşük frekanslarda (<1 kHz) baskın olan bu elektronik gürültü cihazın hassasiyetini önemli oranda etkilemektedir. Şekil 5.3.'te gösterildiği gibi düşük frekanslarda baskın olan bu gürültü, frekansla ters orantılı olarak frekans arttıkça azalmakta ve yüksek frekans değerlerinde baskınlığını kaybetmektedir. Düşük frekanslarda güç spektral analizi (power spectrum analyses, PSD) ile incelenen bu gürültü, 1 Hz-10 kHz arasında ölçülmektedir [70].

İnce filmin üzerinden geçen akımda ya da üzerine uygulanan gerilimde, ince filmin kristal yapısındaki kusurlardan dolayı elektronik sinyalde dalgalanmalar oluşmaktadır ve bu dalgalanmalar 1/f gürültü değerini belirlemektedir. İnce filme mikro-amper mertebesinde akım uygulayarak üzerinde oluşan gerilimdeki dalgalanmaların güç spektral analizi ile 1/f gürültüsü incelenmektedir.

1/f gürültünün kaynağı kesin olarak bulunamamıştır. Ancak yapılan çalışmalarda, 1/f elektriksel gürültünün filmin kristal yapısındaki stresten kaynaklandığı gözlenmiştir [47,48]. Ayrıca filmin karışık fazlarının ve tane boyutlarının da gürültüye etkisi olduğu tespit edilmiştir [55,57].

1/f gürültüsü ölçümleri (5.10) ve (5.11)'de verilen eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$S_{total}(f) = P_1 + \frac{P_2}{f^{P_3}} \quad (5.10)$$

$$S_{1/f}(f) = \frac{P_2}{f^{P_3}} = \frac{Kf^\alpha}{f^\beta} \quad (5.11)$$

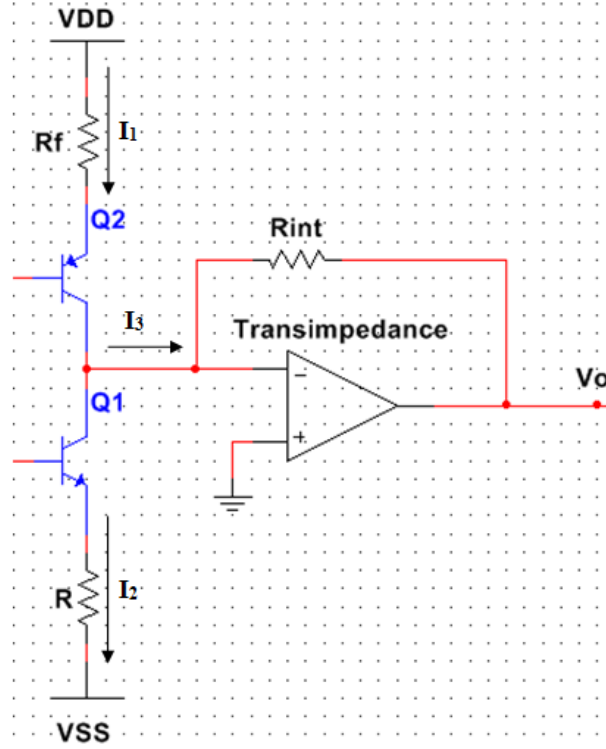
Eşitlikte (5.10)'da P_1 termal gürültüyü belirtmektedir. P_2 ve P_3 ise sürece bağlı parametrelerdir ve ölçüm sonrası bilgisayar ortamında yapılan nümerik iterasyonlar ile hesaplanmaktadır.

İnce filmlerin mikro yapısındaki mekanik stresten kaynaklanan ve düşük frekanslarda baskın olan 1/f gürültüsü için ölçüm düzeneği, Anadolu Üniversitesi, İleri Teknoloji İnce Film Laboratuvarı'nda kurulmuştur. VOx ince filmin üzerinden belirli akımlar geçirilerek, filmin üzerindeki gerilimdeki dalgalanmalar tespit edilmiş ve spektral analizi yapılmıştır.

5.3.1. 1/f Gürültü Ölçüm Düzeneği

1/f gürültüsü ölçümü için numunenin üzerinde, sabit akımlarda oluşan gerilimdeki dalgalanmaların tespit edilmesi gerekmektedir. Bunun için ölçüm düzeneklerinin elektronik devrelerinde yükselticiler kullanılmaktadır. Litografi işlemleri öncesinde filmlerin gürültüsü Anadolu Üniversitesi'nde fark yükselticisi kullanılarak kurulan düzenekte 10 – 25 Hz bant aralığında bilgisayar ortamında yapılmıştır. Litografi süreçleri sonrasında şekillendirilen filmlerin gürültü ölçümleri ODTÜ-MEMS Merkezi'nde 10 Hz – 40 kHz bant aralığında Dinamik Sinyal Analiz cihazı kullanılarak yapılmıştır.

ODTÜ-MEMS Merkezi'ndeki ölçüm düzeneğinde transimpedans yükseltici kullanılmaktadır. Transimpedans yükseltici, çok küçük akımları (nA, pA vb..) yükselterek çıkışa gerilim olarak veren bir yükselticidir. Ölçüm düzeneği Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Transimpedans yükselticinin kullanıldığı 1/f gürültü ölçüm düzeneği

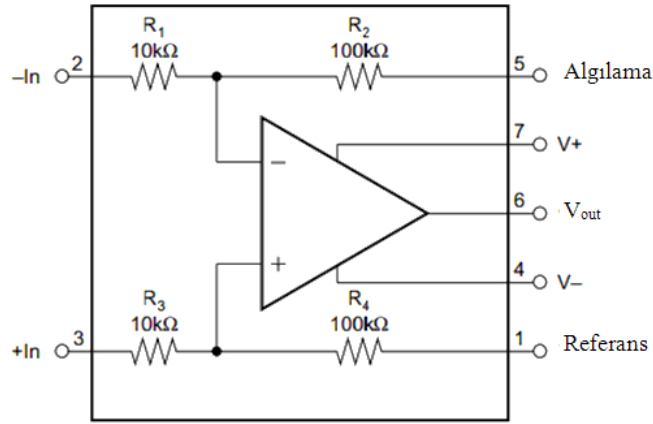
Şekil 5.8'deki R_f direnci, VOx ince filmin direncini belirtmektedir. Transimpedans yükselticiye sadece akımdaki dalgalanmaların girmesi için R direnç değerinin R_f ile aynı elektriksel direnç değerine ve düşük termal ve 1/f gürültüye sahip olması gerekmektedir. Pratikte R direncini her farklı numune için ayarlamak oldukça zordur. Bu sorun numuneyi kırarak çözülebilir. Numunenin kırılması ile iki adet eş elektriksel dirence sahip direnç malzemesi elde edilir. Devrede gösterilen Q1 ve Q2 ile gösterilen transistörler ile I_1 ve I_2 akım değerleri mümkün olduğunca birbirine yakın tutularak, transimpedans yükselticinin içerisine sadece gerilimdeki dalgalanmalar sonucu oluşan I_3 akımının girmesini sağlanmaktadır. Eşitlik (5.12)'de gösterildiği gibi transimpedans yükseltici, üzerine gelen çok düşük akımları yükselterek voltaja dönüştürmektedir. Çıkıştaki bu

gerilim spektral analiz ya da dinamik sinyal analiz cihazları ile incelenerek 1/f gürültüsü analiz edilebilmektedir.

$$V_o = R_{int} \times I_3 \quad (5.12)$$

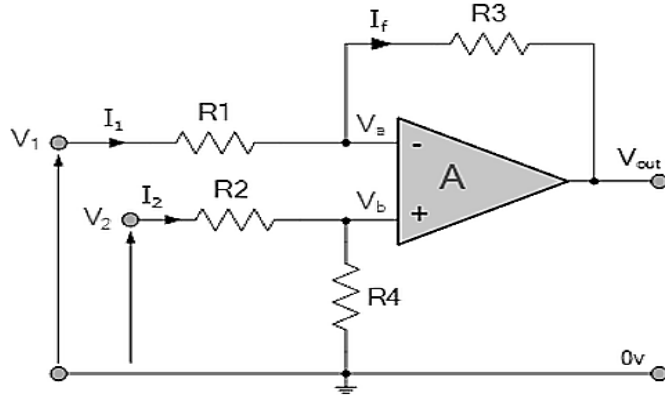
Anadolu Üniversitesi, İleri Teknoloji İnce Film Laboratuvarı'nda bulunan akım/voltaj kaynakların kullanılması dikkate alınarak tasarlan ve bu laboratuvarında kurulacak olan yeni elektronik devrede, akım kaynaklarının kullanılmasına ve yükseltici olarak da düşük gürültülü fark yükselticisi (difference amplifier) kullanılmasına karar verilmiştir.

Fark yükselticisi olarak Texas Instrument'ın bir ürünü olan INA106 diferansiyel fark yükselticisinin kullanılması kararlaştırıldı. INA106'nın veri dosyası EK-1'de mevcuttur. İç yapısı Şekil 5.9'da gösterilen bu yükselticinin gürültüsü 30 nV / $\sqrt{\text{Hz}}$ mertebesinde ve yapılan tasarımda gürültüyü etkileyecek başka herhangi bir aktif eleman kullanılmamıştır.



Şekil 5.9. INA106 fark yükselticisinin iç yapısı

Fark yükselticisi ile yapılan bu tasarımda giriş gerilimlerinin farkı alınacaktır. Şekil 5.10'da gösterilen örnek bir fark yükselticisi devresi gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Örnek bir fark yükselticisi devresi

I_1, I_2 ve I_f akımları,

$$I_1 = \frac{V_1 - V_a}{R_1} \quad (5.13)$$

$$I_2 = \frac{V_2 - V_b}{R_2} \quad (5.14)$$

$$I_f = \frac{V_a - V_{out}}{R_3} \quad (5.15)$$

eşitlikleri ile bulunur. İşlemsel kuvvetlendirici negatif geri besleme ile kullanıldığından V_a ve V_b gerilimleri birbirlerine eşit olacaktır ve V_b 'nin değeri,

$$V_b = V_2 \frac{R_4}{(R_2 + R_4)} \quad (5.16)$$

eşitliği ile bulunur. Elektronik devrelerde uygulanan süperpozisyon teoremini kullanarak V_{out} değeri (5.17), (5.18) ve (5.19) kullanılarak elde edilir.

$$V_2 = 0 \rightarrow V_{out(a)} = -V_1 \frac{R_3}{R_1} \quad (5.17)$$

$$V_1 = 0 \rightarrow V_{out(b)} = V_2 \left(\frac{R_4}{R_4 + R_2} \right) \left(\frac{R_1}{R_1 + R_3} \right) \quad (5.18)$$

$$V_{out} = V_{out(a)} + V_{out(b)} = -V_1 \frac{R_3}{R_1} + V_2 \left(\frac{R_4}{R_4 + R_2} \right) \left(\frac{R_1}{R_1 + R_3} \right) \quad (5.19)$$

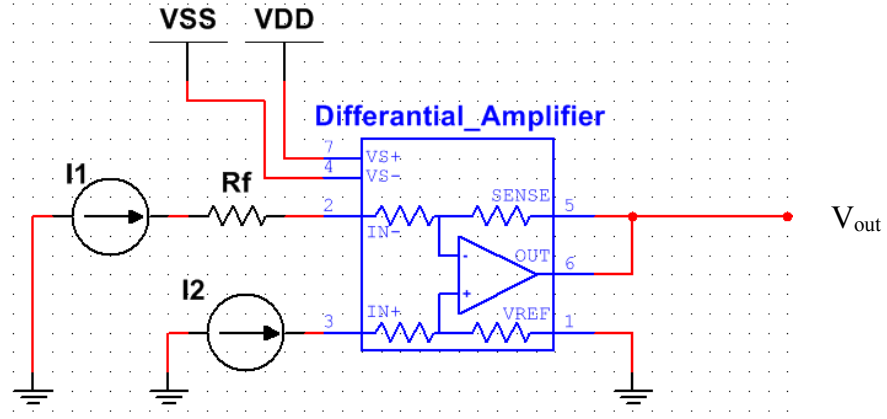
R_1, R_2, R_3 ve R_4 dirençleri eşit olduğu durumda V_{out} ,

$$V_{out} = V_2 - V_1 \quad (5.20)$$

olacaktır. INA106 fark yükselticisinde $R_1=R_2$ ve $R_3=R_4$ olduğundan çıkış gerilimi (5.21) ile hesaplanır.

$$V_{out} = \frac{R_3}{R_1} (V_2 - V_1) \quad (5.21)$$

Keithley 2400 model güç kaynağı ve Keithley 6221 AC/DC model akım kullanarak kurulan 1/f gürültüsü ölçüm düzeneğinde, Şekil 5.11’de gösterildiği gibi fark yükselticisinin giriş uçlarına akım verilerek ölçümler yapılmıştır.



Şekil 5.11. 1/f gürültü ölçüm düzeneği elektronik devre şeması

Şekil 5.11’de 1/f gürültüsü ölçüm düzeneğinin elektronik devre şeması verilmiştir. Devrede R_f numunenin direncini belirtmektedir. V_{out} geriliminin güç spektral analizi bize 1/f gürültüsünü vermektedir.

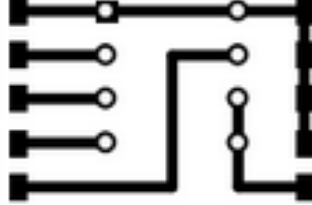
INA106’nın giriş empedansı fark/diferansiyel (differential) modda $10\text{ k}\Omega$, genel (common) modda ise $110\text{ k}\Omega$ ’dur. Tasarımda gerilim yerine akım kaynağı kullanıldığı için yükseltici genel modda çalışmaktadır ve giriş empedansı $110\text{ k}\Omega$ ’dur. Dolayısıyla ölçüm düzeneğinin kazancı 110×10^3 ’tür.

Anadolu Üniversitesi İleri Teknoloji İnce Film Laboratuar’ında güç spektral analiz cihazı olmadığı için, kurulan ölçüm düzeneğinde ancak 0-25 Hz bant aralığındaki elektriksel gürültü ölçümü yapılabilmektedir.

Litografi süreci öncesinde filmlerin 0-25 Hz arası elektriksel gürültü ölçümleri Anadolu Üniversitesi’nde yapılmıştır. Litografi işlemleri sonrasında şekillendirilen filmlerin ölçümü, Anadolu Üniversitesi’nde kurulan ölçüm düzeneği ile ölçülememektedir. Bu filmlerin 1/f gürültüsü ODTÜ-MEMS Merkezi’nde 10 Hz – 40 kHz bant aralığında ölçülmüştür.

5.3.2. 1/f Gürültü Ölçüm Düzeneginin Kurulumu

Labcenter Electronics, Proteus 8.0 Professional simülasyon ve baskı devre tasarım programı ile yapılan 1/f gürültü ölçüm düzenegi baskı devre tasarımı Şekil 5.13'teki gibi yapılmıştır.



Şekil 5.12. 1/f gürültüsü ölçüm düzenegi elektronik devresi baskı şeması

Tasarımın dijital baskısı asetata basılmıştır. Bu baskı şeması, bakır kaplı bir plakaya ısıtılarak geçirilmiştir.

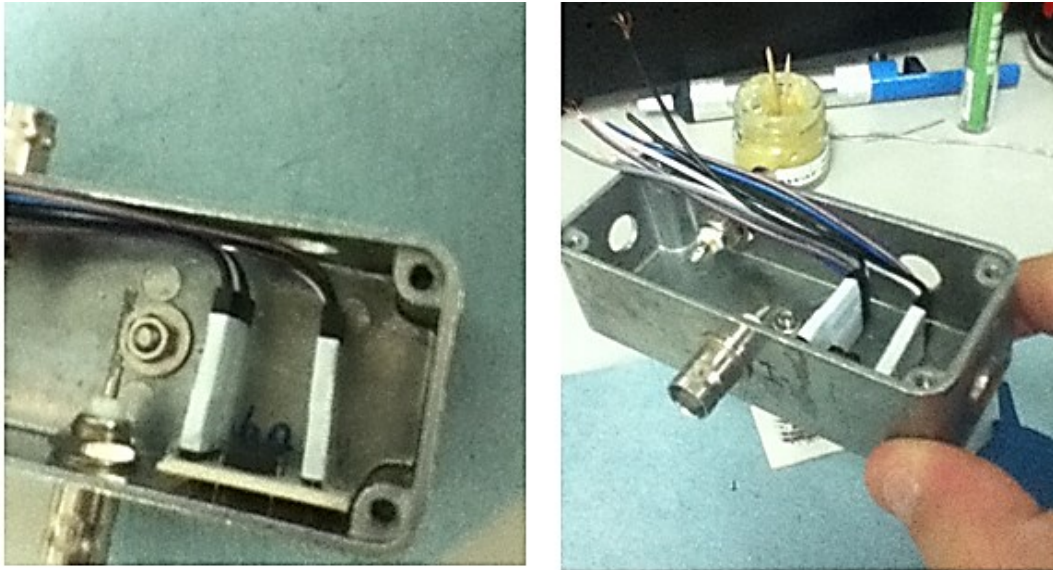
Tuz ruhu kimyasalı dolu bir kaba atılan bakır kaplı bu plakanın baskı devre çizgileri haricindeki tüm bakır tabakası, H₂O₂ kimyasalı ile plaka yüzeyinden kalkar. Plaka su ile temizlendikten sonra devre elemanları, bacak yerleri delinir ve lehim ile plakaya sabitlenir (bkz. Şekil 5.14).



Şekil 5.13. 1/f gürültüsü ölçüm düzeneginin elektronik devre kartı

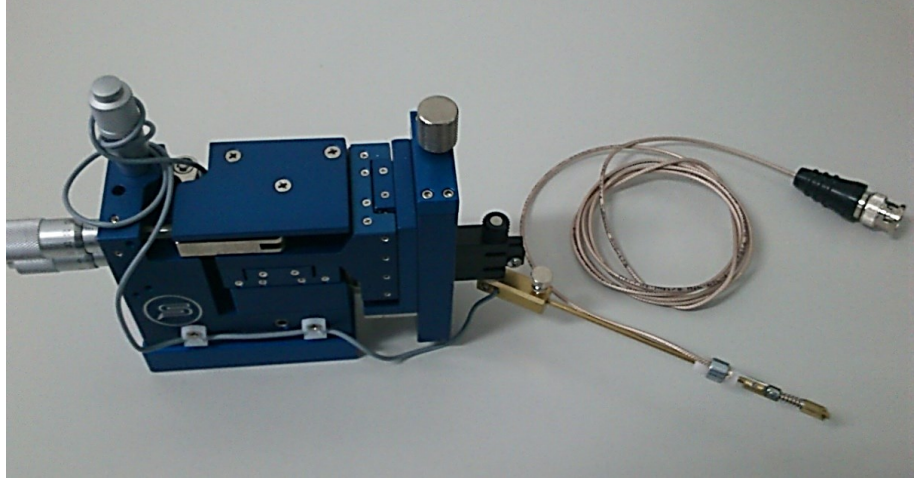
Gürültü ölçümü sırasında çok küçük ve hassas akımlar/voltaj değerleri ile çalışılacağından devre elemanları arasındaki mesafe en az olmalıdır. Mesafe arttıkça, bu bakır iletim yollarının direnci ve gürültüsü de artacağından ölçümün hata payı kısmen yükselir. Baskı devre plakalarında (printed circuit board, PCB) altın ve benzeri iyi iletken malzemelerin kullanımı gürültüyü ve güç kaybını en aza indirmesine rağmen genellikle daha ucuz maliyeti olan bakır kullanılmaktadır.

VOx ince filmlerin 1/f gürültüsü ölçümlerinde çevreden gelen her elektromanyetik dalga gürültü kaynağıdır. Dolayısıyla bu okuyucu devre, çevreden gelen elektriksel sinyallerden korumak için Şekil 5.15'teki gibi Faraday Kafesi içerisine yerleştirilmiştir. Faraday kafesi, elektriksel iletken metal ile kaplanmış veya iletkenler ile ağ biçiminde örülmüş içteki hacmi dışarıdaki elektrik alanlardan koruyan bir kutu ya da kafestir. Ölçüm düzeneğinin kablo bağlantı noktaları dış etkenlerden etkilenmemesi için Faraday Kafesi'nin içerisindedir. Test cihazları ile olan ara koaksiyel bağlantı kabloları da mümkün olduğunca kısadır.



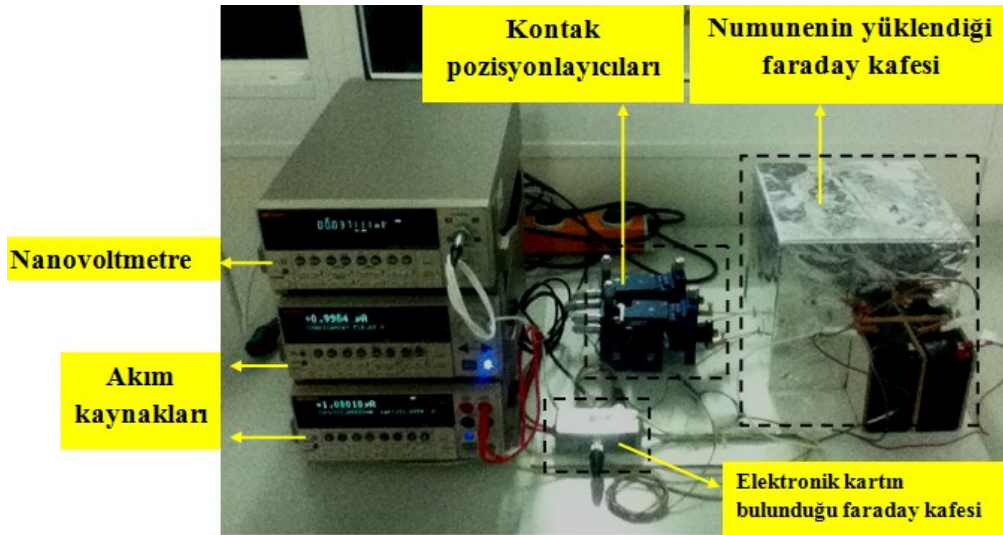
Şekil 5.14. 1/f gürültüsü ölçüm düzeneği elektronik kartının Faraday kafesi içerisine yerleştirilmesi

1/f gürültüsü ölçümü için VOx ince filmlerden kontak almak için Şekil 5.16'da gösterilen Signatone marka mikro-pozisyonlayıcılar ve 12 µm çaplı altın kaplı tungsten kontak tipleri kullanılmıştır.



Şekil 5.15. Signatone marka mikro-pozisyonlayıcı

Şekil 5.17’de 1/f gürültüsü ölçüm düzeneği verilmiştir. Ölçüm düzeneğinde Keithley 2400, Keithley 6221 cihazları akım kaynağı olarak, Keithley 2182A model cihazı ise çıkış gerilimini ölçmek için kullanılmıştır. Güç spektral analiz cihazı yerine Anadolu Üniversitesi İleri Teknoloji İnce Film Laboratuvarı’nda bulunan nanovoltmetre cihazı kullanılmıştır. Spektral analiz bilgisayar ortamında MathWorks Matlab programı ile yapılmıştır. Programda ölçüm için yazılan kodlar EK-2’de mevcuttur.



Şekil 5.16. Anadolu Üniversitesi İleri Teknoloji İnce Film Laboratuvarı’na kurulan 1/f gürültüsü ölçüm düzeneği

Matlab programına RS232 bağlantı noktası ile bağlı olan nanovoltmetreden saniyede en fazla 48 veri okunabilmektedir. Dolayısıyla 48 Hz'lik örnekleme frekansı ile bu veriler doğru bir şekilde Matlab programına aktarılabilir. Kaydedilen verilerin spektral analizleri OriginLab, Origin Pro 8 programı ile yapılmıştır. Örnekleme frekansının 48 Hz olmasından dolayı güç spektral analizinin 0-24 Hz arasında yapılabilir. İnce filmlerin 1/f gürültüsünü ayrıntılı ve geniş bir bant aralığında analiz etmek için örnekleme frekansları çok yüksek olan sinyal analiz cihazları kullanılır. İleri Teknoloji İnce Film Laboratuvarı'na kurulan bu ölçüm düzeneğinde filmlerin 0-24 Hz arasındaki gürültüsü incelenebildiğinden, ancak filmlerin gürültülerinin karşılaştırılması yapılabilir. Mikrobolometreler için önemli bir parametre olan köşe frekansı (corner frequency) tespiti, düşük frekans değerlerinde ve küçük bant aralığında çalışıldığından yapılamamıştır.

6. DENEYSEL SÜREÇLER

Bu bölümde, VO_x ince film üretimi, litografi süreçleri, filmlerin litografi süreçleri öncesi ve sonrası karakterizasyonu için kullanılan deneysel yöntemler ele alındı. VO_x ince filmler, Si/SiO₂ ve Si/Si₃N₄ alttaş malzemesi üzerine vürmalı DC magnetron sıçratma tekniği kullanılarak üretildi. Filmlerin litografik süreçleri ODTÜ-MEMS Merkezi'nde bulunana temiz alanda yapıldı. Karakterizasyon yöntemleri olarak, yapısal özellikleri ve filmlerin kalınlığının belirlenmesi için X-ışını temelli teknikler olan XRD, GIXRD ve XRR teknikleri, elektriksel özelliklerin belirlenmesi için FPP yöntemi ve 1/f gürültüsü ölçümü için bu tez çalışması kapsamında kurulan ölçüm düzeneği ile ODTÜ-MEMS Merkezi'ndeki 1/f gürültü ölçüm düzeneği kullanıldı. Bu bölüm içinde detaylarıyla, alttaş malzeme seçimi, numune temizlik işlemleri, üretim ve karakterizasyon cihazlarının etkin şekilde kullanılması için gerekli özelliklerin anlatıldığı bilgilere yer verilmiştir.

6.1. Alttaş Seçimi

İnce filmler nadiren serbest halde olarak kullanırlar, çoğunlukla biriktirildiği alttaş malzemeyle birbirlerine çok kuvvetli bağlıdırlar. Alttaş malzemenin filmde oluşan birçok stresin kaynağı olduğu bilinir. Altlığın aynı şekilde, filmdeki birçok özelliği etkilemesi de mümkündür. Örneğin, altlığın dielektrik sabiti filmde geçen elektriksel sinyallerin hızını etkiler. Dolayısıyla, alttaş malzemenin seçimi gelişmiş güzel olamaz.

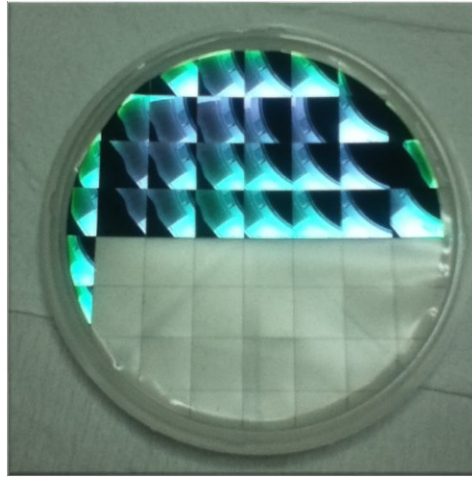
Mikroişlemci ve aygıtlarda, yaygın ve etkin olarak Si temelli alttaş malzemeler kullanılır. Günümüzde mikro elektronik cihazlarda Si temelli teknolojinin kullanılmasının nedenlerinden biri, Si üstündeki verimli yalıtkan oksit tabakanın yonga bileşenli devre elemanlarındaki yeteneğinden kaynaklıdır. Si n tipi ya da p tipi yarıiletken tabakasının üzerine büyütülen tabakalar elektriksel olarak alttaştan izole olurlar. Si üzerine büyütülen SiO₂ tabakası ise yalıtkan özelliğinin yanı sıra stressiz olarak filmin büyümesine yardımcı olur.

Bu tez çalışmasında ince film üretimi için kullanılan n tipi, fosfor katkılı, <100> yönelimine sahip, 1-30 Ω-cm öz direnç aralığında, ön tek yönü 1000 nm'lik termal oksitle kaplı, oksitli yüzeyi parlatılmış, arka yüzeyi ise

dağlanmış ve toplam kalınlığı $381 \pm 0,25$ μm Si/SiO₂ alttaş ve 250 nm silisyum nitrür (Si₃N₄) kaplı silisyum [Si(100)] altlıklar kullanılmıştır.

6.2. Numune Hazırlama ve Temizleme İşlemi

Si/SiO₂ ve Si/Si₃N₄ ve alttaş malzemesi, temizleme işlemine alınmadan önce 10x10 mm² ve 5x5 mm² boyutlarında Şekil 3.2'deki gibi lazerle kesilerek, üretim sayısının arttırılması, maliyet azaltılmasının yanı sıra, kullanılan analiz metotları için uygun geometrisi ile hızlı ve etkin analizlerin yapılabilmesi sağlandı.



Şekil 6.1. 10x10 mm² boyutlarında kesilen Si/Si₃N₄ alttaş malzemesi

İnce filmlerin üretiminde, üretim öncesi temizlik büyük önem taşımaktadır. Nano boyuttaki filmler, alttaş üzerine birikirken alttaş yüzeyinin temiz olması gerekmektedir. Bir toz tanesinin boyutu 1 μm olduğu düşünülürse nano boyutta biriktirilen filme etkisi çok fazladır. Üretilen filmin tüm özelliklerini değiştirebilmektedir. Bu nedenle alttaşlar, yüzeylerindeki toz ve organik kirlerin temizlenmesi için kimyasal temizlik süreçlerine tabi tutulurlar.

Merck marka, % 99,5 saflıkta aseton ile 10 dakika boyunca temizlenen numuneler daha sonra % 99,8 saflıkta Merck marka propanol ile tekrar temizlenir. Saf su ile numune üzerinde kalan kimyasallar temizlendikten sonra % 99,999 saflıkta azot gazı ile kurulanmaktadırlar. Temizlik işlemi tamamlanan numuneler üretim sistemi için özel tasarlanan numune tutucularına yüklenir.

6.3. VOx İnce Filmlerin Üretimi

Bu tezde yer alan VOx ince filmlerin üretimi için kullanılan sıçratma sistemi, sistemin özellikleri ve üretim süreci bu bölümün devamında, Magnetron Reaktif Sıçratma Sistemi ve Üretim Süreci başlıkları altında detaylı olarak anlatıldı.

6.3.1. Magnetron reaktif sıçratma sistemi

Si/SiO₂ ve Si/Si₃N₄ altaş üzerine büyütülen VOx ince filmlerin üretimi için, Prof. Dr. Ramis Mustafa ÖKSÜZOĞLU tarafından tasarlanan yüksek vakumlu yapılan Bestec GmbH. Berlin, Almanya üretimi sıçratma sisteminde (bkz. Şekil 6.2) vurmali DC sıçratma tekniği kullanıldı.



Şekil 6.2. Anadolu Üniversitesi İleri Teknoloji İnce Film Laboratuvarı'nda bulunan sıçratma sistemi

Sıçratma sisteminde, iki adet üretim odası, yükleme ve ısıl işlem odası olmak üzere 4 adet vakum odası mevcuttur. Bu vakum odaları yazılım kontrollü yüksek vakum vana sistemleri ile ayrılmıştır. Sistemde metalik üretimler ile reaktif üretimler ayrı vakum odalarında yapılmaktadır. Aynı anda 12 adet numune yüklemesi yapılan sistemde, birinci vakum odasında 6 kaynak, ikinci vakum

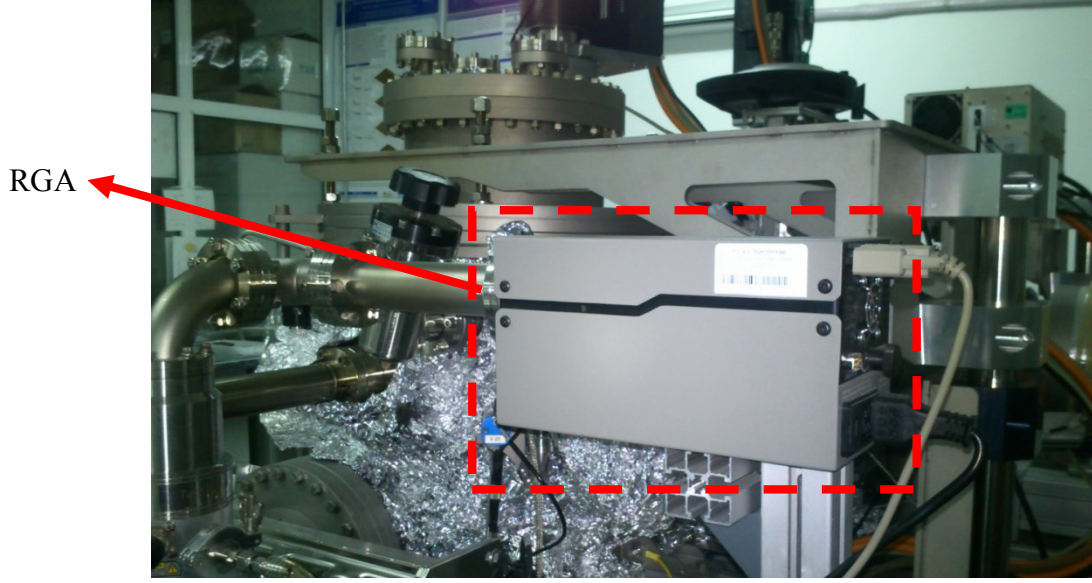
odasında ise 4 kaynak mevcuttur. Süreç odalarının vakum ortamının sağlanması için kullanılan vakum sistemi, Pfeiffer marka TMU 521 model turbo moleküler pompa ve Varian marka SH-110 model sarmal (scroll) pompa kullanılmaktadır.

Vakum odalarının basınç değerleri Pfeiffer marka PKR 261 model ölçüm aygıtı (gauge) ile belirlenmektedir. Sıçratma işlemi ve plazma oluşumu için güç kaynağı olarak, Advanced Converters marka güç kaynağı sistemi tercih edilmektedir. Kullanılan sıçratma sisteminin, sıcaklık, gaz akışı, hedef-alttaş yükseklik mesafesi, basınç, güç ve akım gibi bütün parametrelerinin kontrolü bilgisayar üzerinden yapılmıştır.

6.3.2. Üretim süreci

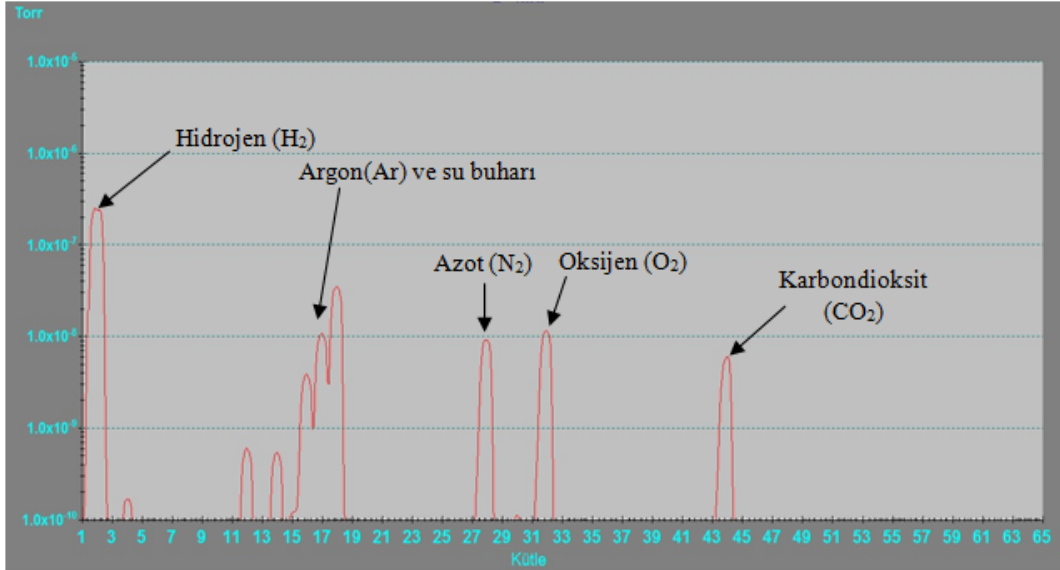
VOx ince filmlerin üretiminden sırasında vakum odasının temizliği, filmin kalitesine doğrudan etki etmektedir. Dolayısıyla üretim öncesi, sürecin olacağı vakum odası ve içerisindeki tüm parçaların temizliği yapılmıştır. Dremel marka zımparalama aletleri ile temizlenen tüm vakum parçaları, 20 dakika ultrasonik etanol banyosunda tutulduktan sonra saf su ile temizlenir ve %99,999 saflıkta azot gazı ile kurulanır. Bu parçaların sisteme montajından sonra sistem 120 °C'de 48 saat fırınlama sürecine (bake-out) tabi tutulur. Vakum odası içerisinde kalan gazların atılması ve soğutma kanallarındaki su buharlarını atmak için bu fırınlama süreci çok önemlidir. Bu süreç sonucunda sistem çok düşük basınç değerlerine inebilmektedir. Filmin yapısına yabancı atomların katılmaması için bu süreç önem arz etmektedir.

Temizlik ve fırınlama süreçlerinin ardından vakum odasının içinde hangi gazların bulunduğu, sıçratma sistemine entegre olan artık gaz analiz (Residual Gas Analyzer, RGA) cihazı ile incelenmiştir (bkz. Şekil 6.3.).



Şekil 6.3. Anadolu Üniversitesi İleri Teknoloji İnce Film Laboratuvarı'nda bulunan sıçratma sistemine entegre artık gaz analiz cihazı

Vakum sistemlerinde hidrojen ve nitrürlü bileşikler gibi kimi gazların tamamen atılması oldukça zordur. Şekil 6.4'te görüldüğü gibi vakum odasının içerisinde hidrojen, azot, karbondioksit gibi gazlar hala mevcuttur.



Şekil 6.4. RGA cihazı ile temizlik ve fırınlama sonrasında vakum odasında kalan gazların miktarı (X eksenini atom numaralarını, Y eksenini kısmi basınçlarını belirtmektedir)

Temizlik ve fırınlama süreci bittikten sonra yükleme odasına yüklenmiş olan numuneler vakum ortamı bozulmadan yükleme odasından transfer rotlar aracılığı ile biriktirmenin yapılacağı vakum odasına alınır.

İnce filmlerin üretimi sistemin basıncı 1×10^{-8} mTorr seviyesinin altına düştüğünde gerçekleştirilmiştir. Kullanılan sıçratma sisteminin içinde, katotta bulunan %99,99 saflıkta Kurt-Lesker marka Vanadyum hedef malzeme açılı olarak alttaş malzemeye yönlendirilmiştir. Açılı yönlendirme ile filmi düzgün biçimde üretebilmek için sistemde bulunan manipülâtör yardımıyla alttaş malzeme sabit hızla döndürülerek film üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim sırasında altlık- kaynak arası mesafe 50 mm, tutucunun dönüş hızı 60 rpm ve PDC gücü 70 W'tır.

VOx ince filmlerin biriktirilmesi sürecinde %99,9999 saflıkta Air Products marka Argon ve %99,9999 saflıkta Oksijen gazı kullanılmıştır. Üretimden önce, vakum odasındaki yabancı gazları atmak, su buharını azaltmak için ön bir temizlik üretimi yapılmaktadır. 15 dakika boyunca yapılan bu ön temizlik üretiminde, vakum odası temizlendiği gibi hedef malzemenin yüzeyi de temizlenmektedir. Bu temizlik üretiminden sonra vakum odasının oksijen gazına doyması için 10 dakika reaktif sıçratma işlemi yapılmaktadır. Bu süreçte üzerinde numune olmayan çelik bir tutucu kullanılmaktadır. Her 100 nm'lik VOx üretimlerden önce vakum odasının oksijen gazına doyması ve temizlenmesi için bu iki temizlik süreci yapılmaktadır.

Filmlerin büyüme hızlarının belirlenmesi için 20 nm VOx filmler üretilmiştir. Büyüme hızları belirlenen filmlerin yapısını daha ayrıntılı inceleyebilmek için daha sonra 100 nm VOx ince filmler üretilmiştir.

İlk yapılan 20 ve 100 nm Vanadyum Oksit ince filmlerin üretimlerinde, mikrobolometreler için istenilen direnç aralığına sahip film elde edebilmek için O₂/Ar gaz oranı değiştirilerek yapılmıştır. Çizelge 6.1'de üretim planı verilmiştir.

O₂/Ar taraması yapıldıktan sonra uygun direnç aralığında çıkan filmlerin daha hassas aralıklarda üretimi ve karakterizasyonu yapılmıştır.

Çizelge 6.1. VOx ince filmlerin üretim planı

4 sccm Argon gaz akışı			6 sccm Argon gaz akışı			8 sccm Argon gaz akışı			10 sccm Argon gaz akışı			14 sccm Argon gaz akışı		
O ₂ /Ar	O ₂ (sccm)	Ar (sccm)	O ₂ /Ar	O ₂ (sccm)	Ar (sccm)	O ₂ /Ar	O ₂ (sccm)	Ar (sccm)	O ₂ /Ar	O ₂ (sccm)	Ar (sccm)	O ₂ /Ar	O ₂ (sccm)	Ar (sccm)
5%	0.2	4	5%	0.3	6	5%	0.4	8	5%	0.5	10	5%	0.7	14
10%	0.4	4	10%	0.6	6	10%	0.8	8	10%	1	10	10%	1.4	14
15%	0.6	4	15%	0.9	6	15%	1.2	8	15%	1.5	10	15%	2.1	14
20%	0.8	4	20%	1.2	6	20%	1.6	8	20%	2	10	20%	2.8	14
30%	1.2	4	30%	1.8	6	30%	2.4	8	30%	3	10	30%	4.2	14

6.4. VOx İnce Filmlerin X-Işını Ölçümleri

X-Işını deneyleri için, Şekil 6.5'te görülen Bruker D8 Advance marka X-ışını ölçüm cihazı kullanıldı. Sistem bütünüyle bilgisayarla kontrol edilir ve istenilen ölçüm tipine (moduna) bağlı olarak farklı yapılandırmalar kullanılabilir. Sistem Cu-K α tüpüne, Bragg-Bretano ve sıyırma açısı geometrisine sahiptir. Filmlerin faz ve yapılarını belirlemek için XRD ve GIXRD teknikleri uygulanırken, filmlerin kalınlığını belirlemek için XRR tekniği kullanılmaktadır.

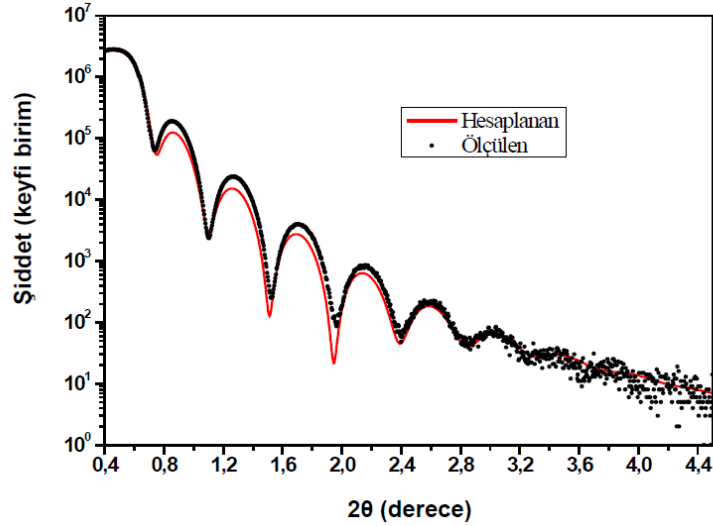


Şekil 6.5: Bruker D8 Advance marka X-ışını ölçüm cihazı

6.4.1. XRR ölçümleri

XRR tekniğinde gönderilen ışınların numunenin içerisindeki ara yüzeylerden yansımaları incelenir. Bu teknik tabakaların elektron yoğunluklarının farkını alarak sonuç vermektedir.

İnce filmlerin, yoğunluk, pürüzlülük ve kalınlık gibi özelliklerin belirlenebildiği bu tekniğin en büyük zorluğu örnek hizalama sürecidir. Bragg-Brentano geometrisine sahip X-Işını cihazında, yatay olarak vakumlu tutucu üzerinde hizalanan örnek için X-ışını sabit tutularak goniometre boyunca sadece örneğin z ekseninde hareketine izin verilerek, kaynak-örnek-detektör düzleminde, ışının örneğin tam ortasına gelmesi için, örnek yükseklik taraması yapılır. Ardından Omega (ω) taramasının gerçekleştirilmesi gerekir. Yapılan bu tarama sırasında, detektör sabit tutularak $2\theta = 0,4^\circ$ olacak şekilde, kritik açıya yakın tarama yapılmalıdır. Bu tarama sonucunda ortaya çıkan eğri, Rocking-Curve eğrisi olarak bilinir. Bu eğri örnek hizalanmasının doğruluğu hakkında bilgi alınır. Bu doğruluk sağlanana kadar işlem tekrar edilir. İstenilen Rocking-Curve eğrisinin tespit edilmesinin ardından yapılan yansıma taraması ile Şekil 6.6'da gösterilen VOx ince filmlerin örnek XRR eğrisi üzerinde, Leptos programı kullanılarak modelleme yapılabilir.



Şekil 6.6. VOx ince filmleri için örnek XRR eğrisi. Kalınlık, yoğunluk, yüzey ve ara-yüzey pürüzlülükleri modellenerek hesaplanabildiği gibi, Fourier dönüşüm metodu yardımıyla kalınlık gibi niceliklerin doğrudan tespiti yapılır

Fourier dönüşüm yöntemi kullanılarak kalınlık, tahmini ölçeklerde ve hızlı olarak belirlenir. Bu tez çalışmasında, üretilen VO_x ince filmlerin kalınlıkları Leptos programında modelleme yapılarak Fourier dönüşüm yöntemiyle belirlendi.

6.4.2. GIXRD ölçümleri

GIXRD tekniği numunenin içerisinde hangi fazların olduğunu tayin etmek için kullanılır. GIXRD ölçümleri için, XRR ölçümlerinde olduğu gibi ışının örneğin tam ortasına gelmesi için, örnek yükseklik taraması yapılmıştır. X-Işını güç kaynağı için akım ve gerilim değerleri, 40 mA ve 40 kV'a ayarlanmıştır. Bu modda, X-Işını kaynağı 0,6°'ye sabitlenerek 10° ve 60° arasında, 0,05 °/adımlarla ölçümler gerçekleştirilmiştir.

GIXRD ölçümleri için örnek, sıyırma açısında sabitlenerek filmler için uygun ω değerinin belirlenebilmesi için, $\omega < 1^\circ$ olmak üzere tarama yapılır. Bu geometri ile yapılan ölçümlerde, yüzeye paralel düzlemlerden başka farklı düzlemlerden gelen Bragg yansımaları ortaya çıkar ve alttaştan bir kırınım şiddeti gelmediği için sadece filmin yapısı analiz edilir. Bu duruma ek olarak, sinyal gürültü oranını azaltmak için sıyırma açısıyla gelen ışın, örneğe daha az etki ederek, elde edilen kırınım deseni yüzeye yakın bölgeden alınır. Sıyırma açısıyla gelen X-ışını geniş hacme etki ederek, detektöre gelen ışının şiddetin yüksek olması sağlanır. Dolayısıyla beklenen bütün pikler bu şekilde kolayca tespit edilir.

6.5. Elektriksel Ölçümler

VO_x ince filmlerin elektriksel ölçümleri Şekil 6.7'de gösterilen Lucas Labs marka Pro4-4000 model dört nokta iğne tekniği (FPP) ile yapılmıştır. Ölçümleri sisteme entegre Keitley 2400 marka güç kaynağı kullanılarak bilgisayar kontrollü yapılmaktadır.



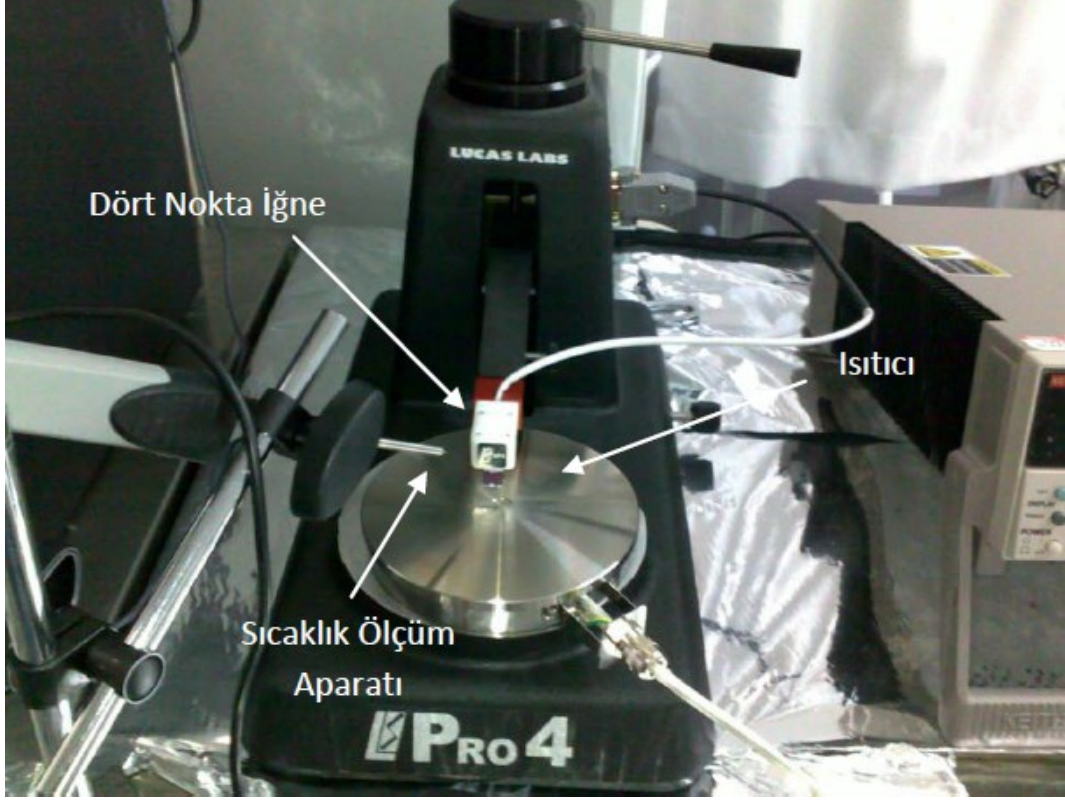
Şekil 6.7. Anadolu Üniversitesi İleri Teknoloji İnce Film Laboratuvarı'nda bulunan dört nokta iğne tekniği elektriksel ölçüm düzeneği

Sistemin minimum ve maksimum direnç aralığı $1 \text{ m}\Omega$ ve $1 \text{ M}\Omega$ 'dir. FPP sisteminde kullanılan iğneler Osmiyum ve Tungsten Karbür malzemesinden üretilmişlerdir. İğneler arası mesafe $1,016 \text{ mm}$ 'dir. Bu tez çalışmasında kullanılan iğneler Osmiyum malzemesinden yapılmış olup filmin üzerine uyguladığı en yüksek kuvvet 85 gram 'dır.

Sisteme numune yerleştirildikten sonra uçları spiral şekilde olan hassas iğneler numune yüzeyine temas ettirilir. İğnelerin spiral şeklinde olması filmin delinmesini ya da kalkmasını engellemektedir. Film yüzeyinde sürtündükleri için numunenin yüzeyinin en az oranda zarar görmesini sağlarlar.

Ölçümler için FPP düzeneğinin altına yerleştirilen numunenin geometrik boyutları ve film kalınlığı bilgisayara girilmektedir. Bilgisayar, güç kaynağını otomatik olarak kontrol ederek belirli adımlarda farklı akım değerlerini girmesiyle numune için en uygun akım değerini belirler ve filmin yaprak (ROS) direnci ve öz direnci (ρ) hesaplanır.

İnce filmlerin sıcaklığa bağılı direnç değişiminin belirlenebilmesi için, Şekil 6.8’de görülen, sisteme entegre soğutmasız ısıtıcı ile filmin yüzeyindeki sıcaklığı ölçen sıcaklık ölçüm aparatı kullanılır.



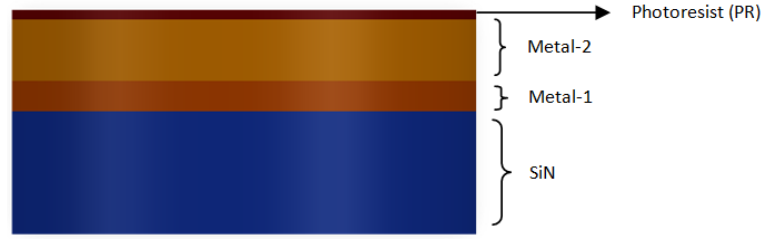
Şekil 6.8. FPP sistemi, sisteme entegre edilen ısıtıcı ve filmin yüzeyindeki sıcaklığı ölçmek için kullanılan sıcaklık ölçüm aparatı

Isıtıcının sıcaklığı artırılarak, sıcaklığa bağılı elektriksel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Isıtıcının her 5 °C sıcaklık artışında ve soğuması sırasında numunenin sıcaklık ve elektriksel özellikleri kaydedilmiştir. Direnç ve TCR değerleri istenilen aralıklarda çıkan numunelerin sıcaklığa bağılı elektriksel ölçümleri ayrıntılı olarak her 2 °C’de bir kaydedilerek tekrar ölçülmüştür.

6.6. Litografi Süreci

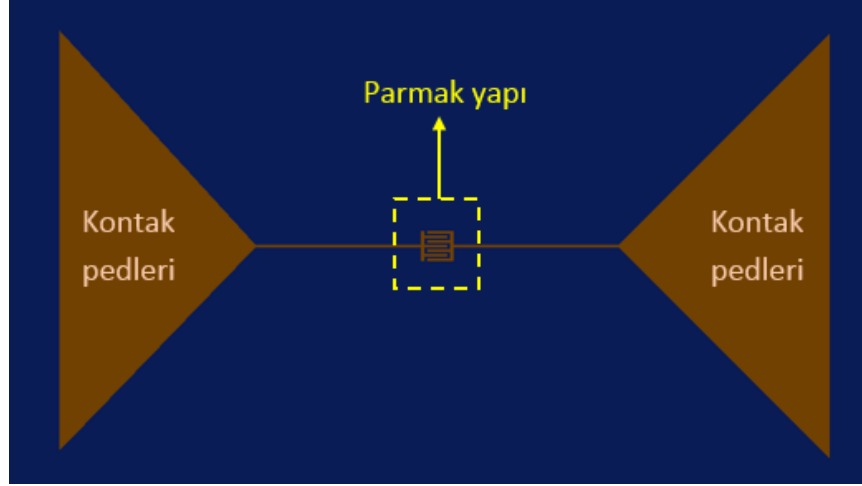
3” alttaşlar üzerine üretilecek VOx ince filmlerin fotolitografi süreci tasarlanmıştır. Sürecin aktif malzeme (VOx) biriktirme işlemi Anadolu Üniversitesi - İnce Film Laboratuvarı’nda, şekillendirme aşamaları ODTÜ-MEMS Araştırma ve Uygulama Merkezi’nde yapılmıştır.

VOx ince filmler parmak (finger) yapı şeklindeki elektrotlar üzerine serilmiştir. Parmak yapıda elektrotlar yapılmasındaki amaç, elektrotların yüzey alanı manipüle edilerek elektriksel direncin kontrollü olarak değiştirilebilmesidir. ODTÜ-MEMS Merkezi’nde, 4” (4 inç) alttaş üzerine Şekil.6.9’da gösterildiği gibi Si/SiN alttaş üzerine Metal-1 ve Metal-2 metal tabakaları büyütülmüştür. Fotorezist (Photoresist, PR) serilerek bu iki metal şekillendirilecektir.



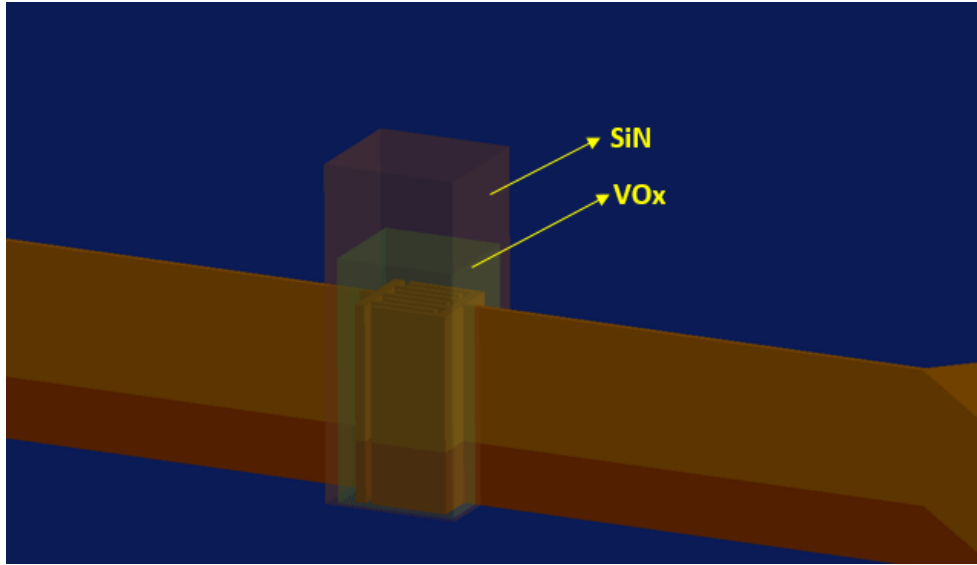
Şekil.6.9: SiN alttaş üzerine büyütülen elektrot metalleri (Metal-1: Krom, Metal-2: Altın)

Elektrotlar kimyasal aşındırma (wet-etch) süreçleri ile Şekil.6.10’daki gibi şekillendirildikten sonra alttaş kesme cihazında (Dicer) 3” boyutlarında olacak şekilde kesilmiş ve üzerine Anadolu Üniversitesi - İleri Teknoloji İnce Film Laboratuvarı’nda 100 nm VOx ince film büyütülmüştür.



Şekil.6.10: Kimyasal aşındırma süreçleri ile şekillendirilen elektrotlar

Film kaplı alttaşlar, ODTÜ-MEMS Merkezi'nde şekillendirilecektir. Alttaşın tüm yüzeyine kaplanan VO_x ince film, üzerine koruyucu 50 nm SiN kaplandıktan sonra Şekil.6.11'deki gibi şekillendirilmiştir.



Şekil.6.11: Parmak yapı elektrotlar üzerine büyütülen VO_x ince film (şeffaf yeşil) ve koruma tabakası olarak VO_x ince film üzerine büyütülen SiN tabakalarının (şeffaf kırmızı) şekillendirilmesi

7. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde 6.1'deki deney planına göre üretilen VOx ince filmlerin, XRR tekniği kullanılarak elde edilen kalınlık değerleri, FPP tekniği kullanılarak belirlenen elektriksel özellikleri, XRD ve GIXRD teknikleri ile incelenen yapısal özellikleri ve litografi süreci sonrası elektriksel karakterizasyon sonuçları verildi.

7.1. VOx İnce Filmlerin Üretimindeki Argon Gaz Akış Oranı Optimizasyonu

Mikrobolometreler için istenilen elektriksel özelliklere ($R < 100 \text{ k}\Omega$, $\text{TCR} < -2.5 \text{ \%}/^\circ\text{C}$, $f_c < 10 \text{ kHz}$) sahip numunelerin üretimi için 6.1'de belirtilen üretimler yapılmıştır. Her farklı gaz akış oranlarında bir adet Si/SiO₂ ve bir adet Si/SiN alttaş üzerine VOx ince filmler büyütülmüştür. Si alttaş üzerine büyütülen filmler kalınlık tespiti için kullanılmıştır. Mikrobolometrelerde IR radyasyonun soğurulması amacıyla SiN alttaş kullanıldığı için ayrıntılı elektriksel ve TCR ölçümleri Si/SiN alttaş üzerine büyütülen VOx ince filmlerde yapılmıştır.

4, 6 ve 8 sccm argon ve farklı oksijen oranlarında büyütülecek olan VOx ince filmlerin elektriksel özellikleri incelenerek tüm üretilen filmlerin elektriksel özellikleri değerlendirildikten sonra VOx ince filmlerin üretimindeki O₂/Ar gaz akış oranı tespit edilmiştir. Filmlerin elektriksel özelliklerinde iyileştirmeler yapmak için tespit edilen O₂/Ar oranı sabit tutularak oksijen gazının akış oranında hassas değişimler yapılarak tekrar VOx ince film üretimleri yapılarak optimizasyon sürecine geçilmiştir.

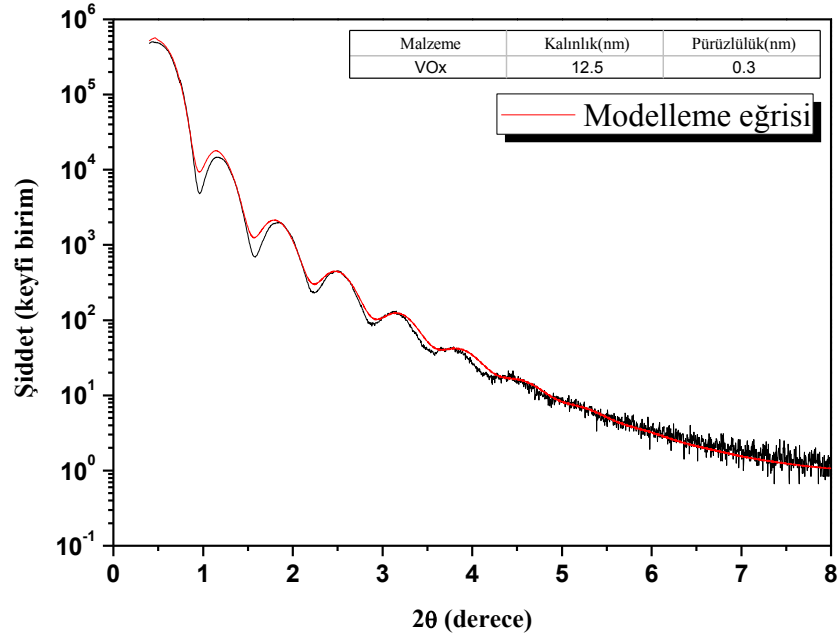
VOx ince filmler 20 nm kalınlıkta büyütülerek elektriksel özellikleri incelenmiştir. Ayrıca XRR ölçümleri sonucunda kalınlık ve büyüme hızı tayini yapılarak, 100 nm filmler bu sonuçlara göre büyütülmüştür.

4 sccm argon gaz akış ve farklı oksijen gaz akış oranların 20 nm VOx ince filmler üretilmiştir. Filmlerin kalınlık değerleri Çizelge 7.1'de verilmiştir.

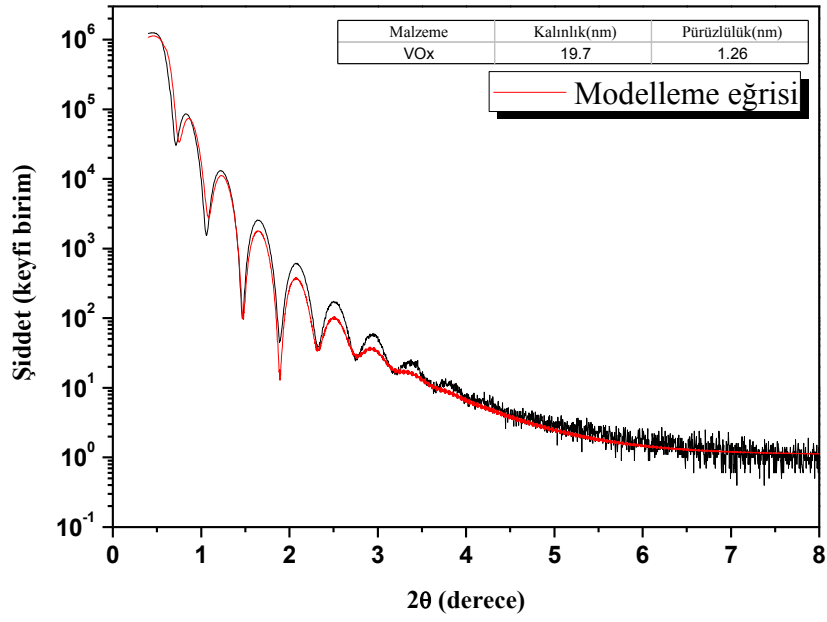
Çizelge 7.1. 4 sccm Ar ve değişen O₂ oranlarında üretilen VOx ince filmlerin kalınlık değerleri

Numune İsmi	O ₂ /Ar	O ₂ (sccm)	Ar (sccm)	Kalınlık (nm)
#4-1	5%	0.2	4	12.5
#4-2	10%	0.4	4	19.7
#4-3	15%	0.6	4	22.3
#4-4	20%	0.8	4	23.5
#4-5	30%	1.2	4	22.5

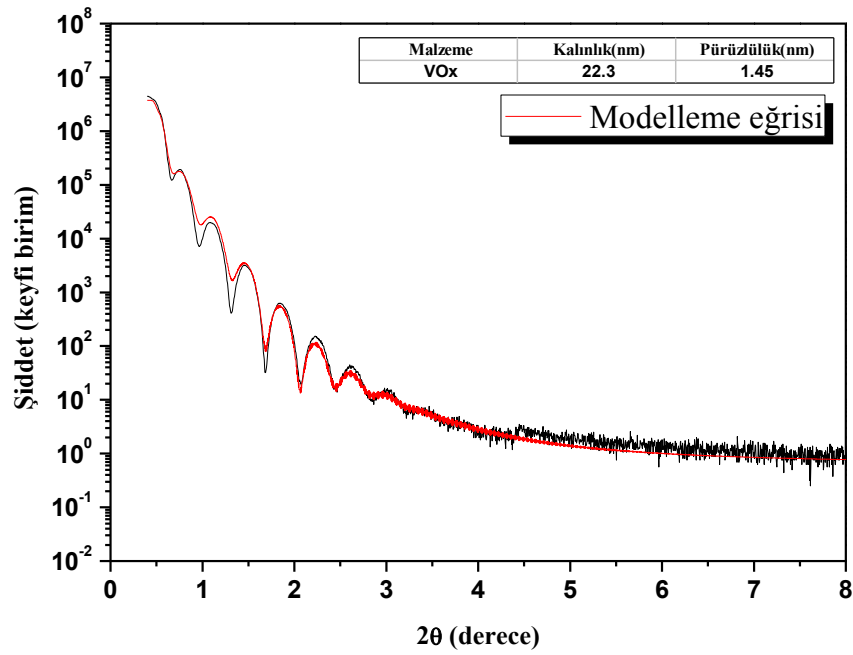
Si/SiO₂ alttaş üzerine büyütülen VOx ince filmlerin kalınlıkları, yüzey ve ara yüzey pürüzlülükleri Leptos yazılımı ile modelleme yapılarak tespit edilmiştir.



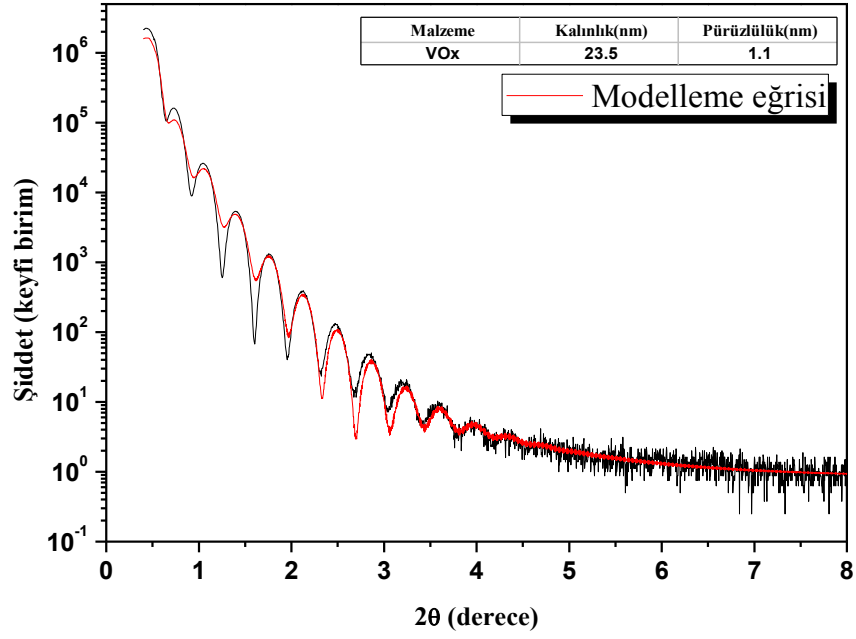
Şekil 7.1. 4/0.2 sccm Ar/O₂ gaz akış oranında üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri



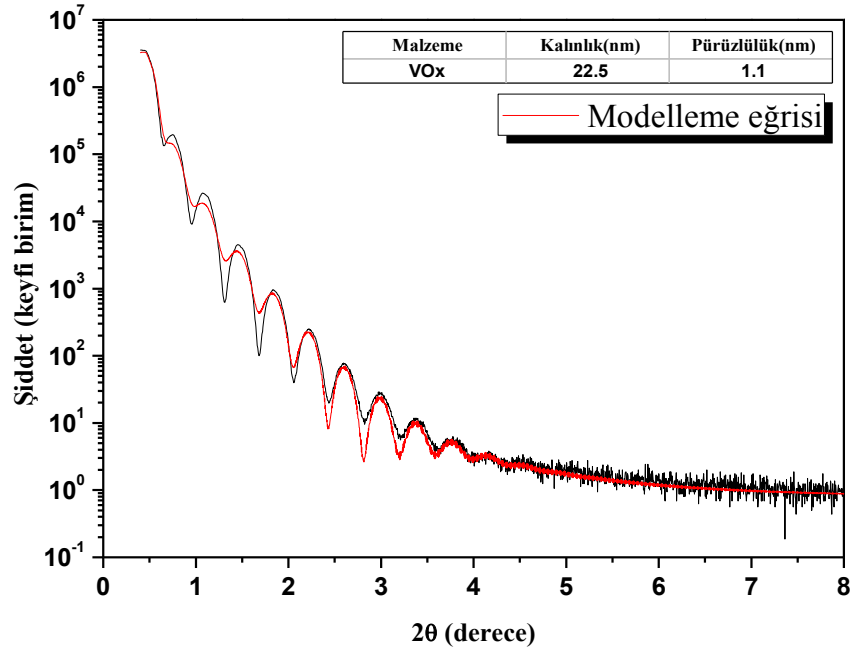
Şekil 7.2. 4/0.4 sccm Ar/O₂ gaz akış oranında üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri



Şekil 7.3. 4/0.6 sccm Ar/O₂ gaz akış oranında üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri



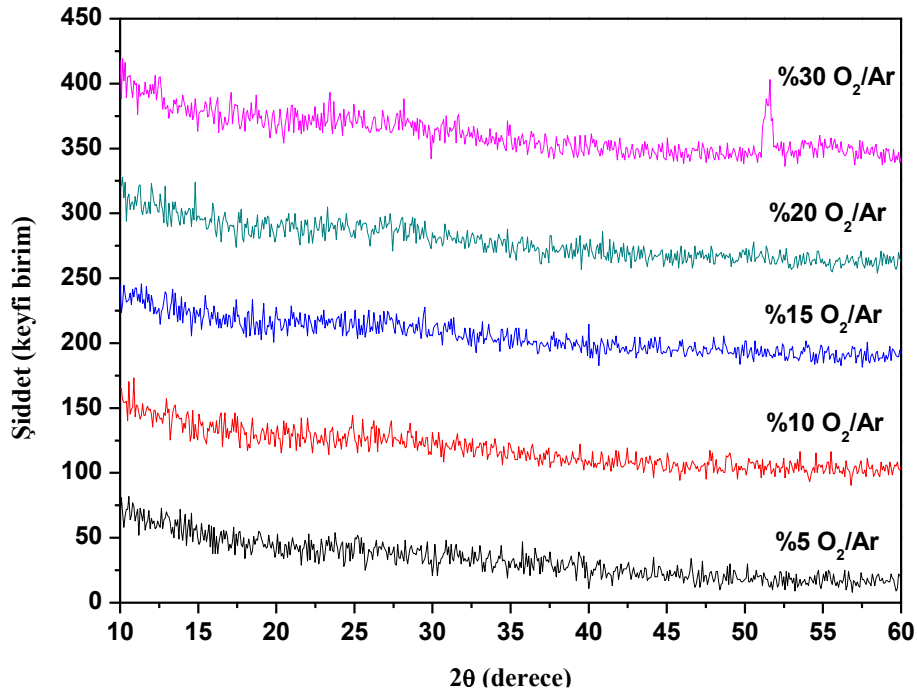
Şekil 7.4. 4/0.8 sccm Ar/O₂ gaz akış oranında üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri



Şekil 7.5. 4/1.2 sccm Ar/O₂ gaz akış oranında üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri

Si/SiO₂ alttaşlar üzerine büyütölen filmler sadece kalınlık ve büyüme hızı tayini için kullanılmıştır. XRR ölçümü sonuçları incelendiğinde, üretilen VOx ince filmlerin ara yüzey pürüzlölüklerinin oldukça düşük çıktığı ve yüzey pürüzlölüklerinin artan O₂/Ar oranı ile arttığı gözlenmiştir. Ayrıca aynı sürelerde üretilen filmlerin artan O₂/Ar oranları ile kalınlıklarının arttığı, yani büyüme hızlarının arttığı gözlenmiştir.

Si/SiN alttaş üzerine 20 nm kalınlıkta 4 sccm argon gaz akış ve 5, 10, 15, 20 ve 30 % O₂/Ar gaz oranlarında üretilen VOx ince filmlerin GIXRD ölçümleri yapılmıştır (bkz. şekil 7.6). Yapılan ön GIXRD ölçümlerinde üretilen VOx ince filmler için en uygun geliş açısı 0.6° olarak hesaplanmıştır. 0.6° geliş açısında 10-60 derece açılarında yapılan GIXRD kırınımı desenlerinde filmlerin amorf yapıda olduğu görölmektedir. Daha önce Anadolu Üniversitesi İleri Teknoloji İnce Film Laboratuvarı'nda yapılan çalışma ve yayınlar filmlerin nano-tanecikli olduğunu, bu nedenle GIXRD'de amorf göröldüğu tespit edilmiştir [1,2,4,5,34,40].



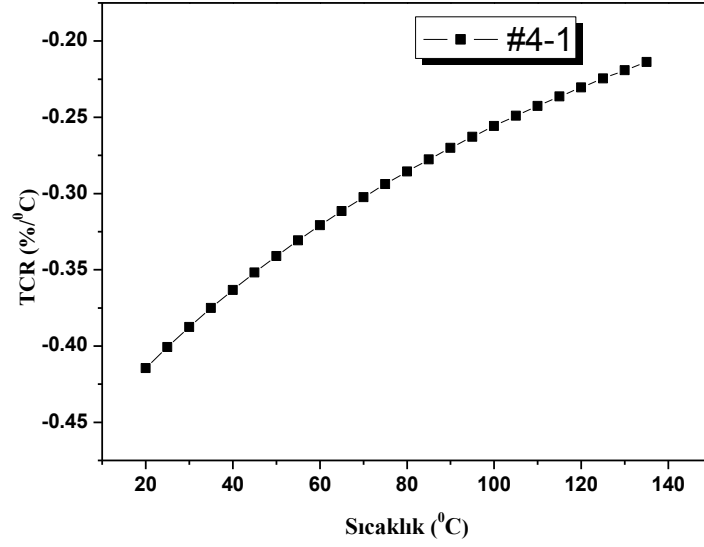
şekil 7.6. Si/SiN alttaş üzerine 20 nm kalınlıkta 4 sccm argon gaz akış ve % 5, 10, 15, 20 ve 30 O₂/Ar gaz oranlarında üretilen VOx ince filmlerin GIXRD kırınımı desenleri. % 30 O₂/Ar kırınım deseninde 53° derecede görölen pik XRD optik sisteminden kaynaklanan bir anomalidir, bir kristal yapıya ait değildir.

Elektriksel karakterizasyonlar, SiN alttaş üzerine büyütülen VOx ince filmlerde yapılmıştır. 4 sccm argon ve farklı oksijen gaz akış oranlarında 20 nm büyütülen VOx ince filmlerden sadece % 5 ve % 10 O₂/Ar oranında büyütülenlerden elektriksel kontak alınabilmektedir. Diğer oksijen oranlarında büyütülen filmler yalıtkan çıkmıştır ve elektriksel direnç değerleri tespit edilememiştir (bkz. Çizelge 7.2).

Çizelge 7.2. 4 sccm Ar ve değişen O₂ oranlarında SiN alttaş üzerine büyütülen VOx ince filmlerin elektriksel özellikleri

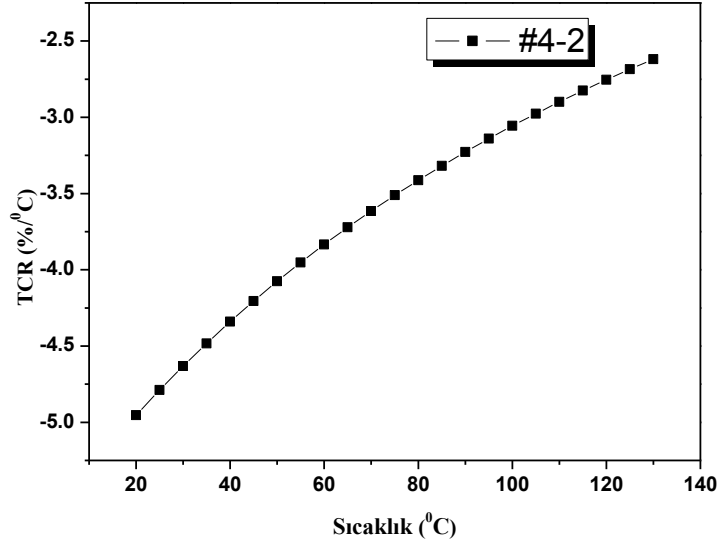
Numune İsmi	Direnç (Ω)	Özdirenç (Ω cm)	TCR ($\%/^{\circ}\text{C}$)
#4-1-SiN	5766.03	0.01	-0.4
#4-2-SiN	1.99E+07	39.85	-4.5
#4-3-SiN	Kontak alınamadı (K.A.)	K.A.	K.A.
#4-4-SiN	K.A.	K.A.	K.A.
#4-5-SiN	K.A.	K.A.	K.A.

4 sccm argon 0.2 sccm oksijen gaz akış oranında üretilen VOx ince filmin elektriksel direnç ve TCR değerleri çok düşük çıkmıştır. Bu numunenin üretim sürecinde oksijen gaz akış oranının düşük olması nedeniyle filmin elektriksel direnci de beklenildiği gibi düşük çıkmıştır. Düşük dirençli filmlerin TCR değerlerinin düşük çıkmaktadır. Şekil 7.7'de 25 °C'de TCR değeri -0,40 %/°C olan #4-1 numaralı VOx ince filmin TCR-sıcaklık eğrisi verilmiştir.



Şekil 7.7. 4 sccm argon ve 0.2 sccm O₂ gaz akış oranında SiN alttaş üzerine 20 nm büyütülen VO_x ince filmin TCR-sıcaklık eğrisi

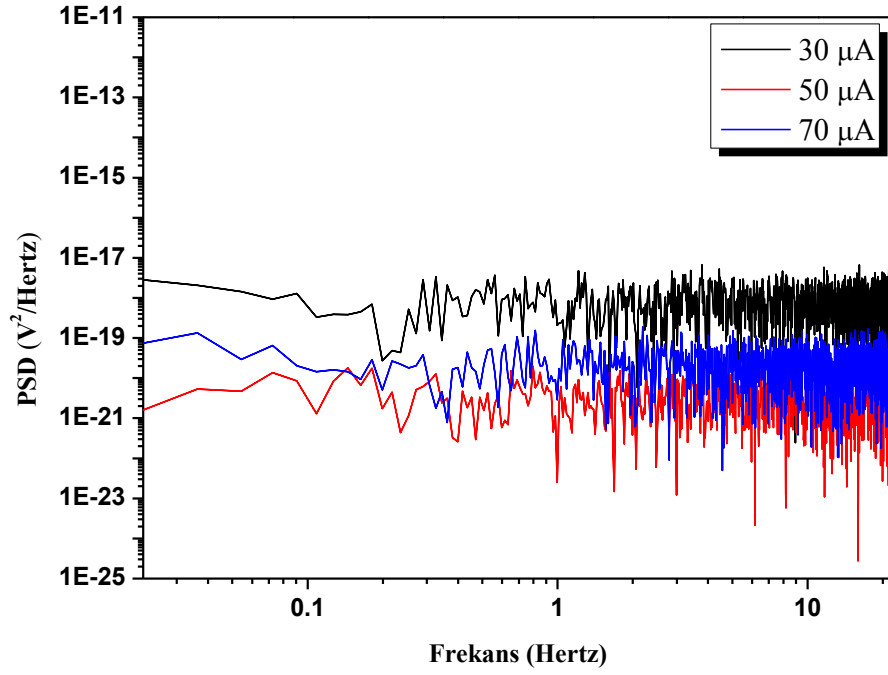
O₂/Ar oranının % 10 olan #4-2 numaralı VO_x ince filmde, büyütme işlemi sırasında oksijenin filmin yapısına daha çok katılması beklenmektedir. 7.2'deki direnç ve TCR değerleri incelendiğinde, filmin yapısına oksijenin daha fazla girdiği, dolayısıyla direnç ve TCR değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. #4-2 numunesinin TCR değeri -4.75 %/°C olarak hesaplanmıştır (bkz. Şekil 7.8.). Yüksek bir TCR değeri olan #4-2 numunesinin direnç değeri yaklaşık 20 MΩ seviyelerindedir. Bu VO_x ince film, çok yüksek elektriksel dirence sahip olduğundan dolayı mikrobolometre uygulamalarında kullanılma potansiyeli çok düşüktür.



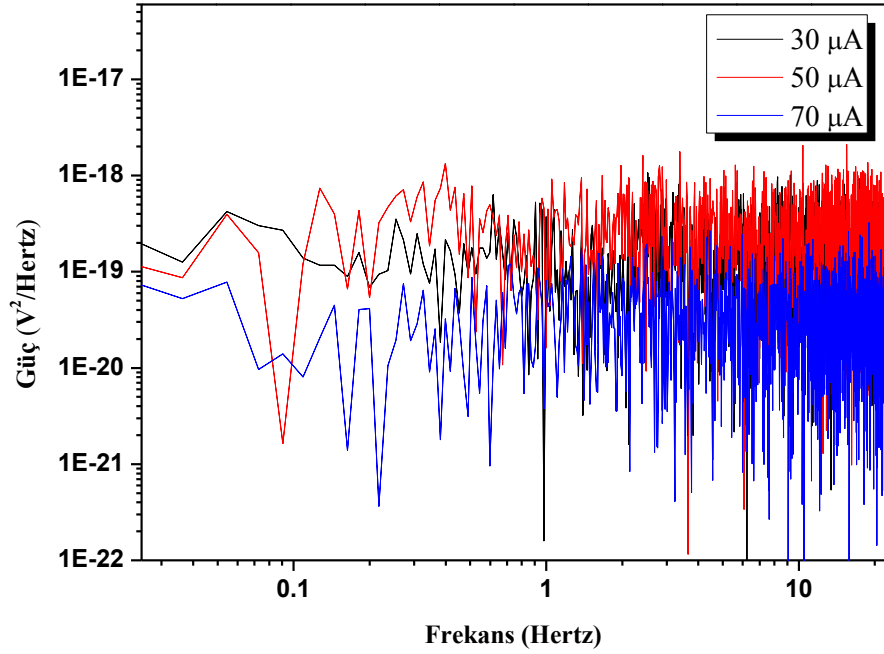
Şekil 7.8. 4 sccm argon ve 0.2 sccm O₂ gaz akış oranında SiN alttaş üzerine 20 nm büyütülen VOx ince filmin TCR-sıcaklık eğrisi

15, 20 ve %30 O₂/Ar oranlarında üretilen filmler elektriksel olarak yalıtkan olduğu tespit edilmiştir. Bu filmlerde, oksijen filmin yapısına çok fazla miktarda katılarak filmin elektriksel olarak yalıtkan özellik göstermesine sebep olduğu düşünülmektedir. Yüksek direnç değerlerinden dolayı filmlerin direnç ve TCR ölçümleri yapılamamıştır.

Şekil 7.9 ve 7.10'da, 20 nm kalınlıkta % 5 O₂/Ar gaz akış oranında Si/SiO₂ ve Si/SiN alttaş üzerine büyütülen #4-1 numunesinin, 0-25 Hz bant aralığında 30, 50 ve 70 µA akım değerlerinde ölçülen elektriksel gürültüsü verilmiştir. SiO₂ alttaş üzerine büyütülen filmin elektriksel direncinin daha düşük çıktığı tespit edilmiştir. SiN alttaş malzemesi üzerine büyütülen filmlerin elektriksel gürültüsünün daha fazla çıktığı voltajdaki dalgalanmalardan da anlaşılmaktadır. SiN alttaş malzemelerinin yüzey pürüzlülüklerinin SiO₂ alttaş malzemelerine göre daha yüksek olması ve bunun sonucunda üzerine büyütülen malzemenin daha kusurlu olmasına sebep olmaktadır. İnce filmlerin mikro yapılarındaki kusurlar elektriksel iletimi etkilediği için, kusurların artması elektriksel gürültünün de artmasına sebep olmaktadır.



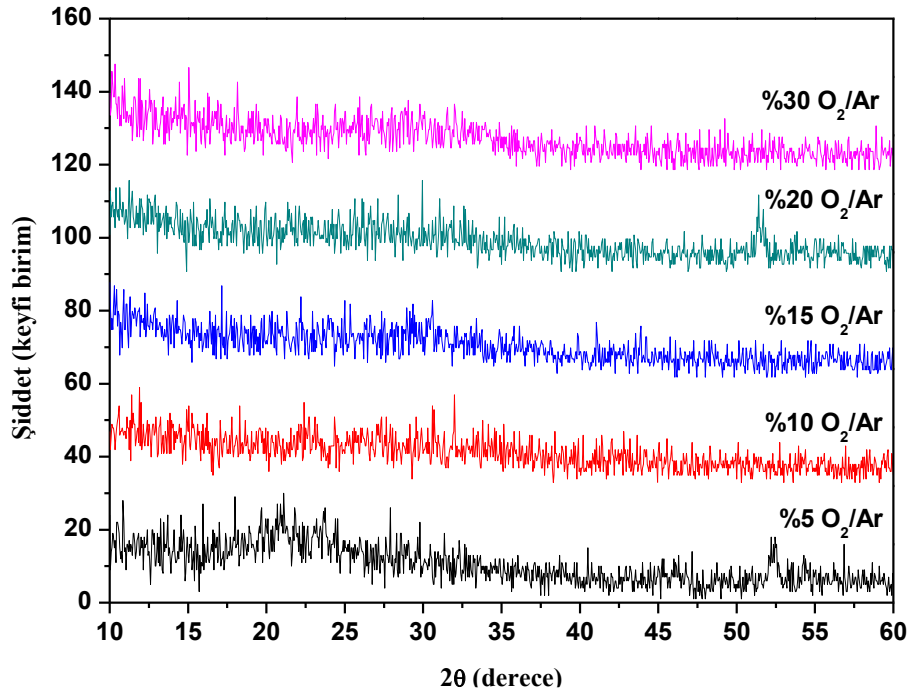
Şekil 7.9. 4 sccm argon ve 0.2 sccm O₂ gaz akış oranında SiO₂ alttaş üzerine 20 nm kalınlıkta büyütülen VO_x ince filmin 30, 50 ve 70 µA akım değerlerindeki elektriksel gürültüsü



Şekil 7.10. 4 sccm argon ve 0.2 sccm O₂ gaz akış oranında SiN alttaş üzerine 20 nm kalınlıkta büyütülen VO_x ince filmin 30, 50 ve 70 µA akım değerlerindeki elektriksel gürültüsü

4 sccm argon gaz akış oranlarında üretilen 20 nm VO_x ince filmlerin büyüme hızları tespit edildikten sonra 100 nm VO_x ince filmler üretilmiştir. Her üretimde numune tutuculara 2 adet Si/SiO₂ ve 2 adet Si/SiN alttaş yüklenmiştir. Numunelere farklı karakterizasyon tekniklerinin de uygulanabilmesi potansiyeli olduğundan, her 100 nm üretilen VO_x ince filmlerin üretimi için Si/SiO₂ ve Si/SiN alttaşlardan ikişer tane yüklenmiştir.

SiN alttaş üzerine 100 nm kalınlıkta 4 sccm argon gaz akış ve % 5, 10, 15, 20 ve 30 O₂/Ar gaz oranlarında üretilen #44 serisi numunelerin GIXRD ölçümleri yapılmıştır (bkz. Şekil 7.11). 0,6° geniş açısında 10-60 derece açılarında yapılan GIXRD kırınımı desenlerinde filmlerin amorf yapıda olduğu gözlenmektedir. Üretilen VO_x ince filmlerin nano-kristal yapıda olduğu dolayı kristal yapıları GIXRD ölçümleri ile tespit edilememiştir.



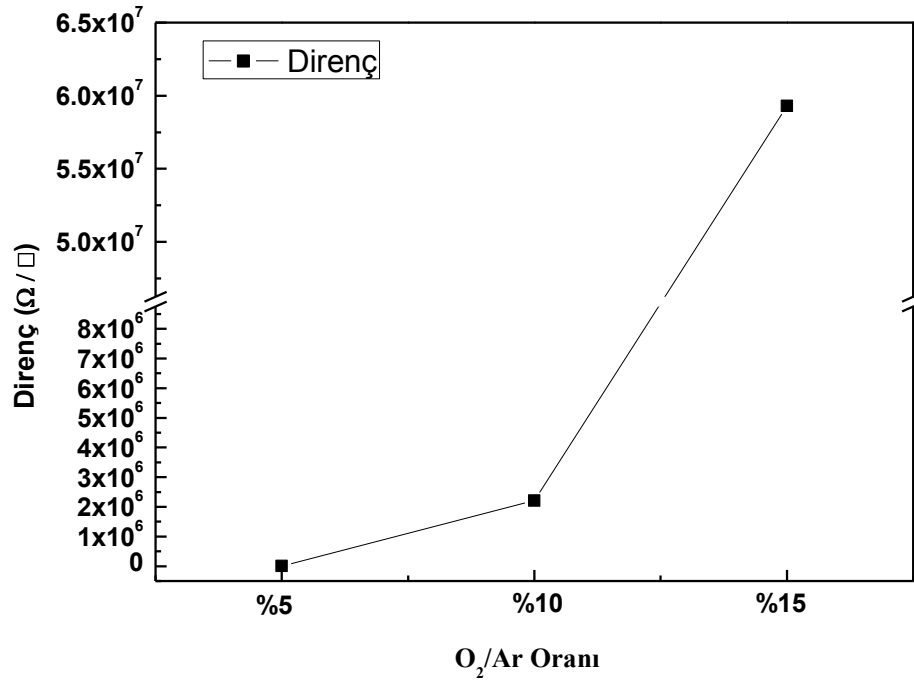
Şekil 7.11. Si/SiN alttaş üzerine 100 nm kalınlıkta 4 sccm argon gaz akış ve % 5, 10, 15, 20 ve 30 O₂/Ar gaz oranlarında üretilen VO_x ince filmlerin GIXRD kırınım desenleri. % 20 O₂/Ar kırınım deseninde 53° derecede görülen pik XRD optik sisteminden kaynaklanan bir anomalidir, bir kristal yapıya ait değildir

Si/SiN alttaş üzerine bytlen 100 nm VOx ince filmlerin elektriksel özellikleri incelenmiştir. Üretilen filmlerin elektriksel özellikleri izelge 7.3'te verilmiştir.

Çizelge 7.3. 4 sccm argon ve değişen oksijen oranlarında SiN alttaş üzerine 100 nm üretilen VOx ince filmlerin elektriksel zellikleri

Numune İsmi	O ₂ /Ar	Direnç (Ω)	zdiren (Ω cm)
#44-1	5	1301.35	0.0110
#44-2	10	2209160	22.09
#44-3	15	5.93E+07	593.01
#44-4	30	K.A.	K.A.
#44-5	30	K.A.	K.A.

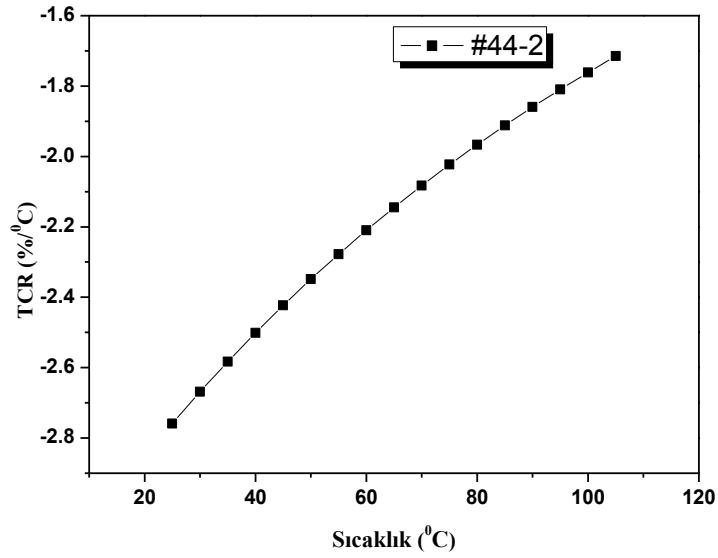
100 nm VN4 serisi VOx ince filmlerin 20 nm VOx ince filmlere göre daha kalın olduklarından dolayı direnç değerlerinin düştüğü gözlenmiştir. Buna ek olarak, üretilen 100 nm VOx ince filmlerin artan O₂/Ar oranlarıyla dirençlerinin arttığı gözlenmiştir (bkz. Şekil 7.12).



Şekil 7.12. 4 sccm argon ve değişen O₂/Ar oranlarında 100 nm üretilen VOx ince filmlerin elektriksel direnç değerlerinin değişim grafiği

% 20 ve 30 O₂/Ar oranlarında üretilen filmler yalıtkan olup elektriksel özellikleri incelenememiştir. Elektriksel direnç ve öz direnç değerleri göz önüne alındığında #44-1 ve #44-2 serileri dikkati çekmektedir. #44-1 numunesinin direnç değerinin çok düşük olmasından dolayı TCR değeri -0.3 %/°C olarak ölçülmüştür.

#44-2 Direnç değerlerinin 2 MΩ seviyelerinde olduğu ve üretim sırasında O₂/Ar oranındaki hassas değişimlerle daha da düşürülebileceği düşünülmektedir. #44-2 numunesinin TCR değeri -2.75 %/°C hesaplanmıştır (bkz. Şekil 7.13).



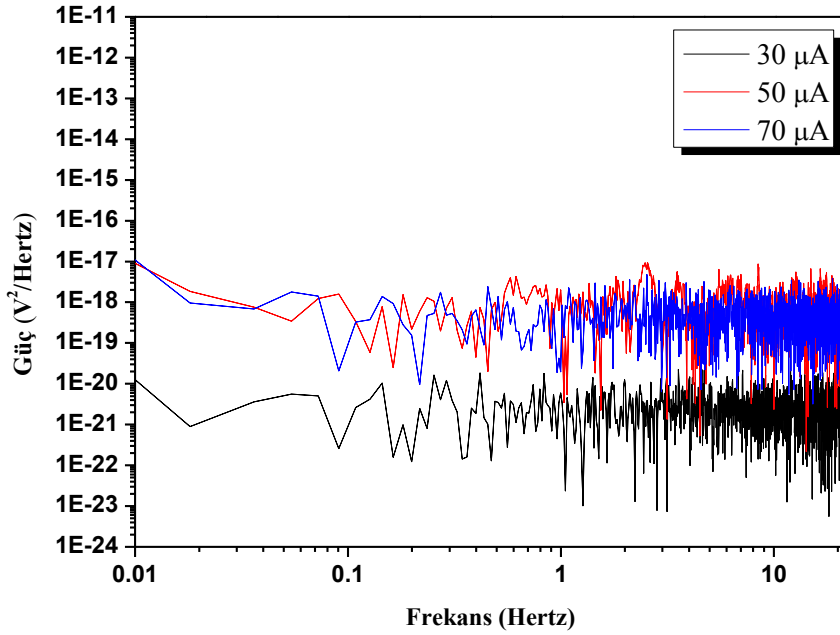
Şekil 7.13. 4 sccm argon ve %10 O₂/Ar gaz oranında Si/SiN alttaş üzerine 100 nm büyütülen VOx ince filmin direncinin doğal logaritmasının sıcaklıkla değişimi

4 sccm argon ve farklı oksijen gaz akış oranlarında üretilen 100 nm VOx ince filmlerin üretim sürecindeki güç, gerilim ve akım değerleri takip edilmiştir (bkz. Çizelge 7.4). Üretim sırasındaki güç, gerilim ve akım değerlerine bakıldığında, #44-4 ve #44-5 numunelerinin üretimi sırasında gerilimin arttığı gözlenmektedir. Bu artışın, birbiri ardına yapılan 100 nm VOx ince filmlerin üretimleri esnasında hedef malzemenin yüzeyinin oksitlenmesinden (kaynak zehirlenmesi) ve ısınmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

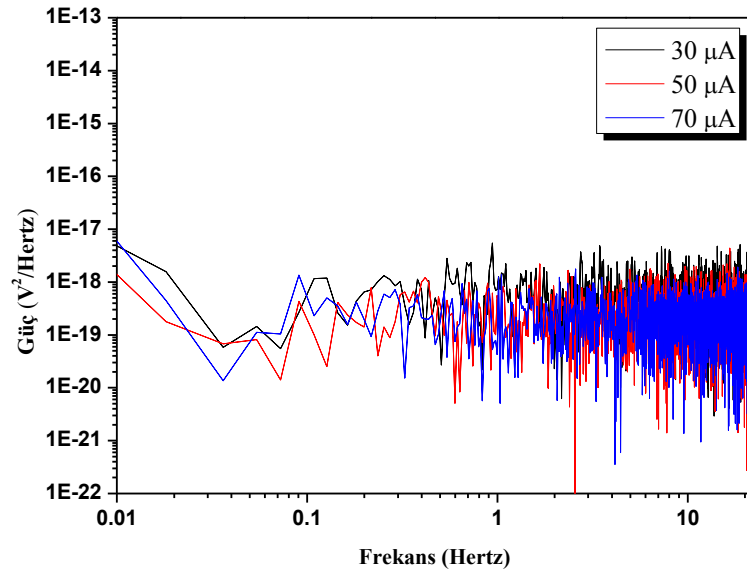
Çizelge 7.4. 4 sccm Ar ve farklı oksijen oranlarında 100 nm üretilen VOx ince filmlerin üretim güç parametreleri

Numune İsmi	Güç(W)	Gerilim (V)	Akım (mA)
#44-1	70	308	228
#44-2	70	308	228
#44-3	70	308	228
#44-4	70	316	222
#44-5	70	320	219

Şekil 7.14 ve 7.15'te 4 sccm argon akış ve % 5 O₂/Ar oranında Si/SiO₂ ve Si/SiN alttaş üzerine 100 nm kalınlıkta büyütülen #44-1 serisi VOx ince filmlerin farklı akım değerlerinde elektriksel gürültüsü verilmiştir. Si/SiO₂ alttaş üzerine büyütülen 100 nm kalınlıkta VOx ince filmin 1/f gürültüsünün 30 µA akım değerinde en az çıktığı görülmektedir. Si/SiN alttaş üzerine büyütülen filmde, farklı akım değerlerinde yapılan ölçümlerde elektriksel gürültüsünün değişmediği gözlenmiştir.



Şekil 7.14. 4 sccm argon ve % 5 O₂/Ar gaz oranında SiO₂ alttaş üzerine 100 nm kalınlıkta büyütülen VOx ince filmin 30, 50 ve 70 µA akım değerlerindeki elektriksel gürültüsü



Şekil 7.15. 4 sccm argon ve % 5 O₂/Ar gaz oranında SiN alttaş üzerine 100 nm kalınlıkta büyütülen VOx ince filmin 30, 50 ve 70 µA akım değerlerindeki elektriksel gürültüsü

4 sccm argon ve farklı oksijen gaz akış oranlarında 20 ve 100 nm VOx ince filmlerin üretimi tamamlanmıştır. Filmlerin elektriksel özellikleri incelendiğinde, 4/0.4 sccm Ar/O₂ gaz akış oranlarında üretilen VOx ince filmlerin elektriksel özellikleri mikrobolometre uygulamaları için istenilen değerlere en yakın olduğu tespit edilmiştir. Devamında, 6 ve 8 sccm argon ve farklı oksijen oranlarında da büyütülecek olan VOx ince filmlerin elektriksel özellikleri incelenmiştir.

6 sccm argon gaz akış ve % 5, 10, 15, 20 ve 30 O₂/Ar oranlarında 20 nm VOx ince filmlerin üretimi ve üretim sonrası kalınlık ölçümleri yapılmıştır (bkz. Çizelge 7.5).

Çizelge 7.5. 6 sccm Ar ve değişen O₂ oranlarında üretilen VOx ince filmlerin kalınlık değerleri

Numune İsmi	O ₂ /Ar	O ₂ (sccm)	Ar (sccm)	Kalınlık (nm)
#6-1	5%	0.3	6	15.3
#6-2	10%	0.6	6	23.0
#6-3	15%	0.9	6	23.3
#6-4	20%	1.2	6	23.5
#6-5	30%	1.8	6	23.1

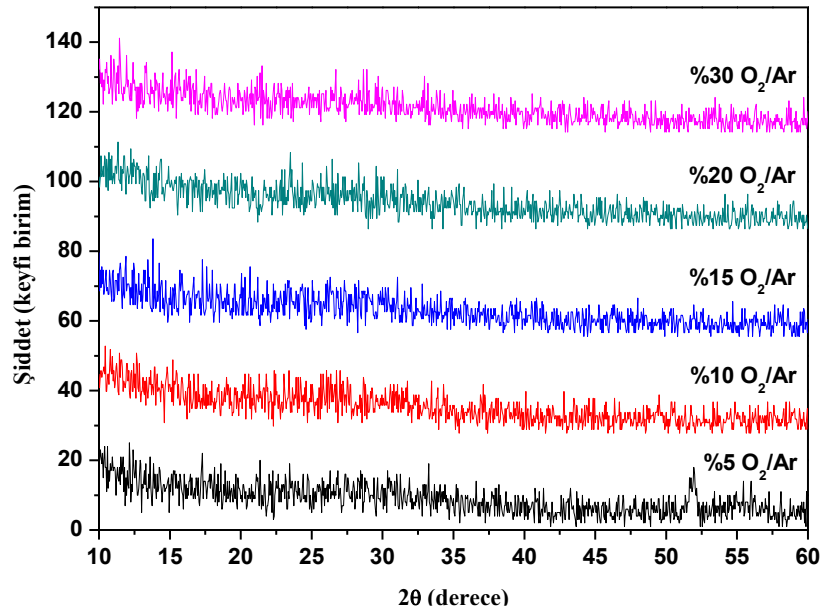
SiN alttaş üzerine büyütülen 20 nm VOx ince filmlerin elektriksel özellikleri ölçülmüştür. Sadece % 5 O₂/Ar oranında büyütülen filmlerin elektriksel

özellikleri tespit edilebilmiştir. Diğer O₂/Ar oranlarında üretilen VO_x ince filmlerin elektriksel direnç değerleri çok yüksek olduğundan dolayı FPP cihazı ile dirençleri ölçülememiştir (bkz. Çizelge 7.6.).

Çizelge 7.6. 6 sccm Ar ve farklı O₂ oranlarında 20 nm üretilen VO_x filmlerin elektriksel değerleri

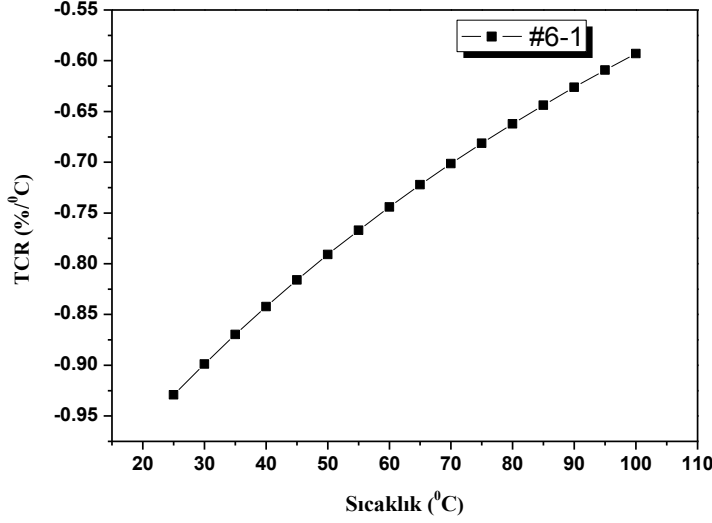
Numune ismi	Direnç(Ω)	Özdirenç(Ω cm)
#6-1	69161.7	0.138
#6-2	K.A.	K.A.
#6-3	K.A.	K.A.
#6-4	K.A.	K.A.
#6-5	K.A.	K.A.

Si/SiN alttaş üzerine 20 nm kalınlıkta 6 sccm argon gaz akış ve % 5, 10, 15, 20 ve 30 O₂/Ar gaz oranlarında üretilen #6 serisi VO_x ince filmlerin GIXRD ölçümleri yapılmıştır (bkz. Şekil 7.16). 0,6° geliş açısında 10-60 derece arası açılarda yapılan GIXRD ölçümleri sonucunda filmlerin amorf (nano-kristal) yapıda oldukları görülmektedir.



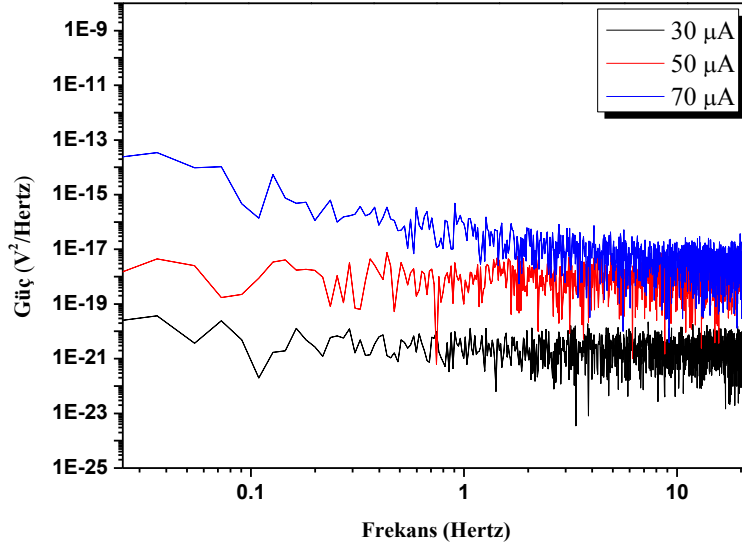
Şekil 7.16. Si/SiN alttaş üzerine 20 nm kalınlıkta 6 sccm argon gaz akış ve % 5, 10, 15, 20 ve 30 O₂/Ar gaz oranlarında üretilen VO_x ince filmlerin GIXRD desenleri. % 5 O₂/Ar kırınım deseninde 53° derecede görülen pik XRD optik sisteminden kaynaklanan bir anomalidir, bir kristal yapıya ait değildir

Elektriksel özellikler 7.6’da verilen 6 sccm argon gaz akış oranında üretilen 20 nm VO_x ince filmlerin elektriksel direnç değerleri, 4 sccm argon gaz akışı ve % 5 O₂/Ar oranında üretilen 20 nm VO_x ince filmlerden daha yüksektir. #6-1 serisi SiN altaş üzerine büyütülen VO_x ince filmin TCR değeri -0.92 %/°C ölçülmüştür (bkz. Şekil 7.17).



Şekil 7.17. 6 sccm argon ve 0.3 sccm O₂ gaz akış oranında SiN altaş üzerine 20 nm büyütülen VO_x ince filmin TCR-sıcaklık eğrisi

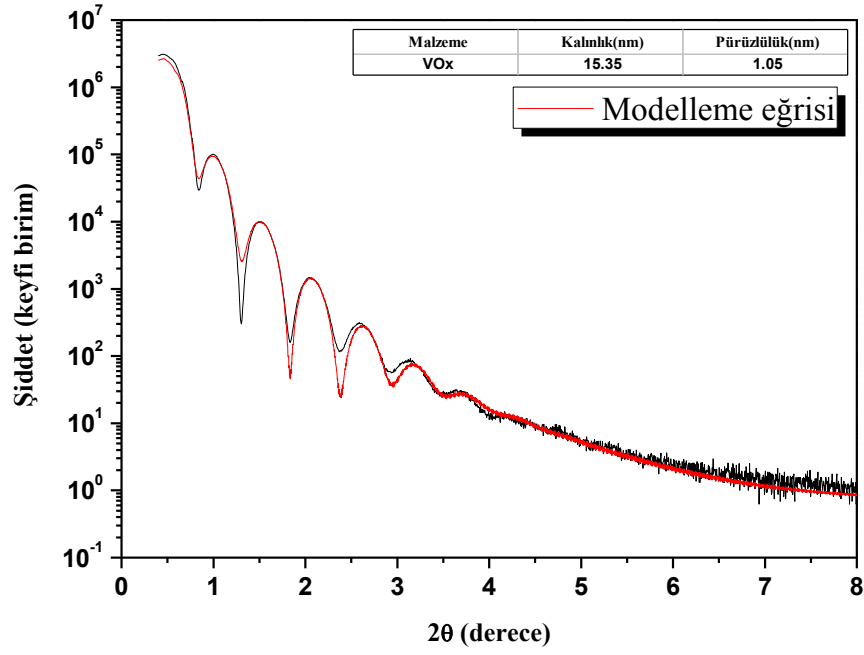
Şekil 7.18’de 20 nm kalınlıkta 6 sccm argon akış ve % 5 O₂/Ar oranında Si/SiO₂ altaş üzerine büyütülen VO_x ince filmin farklı akım değerlerinde elektriksel gürültüsü verilmiştir. 6 sccm argon gaz akış oranında üretilen ve elektriksel direnç değerleri 10 kΩ seviyelerinde olan bu ince filmin elektriksel gürültüsünün 30 µA akım değerinde en düşük çıkmıştır. Ayrıca artan akım değerleri ile elektriksel gürültüsünün arttığı gözlenmiştir.



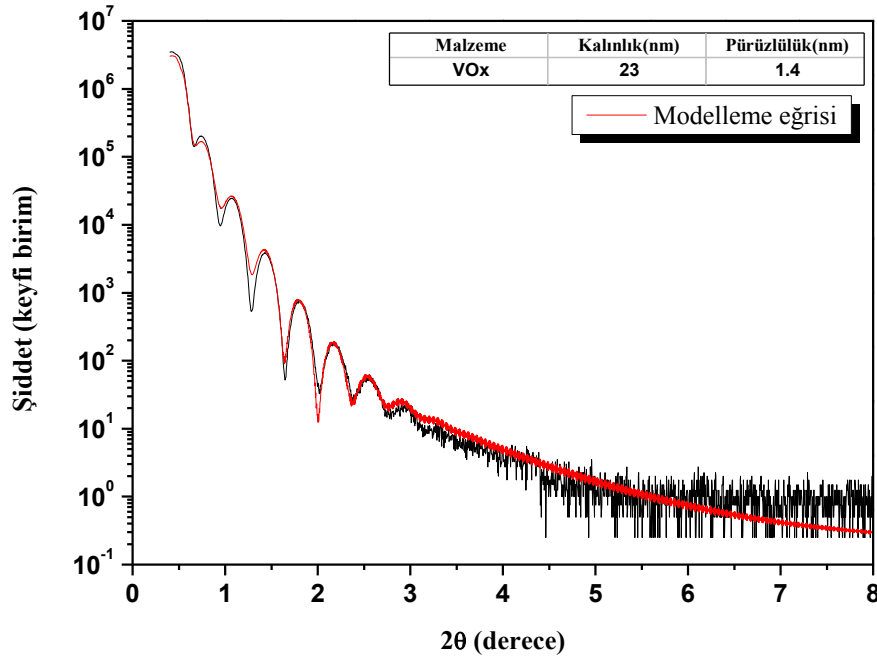
Şekil 7.18. 6 sccm argon ve 5% O₂/Ar gaz akış oranında Si/SiO₂ alttaş üzerine 20 nm kalınlıkta büyütülen VOx ince filmin 30, 50 ve 70 µA akım değerlerindeki elektriksel gürültüsü

Yapılan üretimlerinde, üretim sürecindeki toplam gaz basıncı arttıkça VOx ince filmlerin elektriksel direnç değerlerinin O₂/Ar gaz oranından bağımsız olarak yükseldiği gözlenmiştir. Filmlerin kalınlıkları arttıkça dirençlerinin düşeceği bilindiğinden, 6 sccm argon gaz akış oranında 100 nm VOx ince film üretimlerinin sadece 5 ve 10 % O₂/Ar oranlarında yapılmasına karar verilmiştir.

100 nm #66 serisi VOx ince filmlerin üretimleri için #6-1 ve #6-1 numunelerinin XRR ölçümleri ve modellemeleri yapılarak büyüme hızları tespit edilmiştir (bkz. Şekil 7.19 ve 7.20).



Şekil 7.19. 6/0.3 Ar/O₂ gaz oranlarında 20 nm üretilen VOx ince filmin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri



Şekil 7.20. 6/0.6 Ar/O₂ gaz oranlarında 20 nm üretilen VOx ince filmin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri

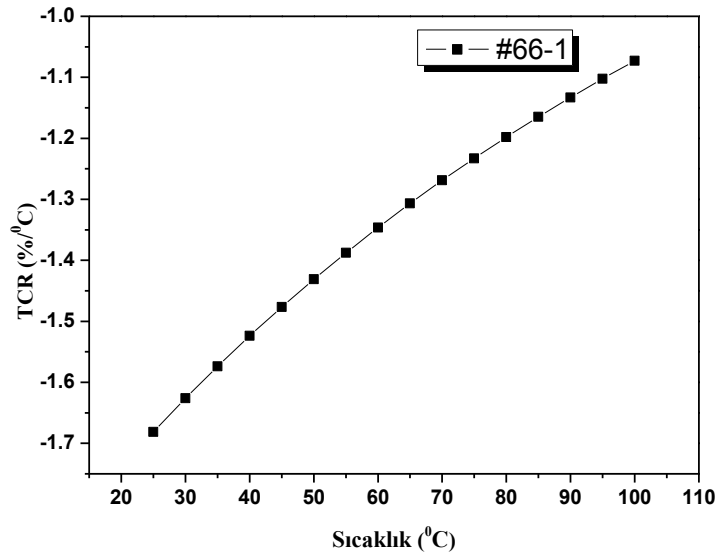
6 sccm argon gaz akış ve % 5, 10 O₂/Ar oranlarında üretilen #6-1 ve #6-2 numunelerinin XRR modelleme eğrileri ile büyüme hızları tespit edilmiştir. Bu

büyüme hızlarına göre SiN alttaş üzerine büyütülen 100 nm VOx ince filmlerin elektriksel özellikleri Çizelge 7.7’de verilmiştir.

Çizelge 7.7. 6 sccm Ar ve farklı O₂ oranlarında üretilen 100 nm VOx filmlerin elektriksel değerleri

Numune İsmi	O ₂ /Ar	Direnç (Ω)	Özdirenç (Ω cm)
#66-1	5	4427.7	0.044
#66-2	10	8.38E+07	838.49

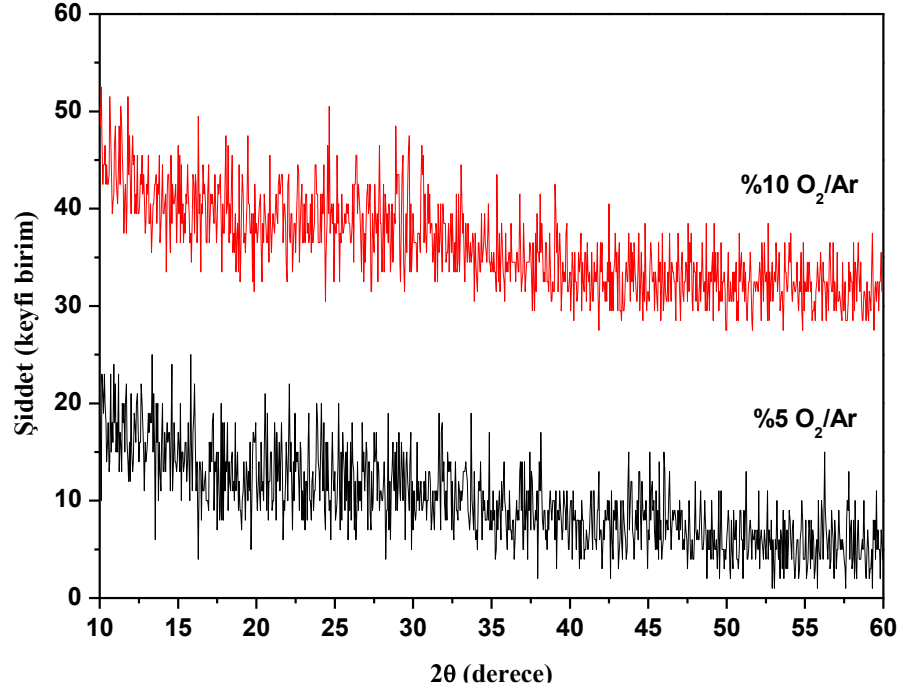
7.7’de de görüldüğü gibi #66-1 serisi VOx ince filmin elektriksel direnç değeri çok düşüktür. #66-1 serisi VOx ince filmin TCR değerinin -1.68 %/°C olmasından (bkz. Şekil 7.21) ve #66-2 serisi VOx ince filmin de direnç değerinin 40 MΩ olmasından dolayı 6 sccm argon gaz akış oranında büyütülen filmlerin elektriksel özelliklerinin mikrobolometre uygulamaları için uygun olmadığı gözlenmiştir.



Şekil 7.21. 6 sccm argon ve %10 O₂/Ar gaz oranında Si/SiN alttaş üzerine 100 nm büyütülen VOx ince filmin TCR-sıcaklık eğrisi

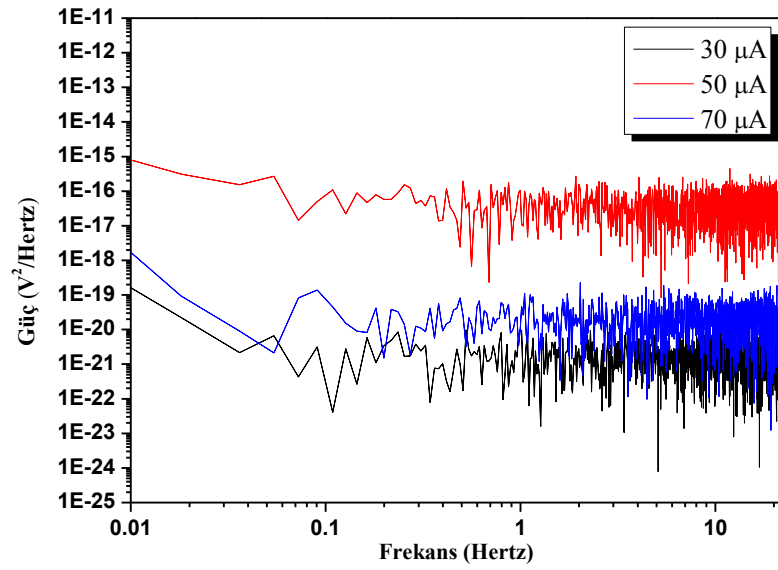
Si/SiN alttaş üzerine 100 nm kalınlıkta 6 sccm argon gaz akış ve % 5, 10 O₂/Ar gaz oranlarında üretilen #66 serisi VOx ince filmlerin GIXRD

ölçümleri yapılmış (bkz. Şekil 7.22), bu parametrelerde üretilen filmlerin de amorf yapıda olduğu gözlenmiştir.



Şekil 7.22. Si/SiN alttaş üzerine 100 nm kalınlıkta 6 sccm argon gaz akış ve 5, 10 % O₂/Ar gaz oranlarında üretilen VO_x ince filmlerin GIXRD kırınım desenleri

Şekil 7.23'te 100 nm kalınlıkta 6 sccm argon akış ve % 5 O₂/Ar oranında Si/SiO₂ alttaş üzerine büyütülen VO_x ince filmin farklı akım değerlerinde elektriksel gürültüsü verilmiştir. 6 sccm argon akış ve % 5 O₂/Ar oranında SiN alttaş üzerine büyütülen VO_x ince filmin elektriksel direncinin yüksek olmasından dolayı bu numunenin elektriksel gürültü ölçümü yapılamamıştır. Si/SiO₂ alttaş üzerine büyütülen 100 nm kalınlıkta VO_x ince filmin elektriksel gürültüsününün 30 µA akım değerinde en az çıktığı görülmektedir.



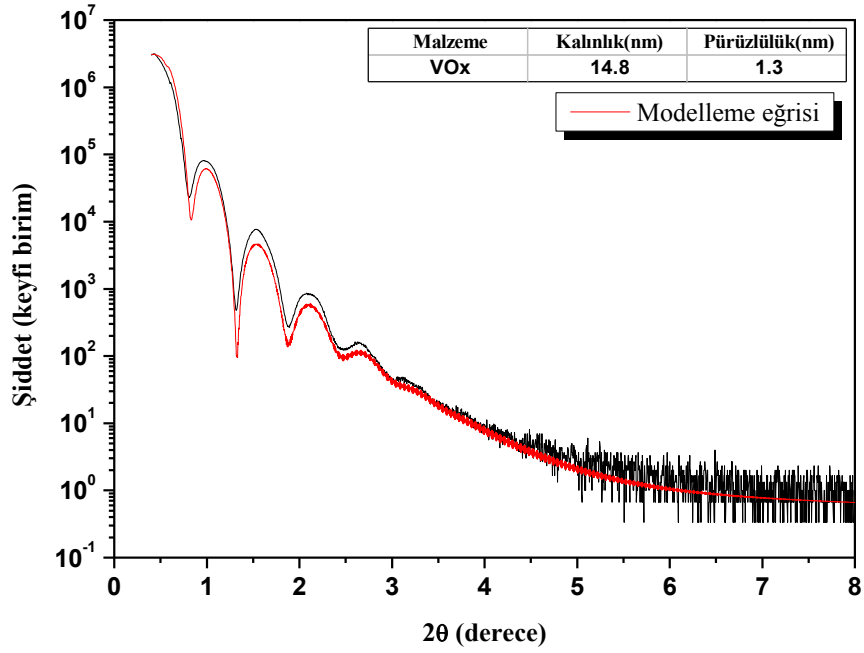
Şekil 7.23. 6 sccm argon ve 5% O₂/Ar gaz akış oranında Si/SiO₂ alttaş üzerine 100 nm kalınlıkta büyütülen VO_x ince filmin 30, 50 ve 70 µA akım değerlerindeki elektriksel gürültüsü

4, 6 argon gaz akış ve değişen oksijen gaz akış oranlarında yapılan üretimler ve bu üretilen filmlerin elektriksel özellikleri dikkate alındığında, 8 sccm argon gaz akış oranında % 10, 15, 20 ve 30 O₂/Ar parametreleri ile üretim yapıldığında filmlerin elektriksel özelliklerinin yalıtkan olacağı tespit edilmiştir. Dolayısıyla 8 sccm argon gaz akış oranında sadece % 5 O₂/Ar oranında üretim yapılmasına karar verilmiştir. Çizelge 7.8’de, SiN alttaş üzerine 20 nm büyütülen VN8 serisinin elektriksel özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 7.8. 8 sccm Ar ve 0,4 sccm O₂ oranında 20 nm üretilen VO_x filmin elektriksel değerleri

Numune İsmi	O ₂ /Ar (%)	Direnç (Ω)	Özdirenç (Ω cm)
#8	5	2.80E+07	42.12

8 sccm argon gaz akış ve % 5 O₂/Ar oranında 20 nm üretilen VO_x ince filmin direnci 28 MΩ civarında çıkmıştır. Aynı argon ve oksijen gaz akış oranlarında yapılacak 100 nm kalınlıkta VO_x ince filmin elektriksel direncinin daha düşük çıkması beklenmektedir. Bunun için 20 nm kalınlıkta üretilen VO_x ince filmin kalınlık ölçümü yapılmıştır ve Şekil 7.24’da verilen XRR modelleme eğrisi ile büyüme hızı tespit edilmiştir.



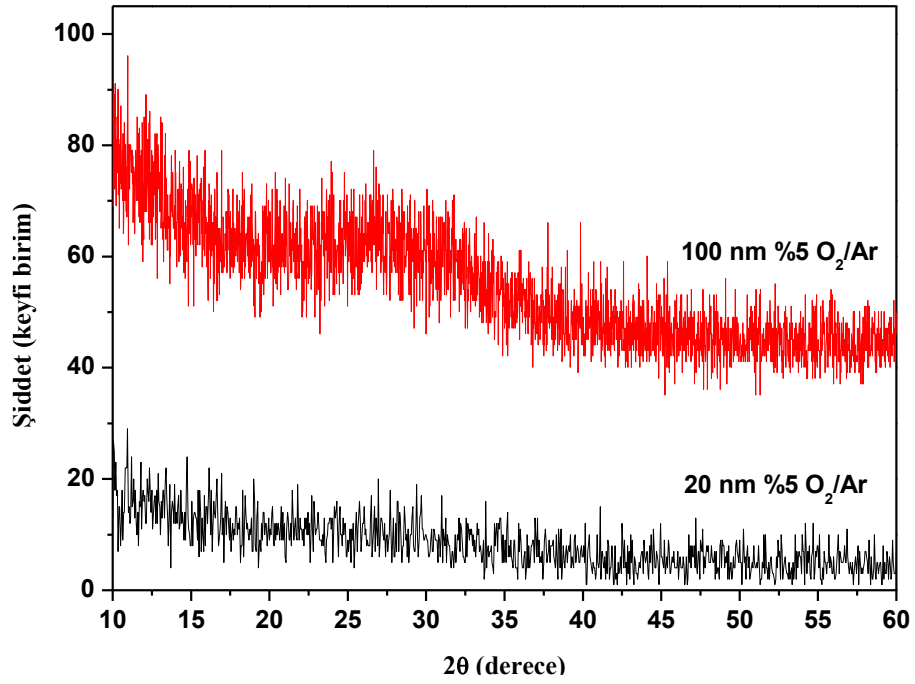
Şekil 7.24. 8/0.4 Ar/O₂ gaz oranlarında 20 nm üretilen VOx ince filmin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri

Şekil 7.19'daki XRR modelleme eğrisi ile büyüme hızı belirlendikten sonra 8 sccm argon ve 0.4 sccm oksijen gaz akış oranlarında 100 nm VOx ince film üretilmiştir. Üretilen filmin elektriksel özellikleri Çizelge 7.9'da verilmiştir.

Çizelge 7.9. 8/0.4 sccm Ar/ O₂ oranında 100 nm üretilen VOx filmlerin elektriksel özellikleri

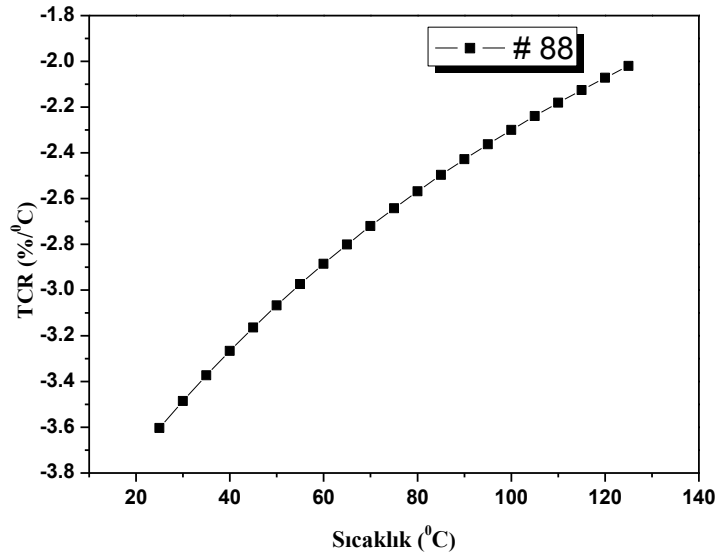
Numune İsmi	O ₂ /Ar	Direnç (Ω)	Özdirenç (Ω cm)
#88	5	1.17E+07	117.11

Si/SiN alttaş üzerine 20 ve 100 nm kalınlıkta 8 sccm argon gaz akış ve 5% O₂/Ar gaz oranında üretilen VOx ince filmlerin GIXRD ölçümleri yapılmış (bkz. Şekil 7.25) ve bu filmlerin de amorf yapıda olduğu gözlenmektedir.



Şekil 7.25. Si/SiN alttaş üzerine 20 ve 100 nm kalınlıkta 8 sccm argon gaz akış ve 5 % O₂/Ar gaz oranında üretilen VO_x ince filmlerin GIXRD kırınım desenleri

Elektriksel direnci 10 MΩ seviyelerinde olan % 5 Ar/O₂ gaz akış oranında 100 nm kalınlıkta üretilen VO_x ince filmin TCR değeri -3.60 %/°C olarak hesaplanmıştır (bkz. Şekil 7.26).



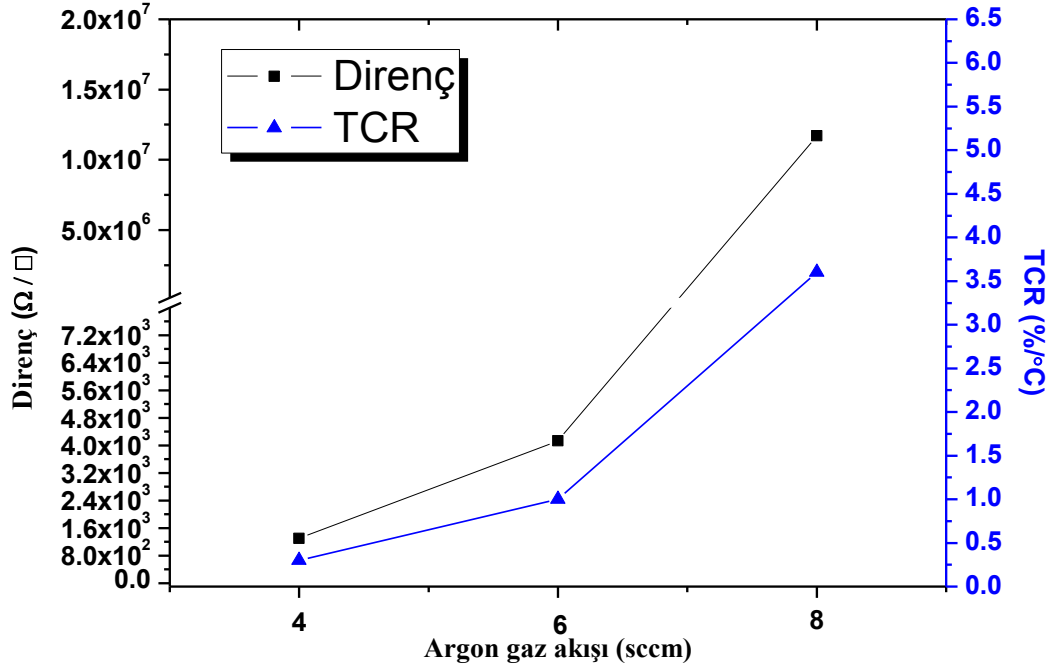
Şekil 7.26. 8 sccm Ar ve %5 O₂/Ar gaz oranında Si/SiN alttaş üzerine 100 nm büyütilen VO_x ince filmin TCR-sıcaklık eğrisi

Genel olarak özetlenirse 4, 6 ve 8 sccm argon gaz akışlarında % 5, 10 15, 20 ve 30 O₂/Ar oranlarında 20 ve 100 nm VO_x ince filmlerin üretimleri ve karakterizasyonları yapılmıştır. 4 sccm argon gaz akış ve % 5, 10, 15, 20 ve 30 O₂/Ar oranlarında üretilen filmlerin elektriksel özellikleri incelenmiştir. 6 sccm argon gaz akış oranında % 5 ve 10 O₂/Ar oranlarında, 8 sccm argon gaz akış oranında ise sadece % 5 O₂/Ar oranında üretilen filmlerin elektriksel özellikleri incelenebilmiştir. Si/SiN alttaş üzerine büyütülen bütün bu VO_x ince filmlerin elektriksel özellikleri Çizelge 7.10'da verilmiştir. Üretilen VO_x ince filmlerin elektriksel direnç değerleri 2 kΩ - 60 MΩ arasındadır ve bu filmlerden 0.30 – 4.50 %/°C arasında TCR değerleri elde edilmiştir. Elektriksel direnç ve TCR değerleri göz önüne alındığında, mikrobolometre sistemleri için en uygun VO_x ince filmlerin 4 sccm argon ve % 10 O₂/Ar oranlarında üretildiği tespit edilmiştir.

Çizelge 7.10. Si/SiN alttaş üzerine 4, 6 ve 8 sccm argon gaz akış ve % 5, 10, 15, 20 ve 30 O₂/Ar oranlarında üretilen VO_x ince filmlerin elektriksel özellikleri

Numune	Alttaş	Ar (sccm)	O ₂ /Ar (%)	Kalınlık (nm)	Direnç (Ω)	Özdirenç (Ω cm)	TCR (%/°C)
#4-1	SiN	4	5	20	5766	0.01	-0.40
#4-2	SiN	4	10	20	1.99E+07	39.85	-4.50
#4-3	SiN	4	15	20	K.A.	K.A.	-
#4-4	SiN	4	20	20	K.A.	K.A.	-
#4-5	SiN	4	30	20	K.A.	K.A.	-
#44-1	SiN	4	5	100	1300	0.01	-0.30
#44-2	SiN	4	10	100	2209160	22.09	-2.75
#44-3	SiN	4	15	100	5.93E+07	593.01	-
#44-4	SiN	4	20	100	K.A.	K.A.	-
#44-5	SiN	4	30	100	K.A.	K.A.	-
#6-1	SiN	6	5	20	69161	0.14	-0.92
#6-2	SiN	6	10	20	K.A.	K.A.	-
#66-1	SiN	6	5	100	4428	0.04	-1.68
#66-2	SiN	6	10	100	8.38E+07	838.49	-1.80
#8-1	SiN	8	5	20	2.80E+07	42.12	-
#88-1	SiN	8	5	100	1.17E+07	117.11	-3.60

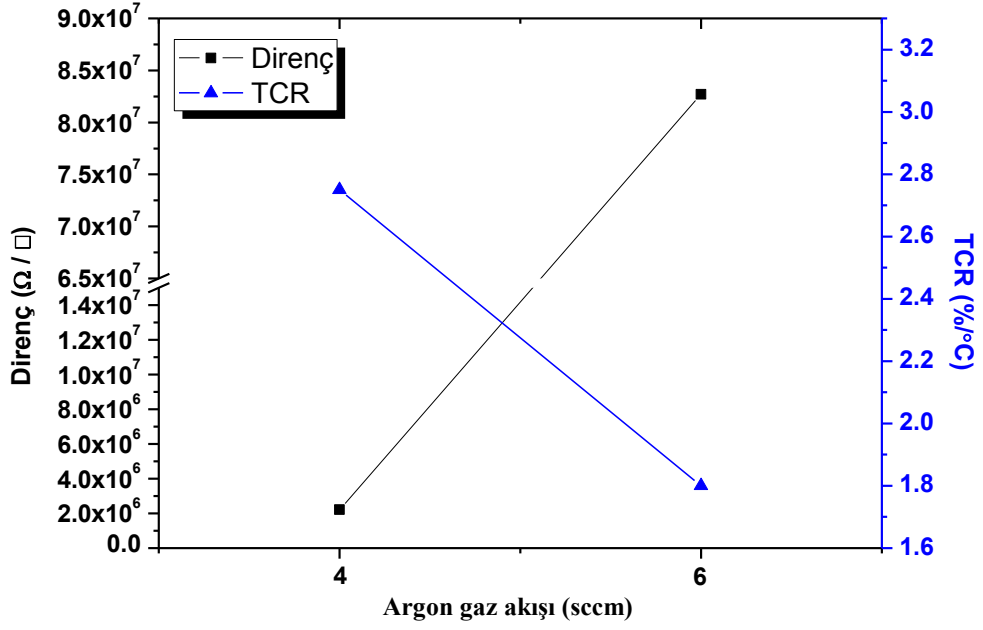
Elde edilen ve Çizelge 7.10'da verilen sonuçlar ışığında 4, 6 ve 8 sccm argon gaz akış ve % 5 O₂/Ar oranlarında üretilen 100 nm VOx ince filmlerin elektriksel direnç ve TCR değerlerinin artan argon gaz akış oranı ile arttığı gözlenmiştir (bkz. Şekil 7.27).



Şekil 7.27. 4, 6 ve 8 sccm argon gaz akış ve % 5 O₂/Ar oranlarında üretilen 100 nm VOx ince filmlerin elektriksel direnç ve TCR değerleri karşılaştırma grafiği

Şekil 7.21'de görüldüğü gibi artan argon gaz akış oranlarında filmlerin elektriksel direnç ve TCR değerlerinin arttığı gözlenmektedir.

4 ve 6 sccm argon gaz akış ve % 10 O₂/Ar oranında üretilen 100 nm VOx ince filmlerin elektriksel direnç ve TCR değerlerinin karşılaştırma grafiği Şekil 7.28'de verilmiştir. #44-2 numunesinin TCR değeri (-2.75 %/°C) uygulamalar için istenilen aralıklardadır. #66-2 numunesinin ise direnç değerinin yüksek ve TCR değerinin düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 7.28. 4 ve 6 sccm argon gaz akış ve % 10 O₂/Ar oranında üretilen 100 nm VO_x ince filmlerin elektriksel direnç ve TCR değerleri karşılaştırma grafiği

4, 6 ve 8 sccm argon gaz akış ve % 5,10 15, 20 ve 30 O₂/Ar oranlarında üretilen tüm VO_x ince filmlerin elektriksel özellikleri incelendiğinde, 4 sccm argon gaz akış ve % 10 O₂/Ar oranında üretilen VO_x ince filmler ile 8 sccm argon gaz akış ve % 5 O₂/Ar oranında üretilen ince filmler dikkat çekmektedir. Mikrobolometre sistemleri için en uygun elektriksel direnç ve TCR değerine sahip numune serisi 4 sccm argon gaz akış, 10 % O₂/Ar oranında üretilen VO_x ince filmlerdir ($R \approx 2 \text{ M}\Omega$, TCR: $-2.75 \text{ \%}/^\circ\text{C}$). 8 sccm argon gaz akış ve % 5 O₂/Ar oranında üretilen VO_x ince filmler de yüksek TCR değeri ($-3.60 \text{ \%}/^\circ\text{C}$) ile dikkat çekmektedir. Ancak bu filmlerin elektriksel direnç değerleri oldukça yüksektir.

TCR değerleri yüksek çıkan 4 sccm argon gaz akış ve % 10 O₂/Ar oranında üretilen VO_x ince filmler ile 8 sccm argon gaz akış ve % 5 O₂/Ar oranında üretilen filmlerin elektriksel direnç değerlerinin düşürülmesi için farklı O₂/Ar oranlarında yeni VO_x ince filmlerin üretilmesine karar verilmiştir. Elektriksel direnç değerlerinin düşürülmesi için 4 sccm argon gaz akış ve % 5-10 arası O₂/Ar oranı ile 8 sccm argon gaz akış ve % 2,5-5 O₂/Ar oranlarında 20 nm VO_x ince filmlerin üretimleri yapılmıştır.

7.2. VOx İnce Filmlerin Üretimindeki Oksijen Gaz Akış Oranı Optimizasyonu

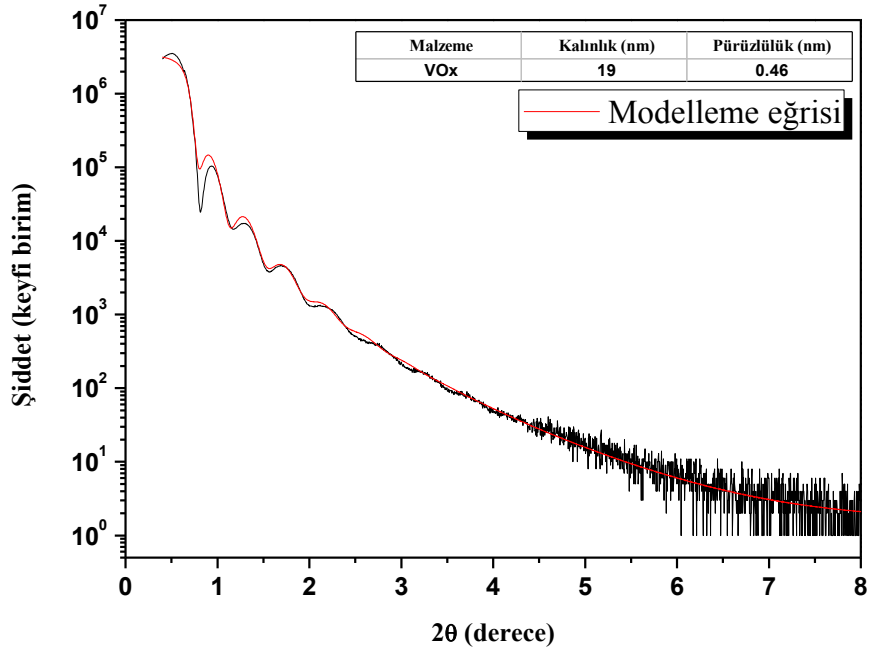
VOx ince filmlerin elektriksel direnç ve TCR değerlerinin optimizasyonu için üretilen VOx ince filmlerin elektriksel özellikleri incelendiğinde, VOx ince filmlerin üretimindeki argon gaz akış oranı 4 ve 8 sccm olarak belirlenmiştir. Üretim sürecindeki oksijen oranının tespiti için, 4 sccm Ar gaz akış ve % 5.5, 6.5, 7.5, 8.5 ve 9.5 O₂/Ar gaz oranları ile 8 sccm Ar gaz akış ve % 2.75, 3.25, 3.75, 4.25 ve 4.75 O₂/Ar gaz oranlarında VOx ince filmler üretilmiştir. Üretilen filmlerin elektriksel özellikleri incelendikten sonra istenilen elektriksel özellikleri veren VOx ince filmlerin üretimi için argon ve oksijen gaz akış oranlarının detaylı optimizasyonunun yapılmasına karar verilmiştir.

4 sccm argon gaz akış ve % 5-10 arası O₂/Ar oranlarında 20 nm VOx ince filmlerin üretimleri yapılmıştır (bkz. Çizelge 7.11).

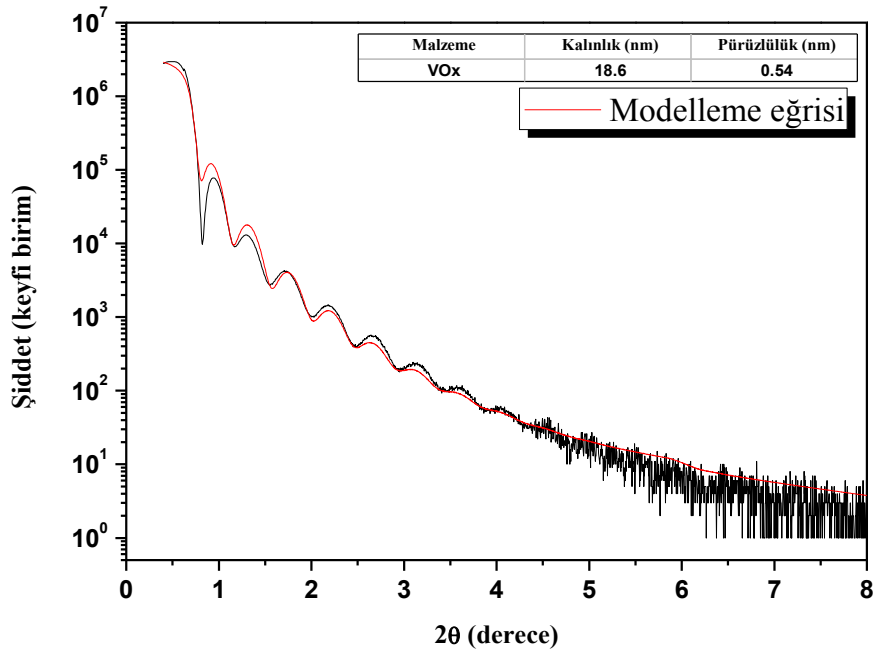
Çizelge 7.11. 4 sccm argon gaz akış ve % 5-10 arası O₂/Ar oranlarında üretilen VOx ince filmlerin üretim parametreleri

Numune İsmi	O ₂ /Ar (%)	O ₂ (sccm)	Ar (sccm)
#42-1	5.5	0.22	4
#42-2	6.5	0.26	4
#42-3	7.5	0.3	4
#42-4	8.5	0.34	4
#42-5	9.5	0.38	4

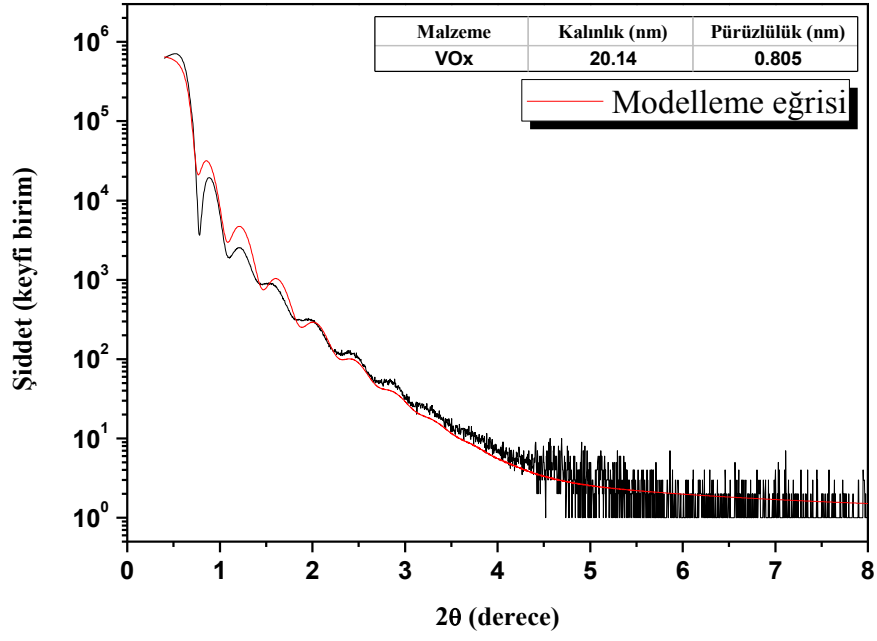
4 sccm argon gaz akış ve % 5-10 arası O₂/Ar gaz oranlarında Si/SiO₂ alttaş üzerine büyütülen 20 nm VOx ince filmlerin kalınlıkları, yüzey ve ara yüzey pürüzlülükleri XRR ölçümlerinin modellemeleri ile belirlenmiştir (bkz. Şekil 7.29-33).



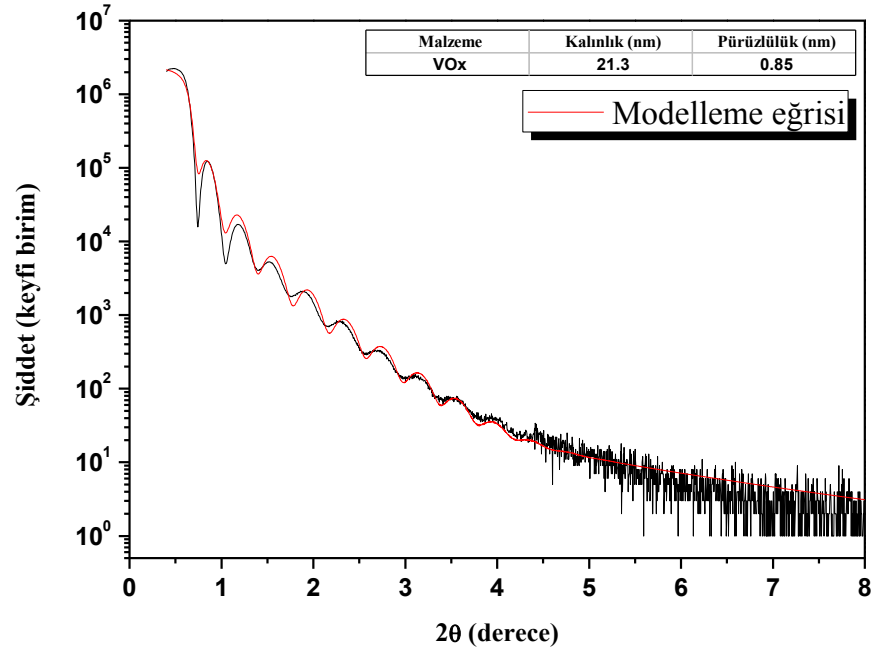
Şekil 7.29. 4/0.22 Ar/O₂ gaz oranlarında 20nm üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri



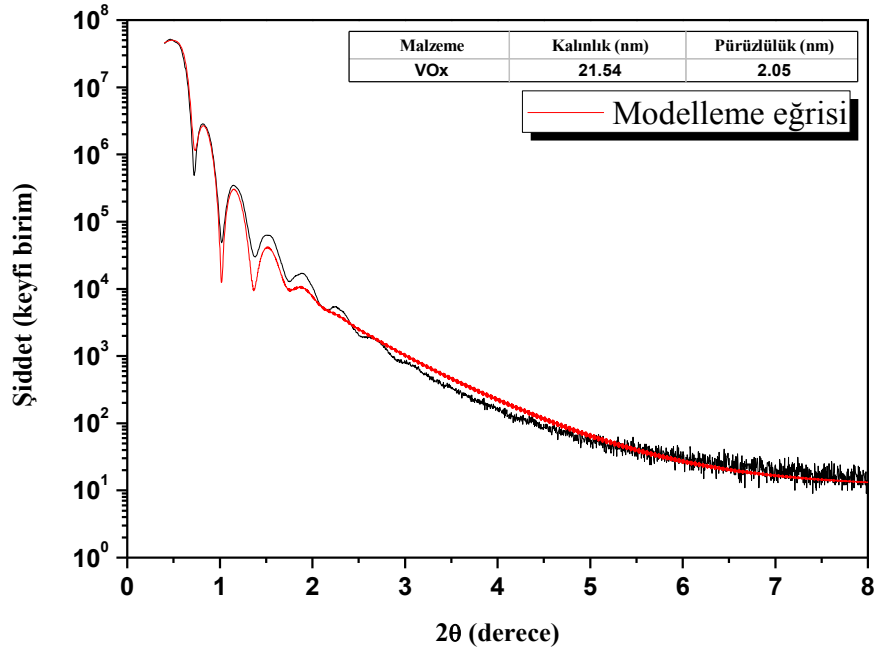
Şekil 7.30. 4/0.26 Ar/O₂ gaz oranlarında 20nm üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri



Şekil 7.31. 4/0.30 Ar/O₂ gaz oranlarında 20nm üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri



Şekil 7.32. 4/0.34 Ar/O₂ gaz oranlarında 20nm üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri



Şekil 7.33. 4/0.38 Ar/O₂ gaz oranlarında 20nm üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri

Yapılan XRR ölçümleri sonuçlarına yapılan modellemeler ile üretilen filmlerin kalınlıkları tespit edilmiştir. Üretilen VOx ince filmlerin kalınlıklarının ve yüzey/ara yüzey pürüzlülüklerinin artan O₂/Ar oranı ile arttığı gözlemlenmiştir (bkz. Çizelge 7.12).

Çizelge 7.12. 4 sccm argon gaz akış ve % 5-10 arası O₂/Ar oranlarında üretilen VOx ince filmlerin kalınlık değerleri

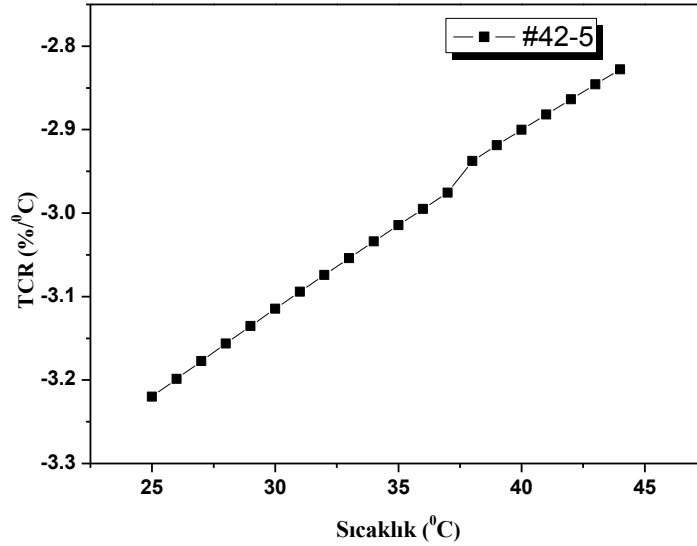
Numune İsmi	O ₂ /Ar (%)	Kalınlık (nm)
#42-1	5.5	19.0
#42-2	6.5	18.6
#42-3	7.5	20.1
#42-4	8.5	21.3
#42-5	9.5	21.5

4 sccm argon gaz akış ve % 5-10 arası O₂/Ar oranlarında SiN alttaş üzerine 20 nm büyütülen VOx ince filmlerin elektriksel özellikleri ölçülmüştür ve Çizelge 7.13'te verilmiştir.

Çizelge 7.13. 4 sccm argon gaz akış ve % 5-10 arası O₂/Ar oranlarında SiN alttaş üzerine 20 nm büyütülen VOx ince filmlerin elektriksel özellikleri

Numune İsmi	Direnç (Ω)	Özdirenç (Ω cm)	Ar/O ₂ (sccm)
#42-1	2501.41	0.005	4/0.22
#42-2	3660.562	0.007	4/0.26
#42-3	12103.54	0.024	4/0.30
#42-4	26361.70	0.058	4/0.34
#42-5	51455.62	0.103	4/0.38

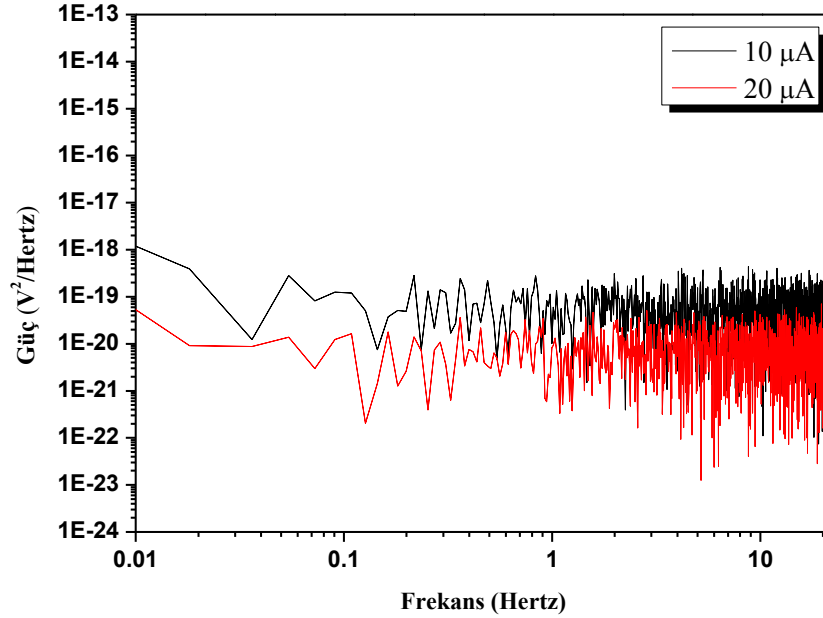
O₂/Ar oranı değiştirilerek yapılan bu üretimlerde beklenildiği gibi elektriksel direnç değerlerin düştüğü ve 50 kΩ seviyesinin altında olduğu görülmektedir. #42-5 numunesinin direnç değeri göz önüne alındığında, TCR değerinin de yüksek çıkması beklenmektedir.



Şekil 7.34. 4 sccm Ar ve 0.38 sccm O₂ gaz akış oranında Si/SiN alttaş üzerine 20 nm büyütülen VOx ince filmin TCR-sıcaklık eğrisi

Şekil 7.34'te görüldüğü gibi #42-5 serisi VOx ince filmin TCR değeri -3.22 %/°C olarak hesaplanmıştır. 4 sccm argon gaz akış ve 0.38 sccm oksijen gaz akış oranında üretilen VOx ince filmin elektriksel direnç ve TCR değerleri istenilen aralıklarda çıkmıştır.

Şekil 7.35'te 20 nm kalınlıkta 4 sccm argon akış ve 0.38/4 sccm O₂/Ar oranında Si/SiN alıtış üzerine büyütölen #42-5 serisi VOx ince filmin 0-25 Hz bant aralığındaki 10 ve 20 µA değerlerindeki elektrıksel güröltüsü verilmiştir.



Şekil 7.35. 4 sccm argon ve % 9,5 O₂/Ar gaz akış oranında SiN alıtış üzerine 20 nm kalınlıkta büyütölen VOx ince filmin 10 ve 20 µA akım değerlerindeki elektrıksel güröltüsü

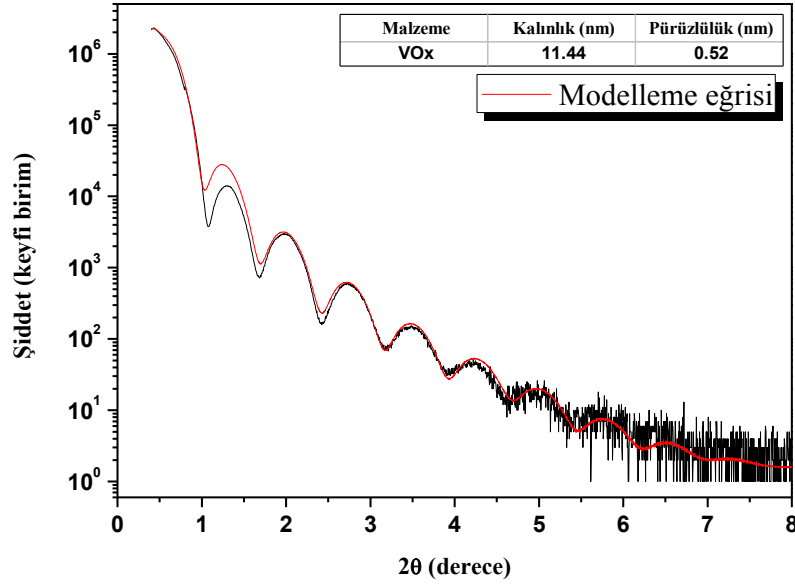
4 sccm argon ve 0.38 sccm oksijen gaz akış oranlarında üretilen filmlerin elektrıksel özellikleri incelendiğinde mikrobolometre sistemleri için istenilen aralıklarda oldukları görölmektedir ($R < 50 \text{ k}\Omega$, $\rho < 10 \text{ }\Omega\text{cm}$, $\text{TCR} < -2.5 \text{ \%}/^\circ\text{C}$). VOx ince filmlerin üretim sürecindeki argon gaz akış oranının tespiti için yapılan üretimlerde argon gaz akış oranı 4 ve 8 sccm olarak tespit edilmiştir. 4 sccm argon gaz akış oranında oksijen oranının tespiti için yapılan üretimlerde ise oksijen gaz akış oranı 0.38 sccm olarak tespit edilmiştir.

VOx ince filmlerin üretimindeki oksijen gaz akış oranının tespiti için 8 sccm argon gaz akış ve % 2.5-5 arası O₂/Ar oranlarında 20 nm VOx ince filmlerin üretimleri yapılmıştır (bkz. Çizelge 7.14).

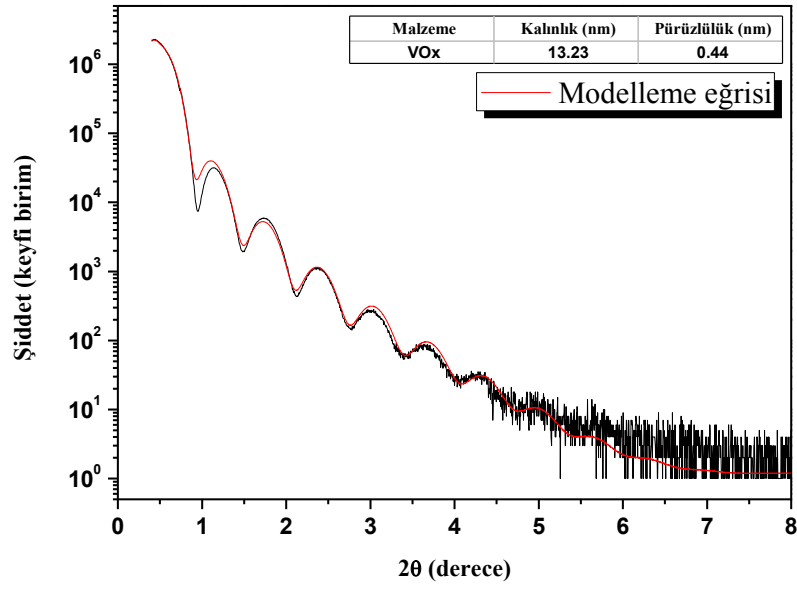
Çizelge 7.14. 8 sccm argon gaz akış ve 2.5-5 % O₂/Ar oranlarında üretilen 20 nm VO_x ince filmlerin üretimlerinin listesi.

Numune İsmi	O ₂ /Ar	O ₂ (sccm)	Ar (sccm)
#82-1	2.75	0.22	8
#82-2	3.25	0.26	8
#82-3	3.75	0.3	8
#82-4	4.25	0.34	8
#82-5	4.75	0.38	8

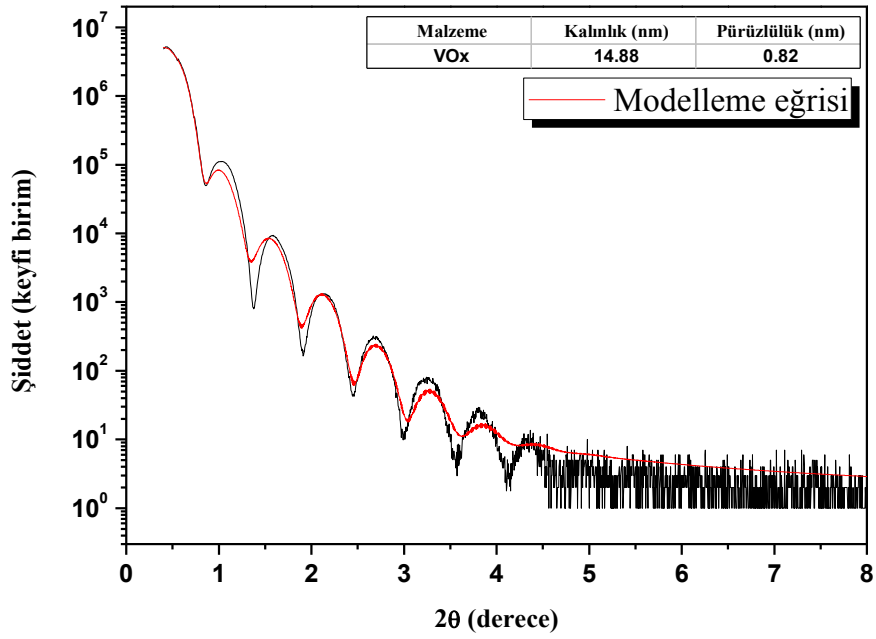
8 sccm argon gaz akış ve farklı oksijen oranlarında Si/SiO₂ alttaş üzerine büyütülen 20 nm VO_x ince filmlerin kalınlıkları, yüzey ve ara yüzey pürüzlülükleri XRR ölçümlerinin modellemeleri ile belirlenmiştir (bkz. Şekil 7.36-7.40).



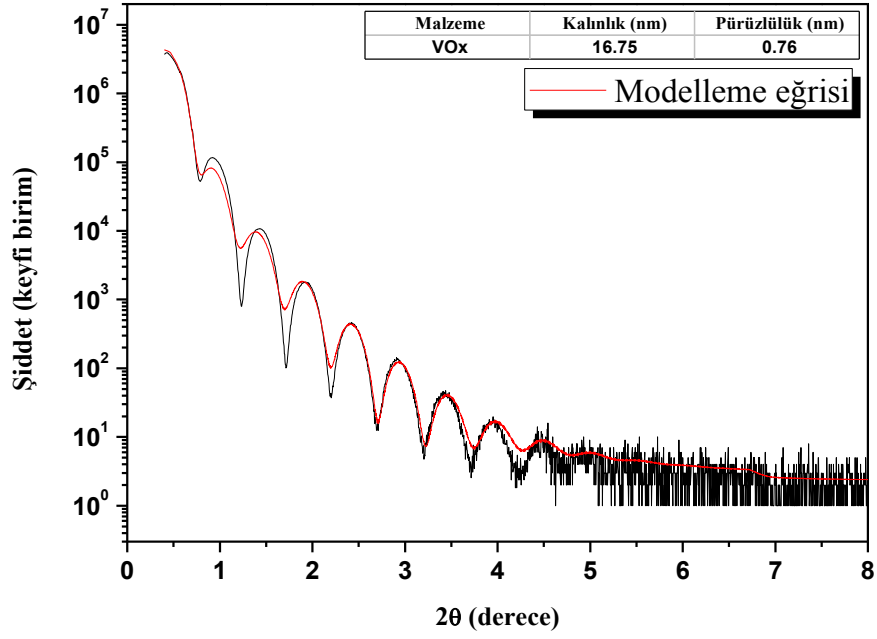
Şekil 7.36. 8/0.22 sccm Ar/O₂ gaz oranlarında 20nm üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri



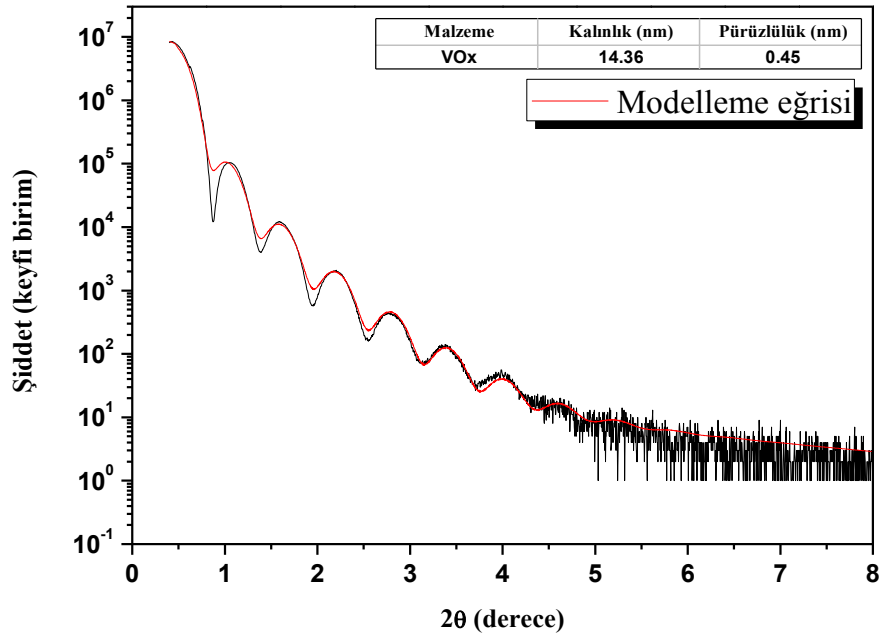
Şekil 7.37. 8/0.26 sccm Ar/O₂ gaz oranlarında 20nm üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri



Şekil 7.38. 8/0.30 sccm Ar/O₂ gaz oranlarında 20nm üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri



Şekil 7.39. 8/0.34 sccm Ar/O₂ gaz oranlarında 20nm üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri



Şekil 7.40. 8/0.38 sccm Ar/O₂ gaz oranlarında 20nm üretilen numunenin XRR modelleme ve ölçüm eğrileri

Yapılan XRR ölçümleri ve modellemeleri ile üretilen filmlerin kalınlıkları tespit edilmiştir (bkz. Çizelge 7.15).

Çizelge 7.15. 8 sccm argon gaz akış ve % 2.5-5 O₂/Ar oranlarında üretilen 20 nm VO_x ince filmlerin kalınlık değerleri

Numune İsmi	O ₂ /Ar	Kalınlık (nm)
#82-1	2.75	11.44
#82-2	3.25	13.23
#82-3	3.75	14.88
#82-4	4.25	16.75
#82-5	4.75	14.36

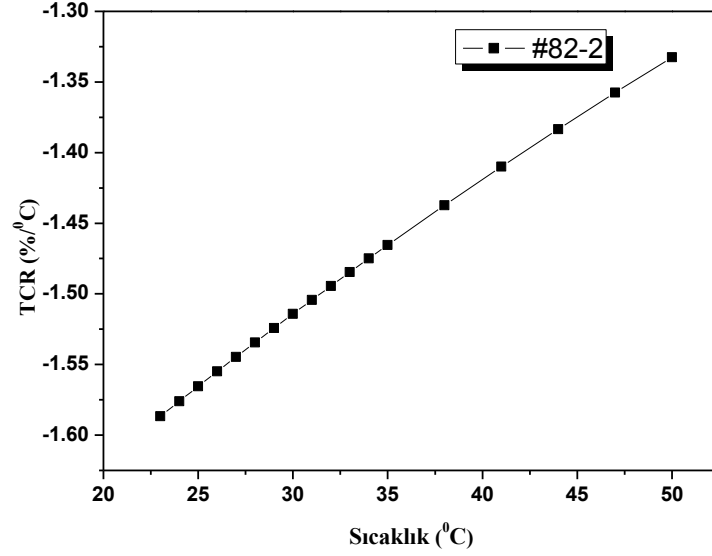
7.15'te görüldüğü gibi filmlerin kalınlıklarının artan O₂/Ar oranı ile arttığı tespit edilmiştir.

8 sccm argon ve % 2.5-5 arası O₂/Ar gaz oranlarında üretilen VO_x ince filmlerin elektriksel özellikleri FPP tekniği ile incelenmiştir ve Çizelge 7.16'da verilmiştir.

Çizelge 7.16. 8 sccm argon gaz akış ve % 2.5-5 O₂/Ar oranlarında üretilen 20 nm VO_x ince filmlerin elektriksel özellikleri

Numune İsmi	Direnç (Ω)	Özdirenç (Ω cm)	Ar/O ₂ (sccm)
#82-1	23547.96	0.047	8/0.22
#82-2	111907.8	0.244	8/0.26
#82-3	3.22E+07	64.54	8/0.30
#82-4	N.C.	N.C.	8/0.34
#82-5	1290255	2.58	8/0.38

8 sccm argon gaz akış ve % 2.5-5 O₂/Ar oranlarında üretilen VO_x ince filmlerin 7.16'da verilen elektriksel özellikleri incelendiğinde, #82-2 numunesinin elektriksel direnç değerlerinin istenilen aralığında olduğu görülmektedir. Bu numunenin TCR ölçümü yapılmıştır (bkz. 7.41).



Şekil 7.41. 8 sccm Ar ve 0.26 sccm O₂ gaz akış oranında Si/SiN alttaş üzerine 20 nm büyütülen VOx ince filmin TCR-sıcaklık eğrisi

Şekil 7.41’de verilen TCR ölçüm grafiğinde #82-2 numunesinin TCR değeri -1.58 %/°C olarak hesaplanmıştır.

VOx ince filmlerin üretim süreçleri için 4, 8 sccm argon gaz akış oranı tespit edilmişti. Oksijen oranının tespiti için yapılan VOx ince filmlerin elektriksel özellikleri incelendiğinde 4 sccm argon ve 0.38 sccm oksijen gaz akış oranlarında üretilen filmlerin elektriksel direnç ve TCR değerlerinin istenilen aralıkta oldukları gözlenmiştir. Direnç ve TCR değerindeki değişimlerin ve üretim tekrarlanabilirliğinin kontrol edilmesi için O₂/Ar daha hassas bir oranda değiştirilerek 0.37, 0.38, 0.39 oksijen gaz akış oranlarında 20 nm VOx ince filmlerin üretimlerinin yapılmasına karar verilmiştir (bkz. Çizelge 7.17).

Çizelge 7.17. 4 sccm Ar ve % 9,25-9,75 arası O₂/Ar oranlarında 20 nm üretilen VOx ince filmlerin O₂/Ar gaz akış parametreleri

Numune ismi	O ₂ /Ar	O ₂ (sccm)	Ar (sccm)
#43-1	9.25	0.37	4
#43-2	9.50	0.38	4
#43-3	9.75	0.39	4

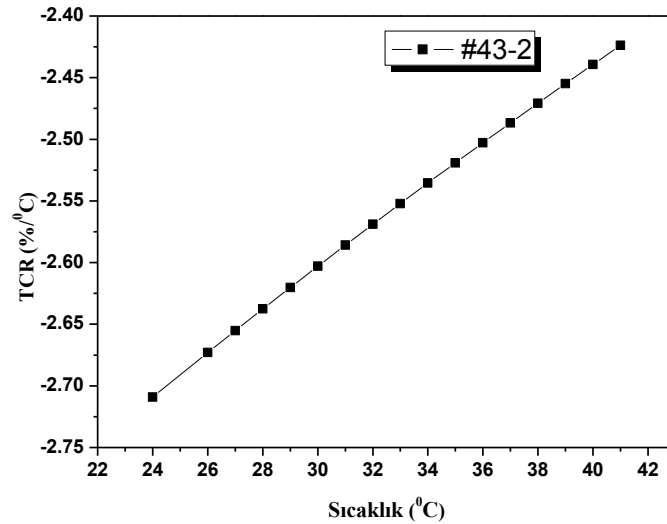
0.37-0.38 ve 0.39 O₂/Ar gaz akış oranlarında yapılan 20 nm VO_x ince filmlerin elektriksel özellikleri FPP tekniği ile incelenmiştir (bkz. Çizelge 7.18).

Çizelge 7.18. 4 sccm Ar ve % 9,25-9,75 arası O₂/Ar oranlarında 20 nm üretilen VO_x ince filmlerin elektriksel özellikleri

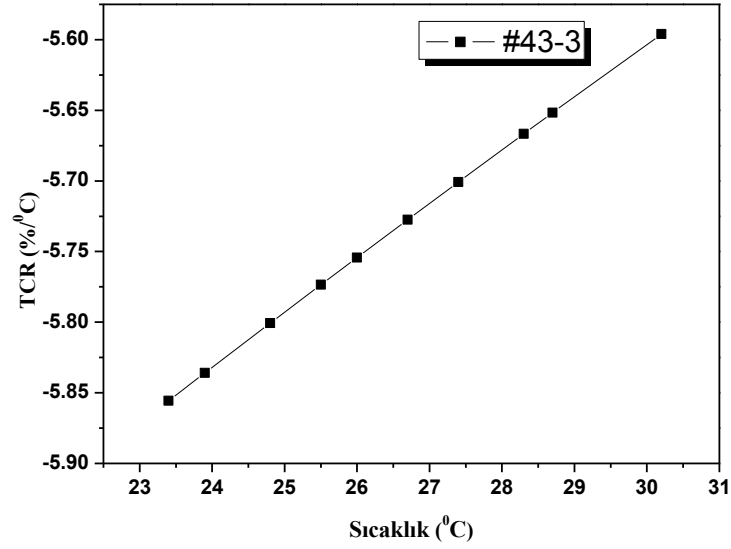
Numune ismi	Direnç (Ω)	Özdirenç(Ω cm)	Ar/O ₂ (sccm)
#43-1	25008.3	0.05	4/0.37
#43-2	75616.2	0.15	4/0.38
#43-3	431650.5	0.86	4/0.39

7.18’de elektriksel özellikleri verilen VO_x ince filmlerin artan oksijen gaz akış oranlarında elektriksel dirençlerinde artış olduğu gözlenmiştir. Filmlerin elektriksel dirençleri dikkate alındığında, #43-2 ve #43-3 numaralı VO_x ince filmlerin TCR ölçümleri yapılmıştır (bkz. Şekil 7.42 ve 7.43). #43-1 numaralı VO_x ince filmin elektriksel direnç ve özdirenç değerinin çok düşük olmasından dolayı, TCR değerinin de düşük çıkması beklenmektedir. Bu nedenle #43-1 numaralı VO_x ince filmin TCR ölçümü yapılmamıştır.

Yapılan TCR ölçümlerinde #43-2 numaralı VO_x ince filmin TCR değeri -2.70 %/°C, #43-3 numaralı VO_x ince filmin TCR değeri ise -5.85 %/°C olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.42. 4 sccm argon ve 0.38 sccm O₂ gaz akış oranında Si/SiN alttaş üzerine 20 nm üretilen VO_x ince filmin TCR-sıcaklık eğrisi



Şekil 7.43. 4 sccm argon ve 0.39 sccm O₂ gaz akış oranında Si/SiN alttaş üzerine 20 nm üretilen VO_x ince filmin TCR-sıcaklık eğrisi

Yapılan TCR ölçümlerinin sonuçları ve üretilen VO_x ince filmlerin elektriksel dirençleri göz önüne alındığında, 4 sccm argon gaz akış oranı ile 0.38 ve 0.39 oksijen gaz akış oranında VO_x ince filmlerin 100 nm üretimine karar verilmiştir. Üretilen 100 nm VO_x ince filmlerin elektriksel özellikleri incelenmiştir (Çizelge 7.19).

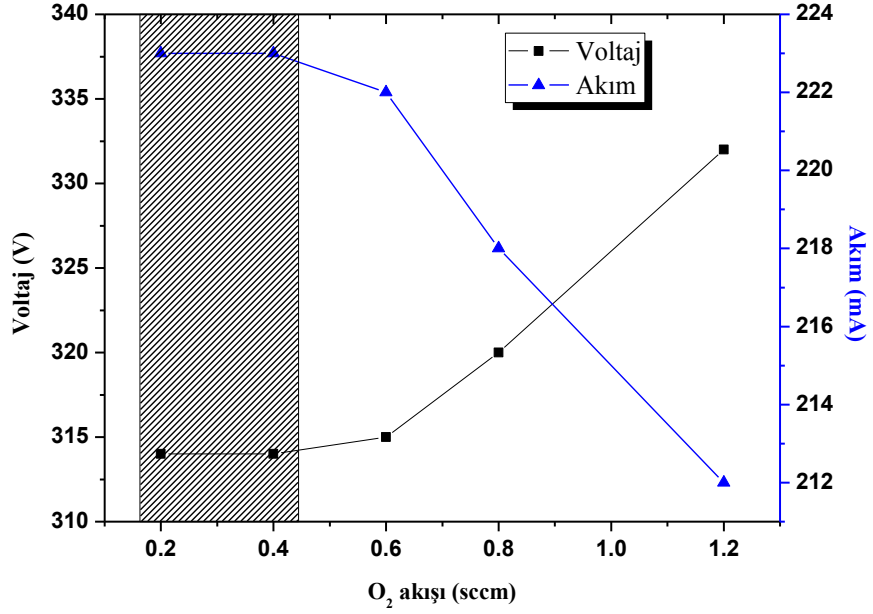
Çizelge 7.19. 4 sccm Ar ve 0.38-0.39 sccm O₂ oranlarında SiN alttaş üzerine 100 nm üretilen VO_x ince filmlerin elektriksel özellikleri

Numune ismi	Direnç (Ω)	Özdirenç(Ω cm)	Ar/O ₂ (sccm)
#43-11	8486.6	0.084	4/0.38
#43-22	7669.3	0.076	4/0.39

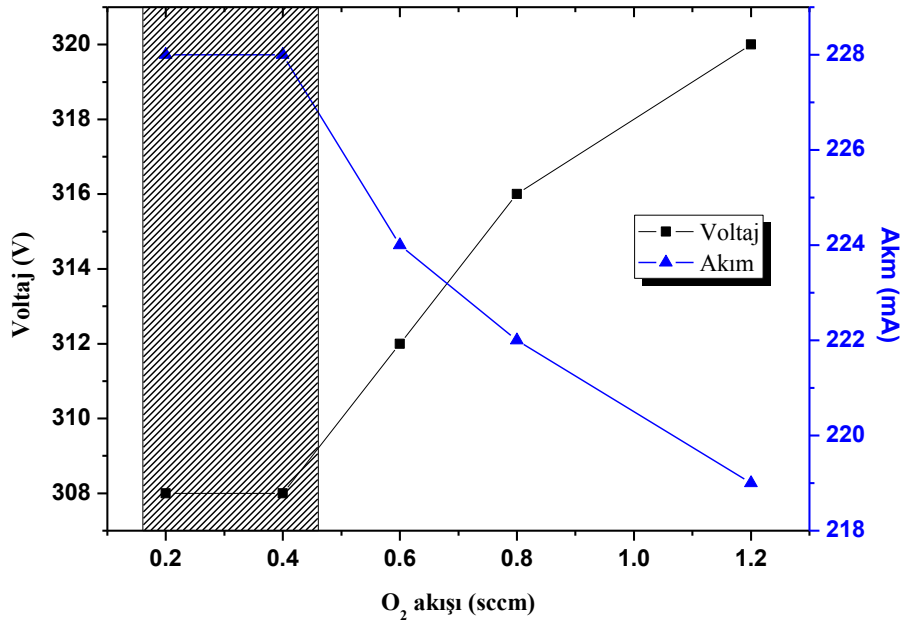
7.19’da 100 nm kalınlıkta üretilen VO_x ince filmlerin elektriksel özellikleri verilmiştir. Elektriksel direnç değerleri çok düşük seviyelerde olan bu VO_x ince filmler, elektriksel olarak metalik davranış göstermektedir.

Yapılan tüm VO_x ince film üretimleri incelendiğinde, 20 nm kalınlıkta VO_x ince filmlerin reaktif üretim süreçlerinin tekrarlanabilir olduğu tespit edilmiştir. Bu durum 100 nm kalınlıkta üretilen filmler için olmamaktadır. 100 nm kalınlıkta üretilen VO_x ince filmlerin elektriksel direnç değerleri 10 kΩ seviyesinin altındadır. Bu durumun hangi sebepten kaynaklandığını anlamak için 20 nm

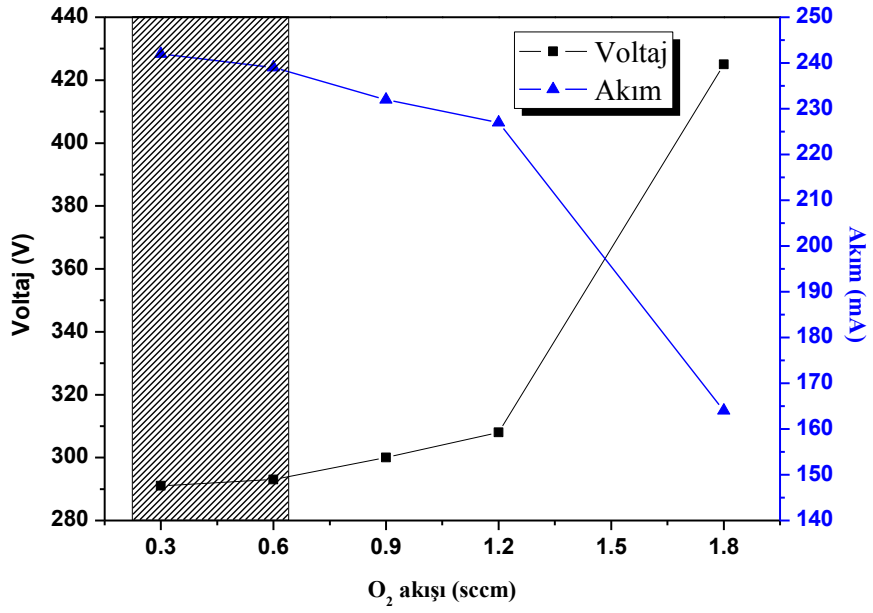
kalınlıktaki #4, #6 ve #42 ile 100 nm kalınlıktaki #44 serisi VOx ince filmlerin üretim süreçlerindeki akım-voltaj değerleri incelenmiştir (bkz. Şekil 7.44 – 7.47).



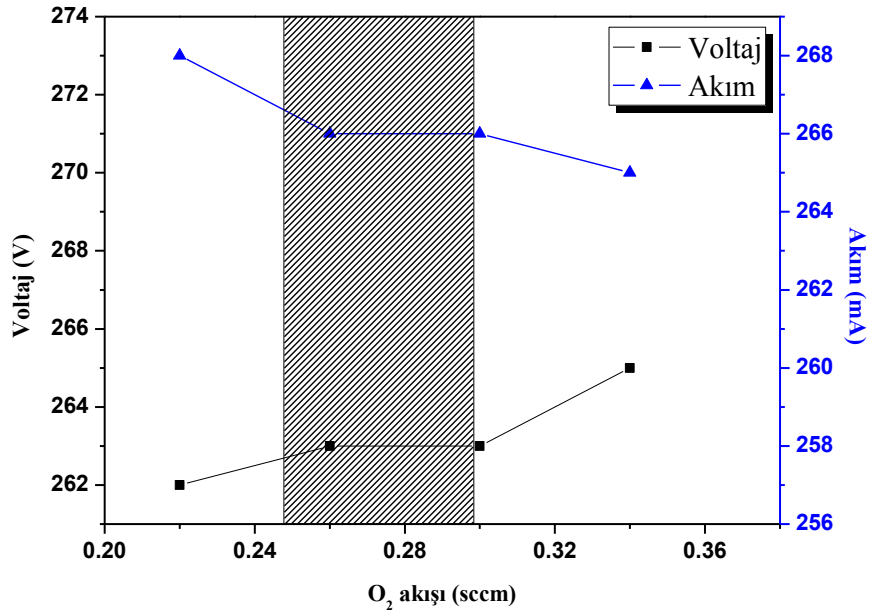
Şekil 7.44. #4 serisi 20 nm VOx ince filmlerin üretimlerindeki akım-voltaj değerlerinin grafiği



Şekil 7.45. #44 serisi 100 nm VOx ince filmlerin üretimlerindeki akım-voltaj değerlerinin grafiği



Şekil 7.46. #6 serisi 20 nm VOx ince filmlerin üretimlerindeki akım-voltaj değerlerinin grafiği



Şekil 7.47. #42 serisi 20 nm VOx ince filmlerin üretimlerindeki akım-voltaj değerlerinin grafiği

Şekil 7.44-7.47'de gösterilen üretim süreçlerindeki voltaj ve akım değerlerinin değişen oksijen gaz akış oranları ile değiştikleri görülmektedir. Üretilen filmlerin elektriksel dirençleri ve TCR ölçümleri sırasındaki okunan voltaj değerlerindeki dalgalanmaların, üretim süreçlerindeki akım-voltaj değerleri ile

ilişki içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Şekillerde gösterilen taralı alanlarda, farklı oksijen gaz akış oranlarındaki üretimlerin akım-voltaj değerlerinin sabit olduğu görülmektedir. Bu taralı alanlardaki üretilen VOx ince filmlerin elektriksel direnç değerlerinin düşük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca TCR ölçümleri sırasında okunan voltaj değerindeki dalgalanmaların en az seviyede olduğu tespit edilmiştir.

Şekillerdeki voltaj ve akım değerlerindeki değişimin ise hedef malzemenin yüzeyinin zamanla oksitlenmesinden (zehirlenmesinden) ve kaynak malzemesinin ısınmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Hedef malzemenin zehirlendiği durumlarda, uygulanan gerilimin arttığı görülmektedir. Reaktif süreçlerde karşılaşılan bu durumda, hedef malzemenin yüzeyi reaktif gaz ile reaksiyona girerek oksitlenmekte ve üretim sürecini etkilemektedir. Kaliteli bir film biriktirme sürecinde, üretim sırasında akım ve gerilimdeki değişimlerin en az seviyede olması gerekmektedir. Hedef malzemesinin yüzeyinin oksitlendiği durumlarda plazmada sönmeler ile akım-voltaj değerlerinde aşırı değişimler olabilmektedir.

100 nm kalınlıktaki farklı oksijen gaz akış oranlarında büyütülen #43 serisi VOx ince filmlerin elektriksel direnç değerlerinin çok düşük çıktığı gözlenmiştir (bkz. 7.19) ve bu durumun hedef malzemenin zehirlenmesinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Vakum odasının ve içerisindeki tüm parçaların temizliğinden sonra hedef malzemenin yüzeyindeki oksit tabakası argon iyonları ile dövülerek kaldırılmıştır. Vakum sistemi kondisyona geldikten sonra 4 sccm argon ve 0.38 sccm O₂ gaz akış oranında 100 nm #43-33 serisi VOx ince film üretilmiştir. Üretilen VOx ince filmin elektriksel özellikleri FPP tekniği ile ölçülmüştür ve bu ince filmin de elektriksel direnç değerleri #43-11 ve #43-22 serisi VOx ince filmler gibi 10 kΩ seviyelerindedir (bkz. Çizelge 7.20).

Çizelge 7.20. 4 sccm Ar ve 0.38 sccm O₂ oranlarında SiN alttaş üzerine 100 nm büyütülen VOx ince filmin elektriksel özellikleri.

Numune ismi	Direnç (Ω)	Özdirenç(Ω cm)	Ar/O ₂ (sccm)
#43-33	12847,68	0,128	4/0.38

100 nm kalınlıkta VOx ince filmlerin üretimleri uzun süren reaktif süreçlerdir. Bu süreç sırasında vakum odasındaki gaz oranlarının değişimi bilinmemektedir. Yeni üretilecek 100 nm kalınlıkta VOx ince filmlerin adım adım

üretimlerine karar verilmiştir. Bu sayede sıçratma işlemindeki reaktif sürecin hangi zaman aralığında kararlı olduğunu, adım adım üretilen filmlerin dirençlerinin nasıl değişeceği incelenmiştir. Vakum odasının temizliği ve fırınlanması sürecinin ardından adım adım üretilecek ilk seri 100 nm kalınlıkta VO_x ince filmler, 20 nm kalınlıklarla beş adımda (5x20 nm) üretilmiştir. Daha sonra 33 nm kalınlıklarla üçer adım (3x33 nm) ve 50 nm kalınlıklarla ikişer adımda (2x50 nm) iki seri daha VO_x ince film üretim süreci yapılmıştır ve elektriksel özellikleri FPP tekniği ile ölçülmüştür (bkz. Çizelge 7.21).

Çizelge 7.21. 4/0.38 Ar/O₂ gaz oranlarında 100 nm kalınlıkta adım adım üretilen VO_x ince filmlerin elektriksel özellikleri

Numune ismi	Direnç (Ω)	Özdirenç (Ω cm)	Ar/O ₂ (sccm)	Adım sayısı x Kalınlık (nm)
#43-44	4905.5	0.05	4/0.38	2x50
#43-55	5364.1	0.05	4/0.38	3x33
#43-66	13379.8	0.13	4/0.38	5x20

Üretim süreçleri belirli adımlara bölünerek üretilen #43-44, #43-55 ve #43-66 serisi VO_x ince filmlerin elektriksel direnç değerleri 7.21’de de görüldüğü gibi 10 kΩ seviyelerinin altındadır. Üretim öncesi vakum odasının ve hedef malzemenin yüzeyinin temizlenmesi için temizlik üretimlerinin yapılmasına rağmen üretilen VO_x ince filmler metalik özellik göstermektedir.

Üretilen tüm vanadyum oksit ince filmlerin elektriksel özellikleri ve üretim parametreleri incelendiğinde, 100 nm kalınlıkta ve 4/0.38 sccm Ar/O₂ gaz akış oranlarında üretilen tüm VO_x ince filmlerin elektriksel olarak metalik davranış göstermesinin sebebi, sıçratma sürecinde sistemden kaynaklanan bir sorun olduğuna karar verilmiştir. Reaktif süreçlerde vakum odasındaki her parça film kaplanacağından dolayı vakum odasına oksijen veren gaz borusunun film kaplanarak tıkanıp düşünülmemektedir. Ayrıca sisteme giren tüm gazları kontrol eden gaz kontrol ünitesinin hassasiyetini kaybettiği ve oksijenin kontrolünü yapamadığı da tıkanabileceği düşünülmektedir. Filmlerin yapısına oksijenin katılmamasının bir diğer sebebi olarak kullanılan güç kaynağının topraklamasından kaynaklanan donanımsal bir sorun da gösterilebilir.

VOx ince filmlerin değişen oksijen oranlarında sürekli metalik çıkmasından dolayı üretimlerin sistemin diğer üretim odasında yapılmasına karar verildi. Hacim olarak daha büyük olan bu çemberde 4 sccm argon gaz akış oranlarında büyütülen filmler yalıtkan çıkmıştır. FPP sistemi ile filmlerinden kontak alınamamış ve elektriksel karakterizasyonları yapılamamıştır.

4, 6 ve 8 sccm argon gaz akış oranlarında yapılan üretimlerin elektriksel özellikleri incelendiğinde, artan gaz akış oranı ile filmlerin direncinin arttığı ve en 4 sccm argon gaz akış oranında yapılan üretimlerin en düşük elektriksel dirence sahip oldukları görülmüştü. Ancak hacimce daha büyük olan diğer üretim odasında, VOx ince filmler 4 sccm argon gaz akış oranında üretildiğinde elektriksel olarak yalıtkan çıkmaktadır. Elektriksel direncin çok yüksek olmasından dolayı üretim sürecindeki argon gaz akış oranını düşürerek VOx ince filmlerin de elektriksel direncinin düşürülmesi hedeflenmiştir. VOx ince filmlerin 2 sccm Ar gaz akış oranlarında yapılmasına karar verilmiştir. Böylelikle daha düşük elektriksel dirence sahip filmlerin büyütülmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda SiN altaşlar üzerine 2 sccm argon ve 0.40, 0.44, 0.48 oksijen gaz akış oranlarında 20 nm VOx ince filmler büyütülmüş ve elektriksel direnç değerleri FPP ile ölçülmüştür ve Çizelge.7.22’de verilmiştir.

Çizelge.7.22: 2 sccm Ar ve 0.40, 0.44, 0.48 sccm O₂ gaz akış oranlarında 20 nm kalınlıkta üretilen VOx ince filmlerin elektriksel direnç değerleri.

Numune ismi	Direnç (M Ω)	Özdirenç(Ω cm)	Ar/O ₂ (sccm)	Kalınlık (nm)
#5-1	3.150	6.3	2/0.40	20
#5-2	2.902	5.8	2/0.44	20
#5-3	3.184	6.3	2/0.48	20

.7.23’teki direnç değerleri incelendiğinde elektriksel direnç değerlerinin 3 M Ω seviyelerinde oldukları görülmektedir. Bu değerler dikkate alındığında, 100 nm VOx ince filmlerin 2/0.40 sccm Ar/O₂ gaz akış oranlarında yapılması planlanmıştır. 100 nm kalınlıkta üretilecek olan VOx ince filmin elektriksel direnç değerinin 1 M Ω seviyesinin altında olması beklenmektedir.

2/0.40 sccm Ar/O₂ oranlarında 100 nm kalınlıkta üretilen VOx ince filmin elektriksel direnç değeri FPP tekniği ile incelenmiştir (bkz. Çizelge 7.23).

Çizelge.7.23: 2 sccm Ar ve 0.40 sccm O₂ gaz akış oranında 100 nm kalınlıkta üretilen VO_x ince filmin elektriksel direnç değerleri.

Numune ismi	Direnç (kΩ)	Özdirenç(Ω cm)	Ar/O ₂ (sccm)	Kalınlık (nm)
#55-1	720.65	7.2	2/0.40	100

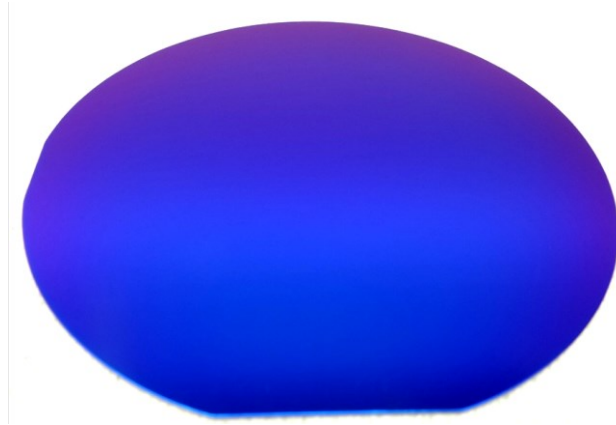
.7.23'teki elektriksel değerler incelendiğinde 100 nm kalınlıkta üretilen VO_x ince filmlerin 700 kΩ seviyelerinde elektriksel direnç değerlerinin olduğu görülmektedir. Filmin elektriksel direnç değerinin yüksek olması ve bundan dolayı TCR ölçümü sırasında okunan voltaj değerinde yüksek dalgalanmalar meydana gelmiştir. Bu nedenle bu filmin TCR değeri hesaplanamamıştır. Ancak 4, 6, 8 sccm argon ve farklı oksijen oranlarında üretilen VO_x ince filmlerin elektriksel dirençleri dikkate alındığında, bu numunenin TCR değerinin -3.0 %/°C değerinin üzerinde çıkması beklenmektedir.

Şekillendirilmesi tamamlanmış 3" alıttaşlar üzerine bütülecek VO_x ince filmlerin üretimindeki argon ve oksijen gaz akış oranları incelenmiştir. 4 sccm argon ve 0.39 sccm oksijen gaz akış oranı ile 2 sccm argon ve 0.40 sccm oksijen gaz akış oranında üretilen filmlerin elektriksel özellikleri dikkat çekmektedir. Her bir elektrot grubunda 23 farklı yapıda elektrot bulunan 3" alıttaşlar üzerine büyütülecek VO_x ince filmlerden 20-250 kΩ arasında elektriksel direnç değerlerinin okunması beklenmektedir.

7.3. VO_x İnce Filmlerin Şekillendirilmiş Alıttaş Üzerine Büyütülmesi ve Elektriksel Karakterizasyonları

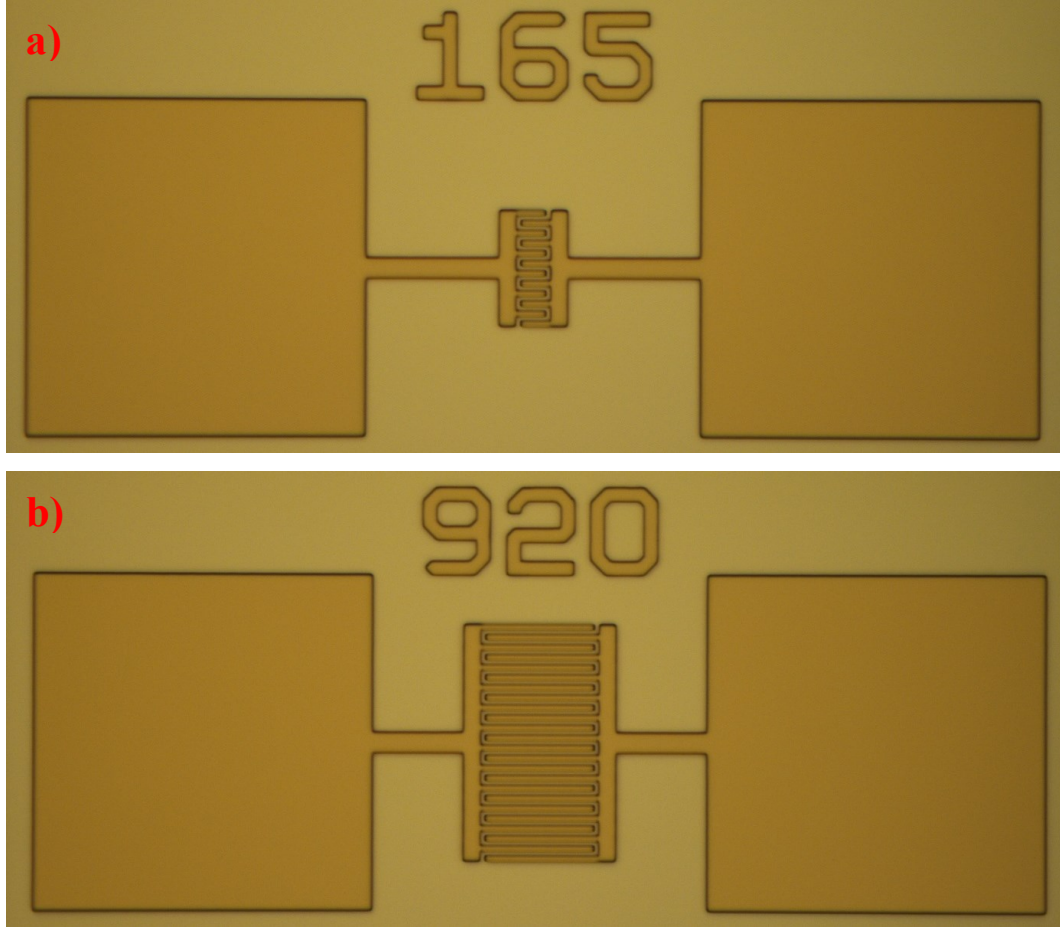
7.3.1. VO_x İnce Filmlerin Üzerine Büyütüleceği Alıttaşın Şekillendirilmesi

Elektrotların üretimi ve şekillendirilmesi ODTÜ-MEMS Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir. Elektrotlar 200 nm Si₃N₄ üzerine büyütülmüştür. 4" Si alıttaş malzemeleri, 9625 ml amonyum florür ve 1375 ml HF karışımında 60 saniye temizlik sürecine tabi tutulmuştur. Temizlenen alıttaşlar üzerine Şekil.7.48'deki gibi 200 nm Si₃N₄ büyütülmüştür.



Şekil.7.48: 200 nm Si₃N₄ kaplı 4" alttaş malzemesi

200 nm Si₃N₄ kaplı alttaşlar üzerine elektrot malzemesi olarak Krom (Cr) ve Altın (Au) metalleri büyütülmüştür. Altın metalinin alttaş yüzeyine daha iyi büyümesi ve kimyasal süreçlere daha dayanıklı olması için 25 nm Krom üzerine büyütülmüştür. Krom ve altın ODTÜ-MEMS Merkezi'nde bulunan sıçratma sisteminde yapılmıştır. Elektrot metallerinin şekillendirilmesi için MikroChem firmasının bir ürünü olan S1813 fotorezist malzemesi 3000 rpm hızda alttaşlar üzerine serilmiştir. Serilen fotorezist, 115 °C sıcaklıkta 90 saniye ısıtılmıştır. Bu sürece soft-bake denilmektedir. Alttaşlar, EVG Mask Aligner 620 cihazında 3.5 saniye UV ışığa maruz bırakıldıktan sonra Megaposit marka MF 24A Developer kimyasalı ile Şekil.7.49'da gösterildiği gibi şekillendirilmiştir.



Şekil.7.49: Farklı parmak sayısı ve parmak uzunluklarındaki elektrot yapıları için şekillendirilen fotorezist malzemelerinin optik mikroskop görüntüleri

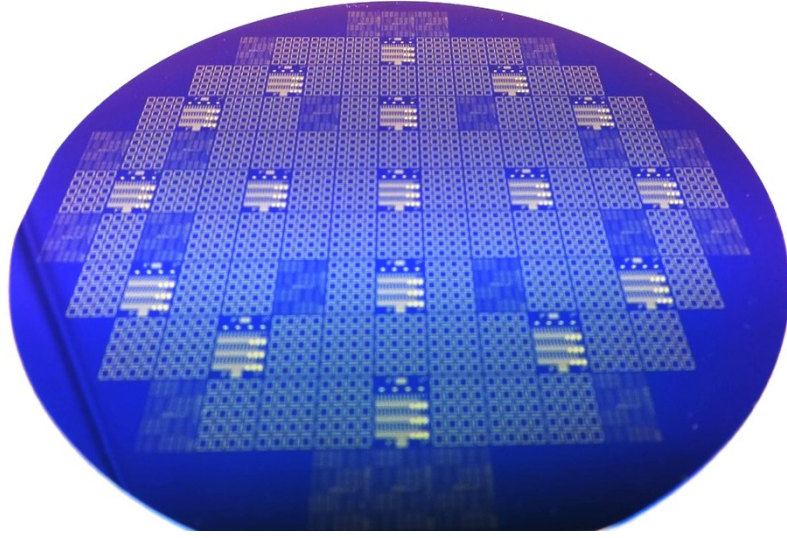
Şekillendirilen fotorezist malzemeleri, kimyasal aşındırma süreçlerinin sonuna kadar dayanıklılıklarını korumaları için 115 °C sıcaklıkta 1 dakika ısıtılmışlardır. Bu sürece hard-bake denilmektedir.

Elektrot malzemesi olarak üretilen krom ve altın metalleri kimyasal aşındırma süreçleri ile şekillendirilmiştir. İlk olarak altın şekillendirilmiştir. Altını aşındırmak için hazırlanan kimyasal:



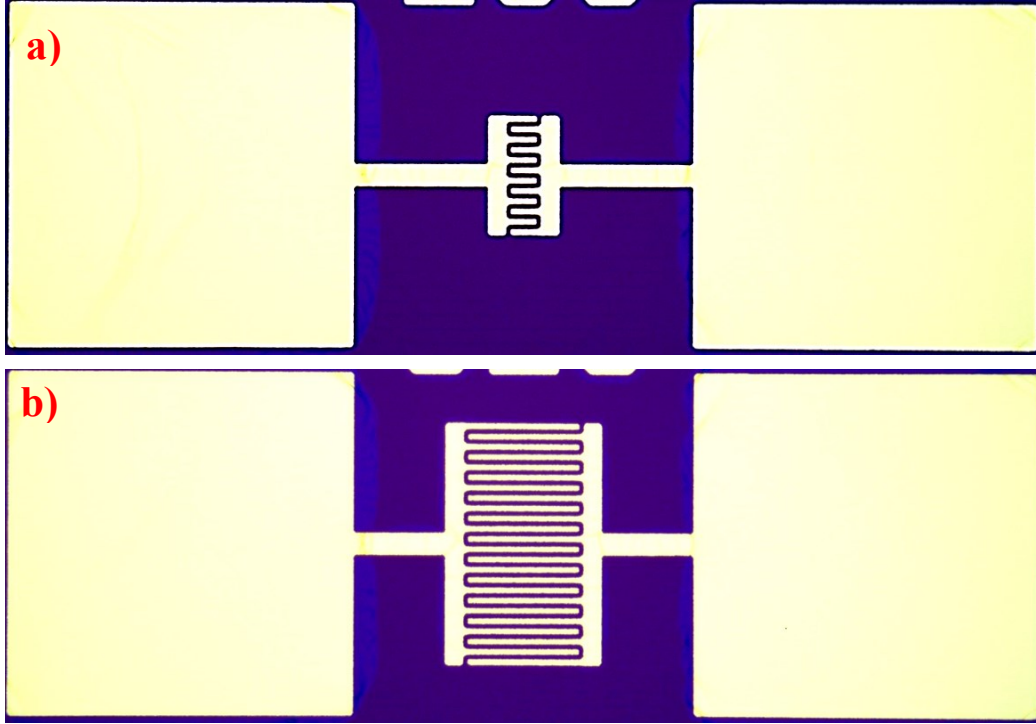
75 nm kalınlığındaki Au ince filmin yaklaşık 35-40 saniye aralığında tamamen aşındığı optik mikroskop ile incelenerek tespit edilmiştir. Altın şekillendirildikten sonra krom malzemesi şekillendirilmiştir. Kromun daha kontrollü aşındırılabilmesi için alttaşlar 3 dakika boyunca 45 °C sıcaklıkta oksijen plazmasına maruz bırakılmıştır ve kromun oksitlenmesi sağlanmıştır. Krom malzemesinin az miktarda

oksitlenmesi, kimyasal aşındırma sürecinin daha kontrollü ve hızlı olması için gerekmektedir. Oksijen plazması sonrasında krom malzemesi, TFD kimyasalı ve 500 ml H₂SO₄ + 1600 ml H₂O karışımı kimyasallar ile aşındırılmıştır. Aşındırma süreçleri sonrasında alttaşlar üzerindeki fotorezist malzemesi SVC-14 kimyasalı içerisinde 80 °C sıcaklıkta 30 dakika boyunca bekletilerek kaldırılmıştır. Alttaşın son hali Şekil.7.50’de gösterilmiştir.



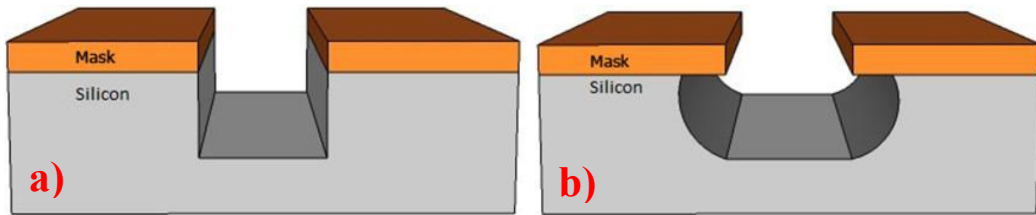
Şekil. 7.50: Kimyasal aşındırma ve rezist kaldırma süreçleri sonrasında 4” alttaşın resmi

Kimyasal aşındırma işlemleri sonucu alttaşlar optik mikroskop ile incelenmiştir. Şekil.7.51’de optik mikroskop resimleri verilmiştir.



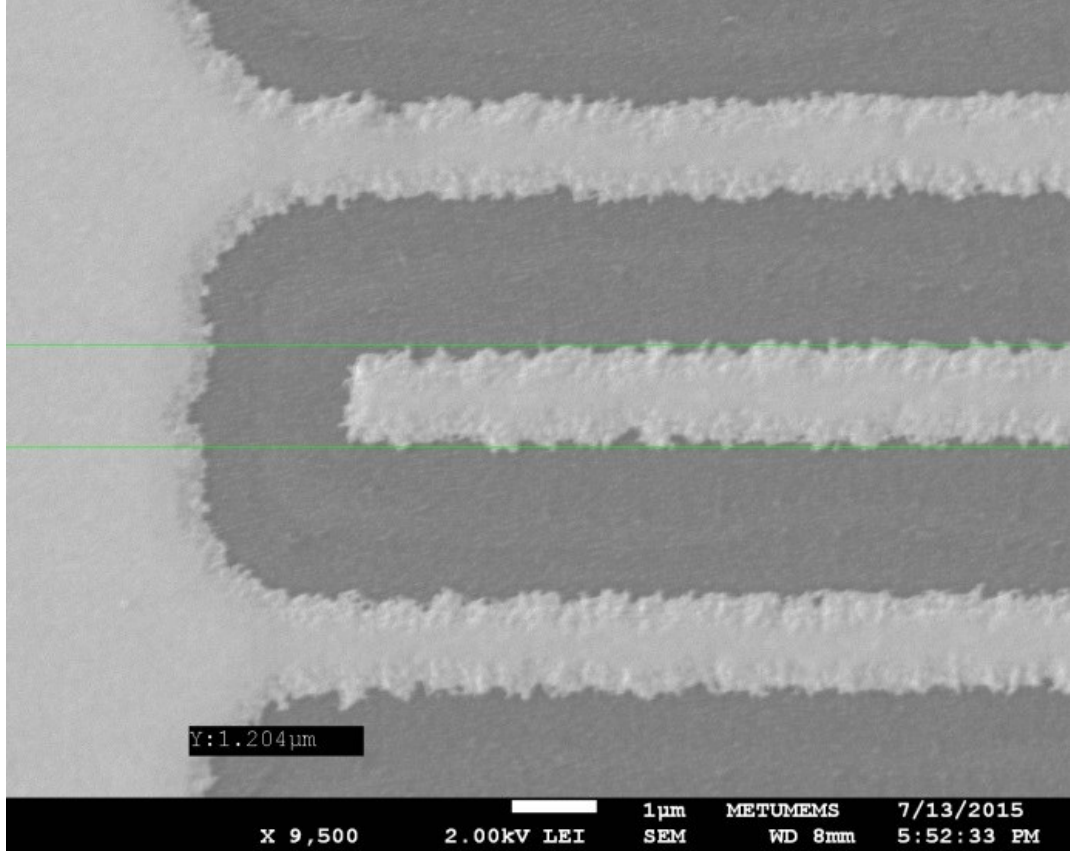
Şekil.7.51: 25/75 nm Cr/Au kaplı elektrotların şekillendirildikten sonraki optik mikroskop görüntüsü

Kimyasal aşındırma süreçlerinde Şekil.7.52'deki gibi izotropik bir aşınma söz konusudur. Aşındırma sürecinin kontrolü fiziksel aşındırma süreçlerine göre çok daha zordur. Dolayısıyla bu tarz yapılarda fazla aşınma durumları sıklıkla görülebilmektedir.



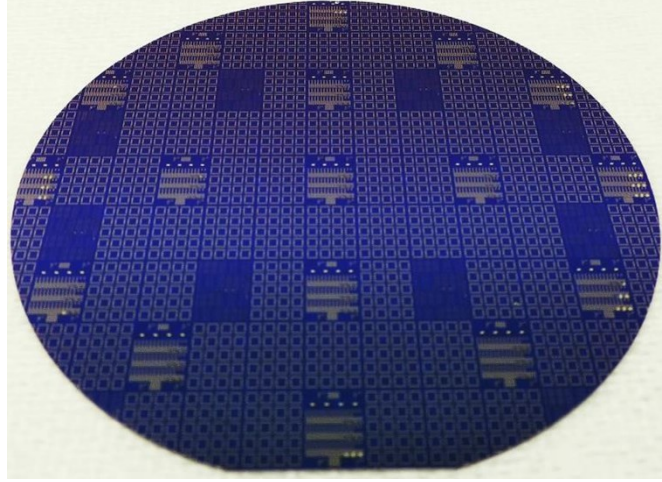
Şekil.7.52: Anizotropik (a) ve izotropik (b) aşındırma

Şekil.7.53'teki şekillendirilen elektrotların SEM resimleri incelendiğinde, 25/75 nm Cr/Au kaplı alttaşlarda kimyasal aşındırma sonucunda 1.5 μm genişliğe sahip olan parmak yapıların yaklaşık 0.3 μm daha fazla aşındığı görülmektedir.



Şekil.7.53: 25/75 nm Cr/Au kaplı farklı parmak yapılarıdaki elektrotların şekillendirildikten sonraki SEM resmi. Parmak yapılarında 0.3 μm fazladan aşınmaların olduğu görülmektedir

Alttaş, Anadolu Üniversitesi'nde 2/0.4 sccm Ar/O₂ gaz akış oranlarında 100 nm kalınlıkta VO_x ince kaplanmak üzere 3" boyutuna küçültülmüştür. Kesme işlemi sırasında kopan silisyum ve diğer parçacıkların elektrot yüzeyine yapışmasını ve zarar vermesini engellemek için alttaş yüzeyi S1813 fotorezist malzemesi ile kaplanmıştır. Kesim işlemi bittiğinde fotorezistin tekrar kaldırılması için alttaşlar sırasıyla aseton, propanol ve su ile temizlik sürecine tabi tutulmuştur. 3" boyutundaki alttaşın son hali Şekil.7.54'te gösterilmektedir.



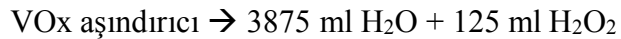
Şekil.7.54: Elektrotların şekillendirildiği alttaş dairesel kesim işlemi sonrasında 3” boyutuna küçültülmüştür

7.3.2. VOx İnce Filmlerin Alttaş Üzerine Büyütülmesi Şekillendirilmesi

VOx ince filmlerin üretimi için Ar/O₂ gaz akış oranı için 2/0.4 sccm belirlenmiştir. Bu gaz akış oranlarında 3” alttaşlar üzerine 100 nm VOx ince film Anadolu Üniversitesi’nde kaplanmıştır.

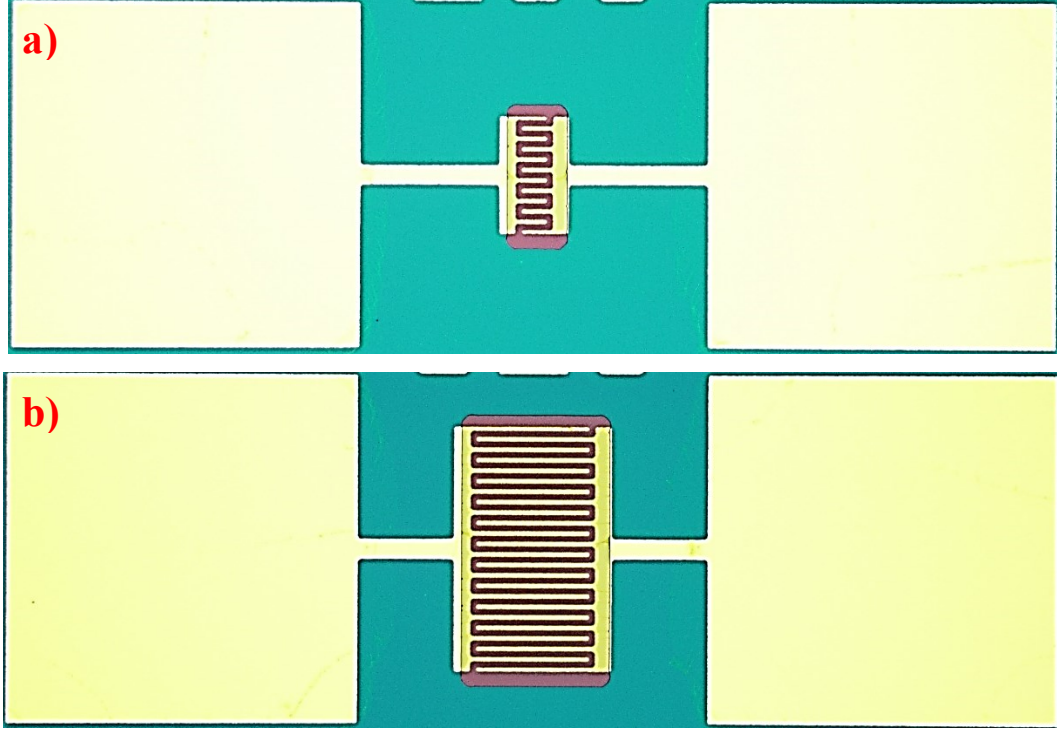
3” alttaşlar üzerine kaplanan VOx ince filmler şekillendirilme işlemi için alttaşlara S1813 rezist malzemesi 3000 rpm hızda 30 saniye kaplanmıştır. Kaplanan rezist malzemesi 3.5 saniye boyunca UV ışığa maruz bırakıldıktan sonra MF319 Developer kimyasalında çözünen rezist malzemesi kaldırılmıştır. Çözünmeyen rezist malzemesinin kenarlarında kalan pürüzlülükleri kaldırmak için ise alttaşlar 45 °C sıcaklıkta 300W’ta oksijen plazma sürecine tabi tutulmuşlardır. VOx ince filmlerin kimyasal aşındırma süreçlerinden önce alttaşlar 115 °C’de 1 dakika ısıtılmıştır.

VOx ince filmler, ODTÜ-MEMS Merkezi’ndeki kimyasal tezgâhlarda hidrojen peroksit ve su karışımı bir kimyasal ile aşındırılmıştır:



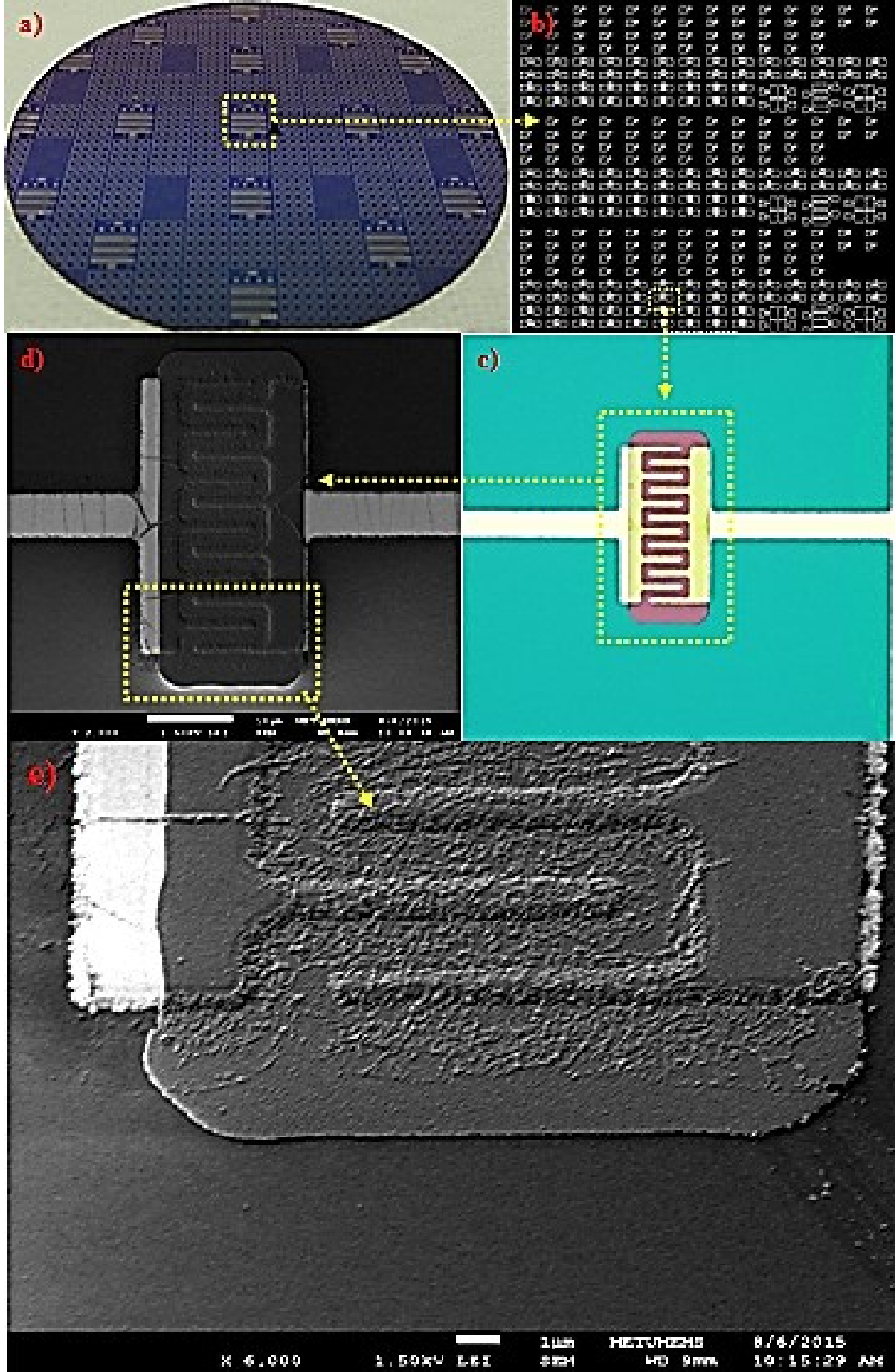
VOx ince filmlerin aşındırma süreçleri yaklaşık 90 saniyede tamamlanmıştır. Aşındırma işleminin başarılı bir şekilde tamamlandığı, alttaşların optik mikroskop ile incelenmesinden (Şekil.7.55) ve elektriksel direnç ölçümlerinin yapılmasından

sonra tespit edilmiştir. PR malzemesinin kaldırılması için altaşlar SVC-14 kimyasalı içeren iki tankta sırayla on beşer dakika bekletilmiştir.



Şekil.7.55: 25/75 nm Cr/Au üzerine 100 nm VOx kaplı iki farklı elektrodun şekillendirildikten sonraki optik mikroskop görüntüleri

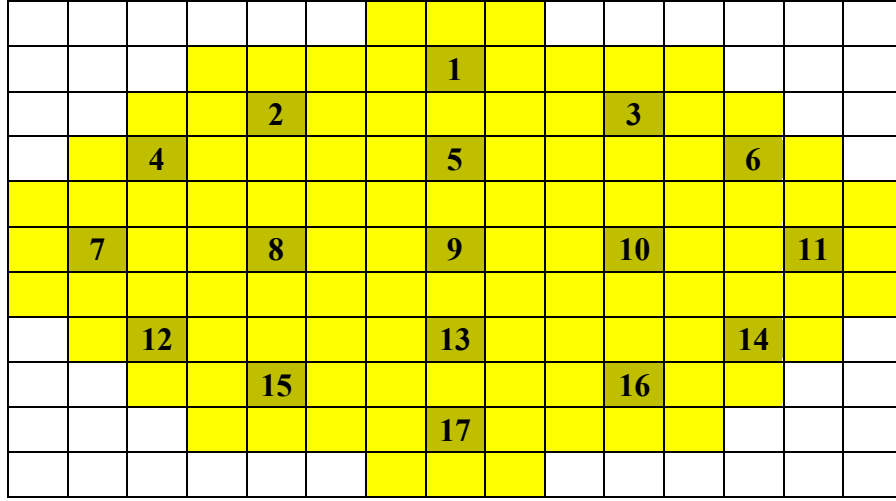
Şekil.7.55'te gösterilen optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde VOx ince filmlerin aşındırma süreçlerinde mikron ve mikron altı bir hassasiyette bir kayma olduğu görülmektedir. Bunun sebebi maske hizalama cihazının 3" altaşlara göre bir taşıyıcısının olmaması ve altaş-maske hizalamasının cihaz operatörünün el hassasiyeti ile yapılmasıdır. Aşındırma sonucunda şekillendirilen VOx ince filmlerin SEM resimleri de Şekil.7.56'da verilmiştir.



Şekil.7.56: Aşındırma sonucu şekillendirilen alttaşın (a), kullanılan maskenin (b), şekillendirilen VOx ince filmlerin optik (c) ve SEM (d) (e) resimleri

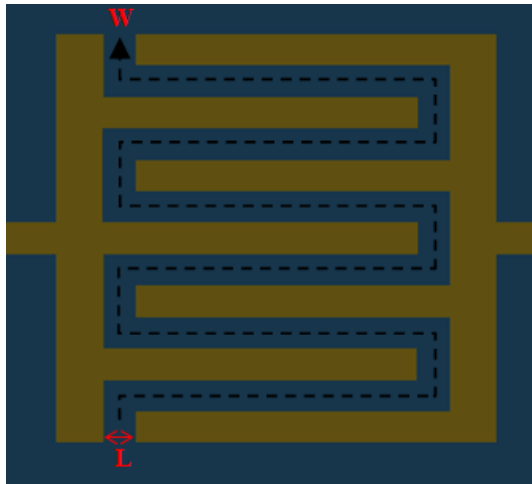
7.3.3. Şekillendirilen VOx İnce Filmlerin Elektriksel Karakterizasyonları

3'' alttaş üzerine şekillendirilen elektrotlar, alttaş geneline Şekil.7.57'deki gibi dağıtılmıştır. Numaralar ile gösterilen yerlerde aynı yapıda elektrot grupları bulunmaktadır.



Şekil.7.57: 3'' alttaş üzerinde elektrotların dağılımı. Her bir numara ile gösterilen parçada aynı sayıda ve şekilde elektrot yapıları bulunmaktadır

Elektrotların şekil ve yapısı Şekil. 7.58 ve Çizelge 7.24'te ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil.7.58: 3'' alttaş üzerine parmak yapıda şekillendirilen elektrotlar

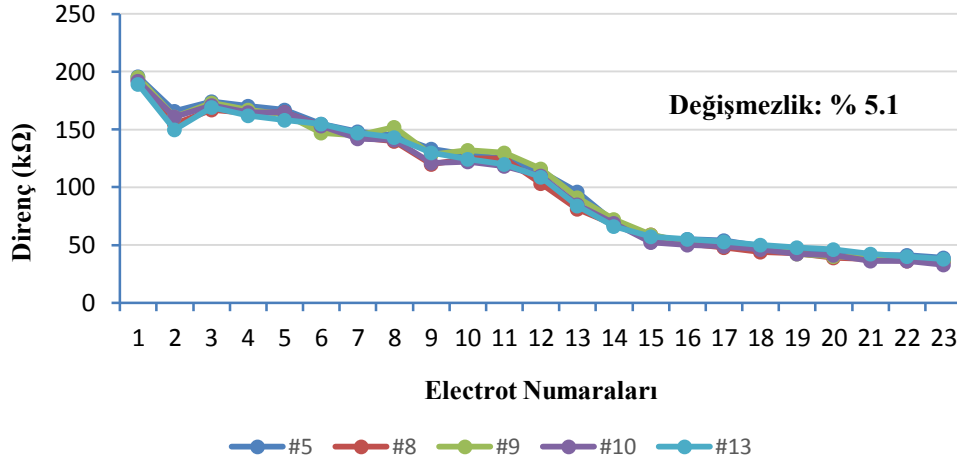
Çizelge.7.24: 3" alttaş üzerine şekillendirilen elektrotların boyutları

Elektrot Numaraları	Parmak Sayısı	Parmak uzunluğu (mikron)	L (mikron)	W (mikron)
1	6	4.0	1.5	78.5
2	2	34.0	1.5	112.5
3	7	4.0	1.5	92.5
4	5	9.0	1.5	109.5
5	8	4.0	1.5	106.5
6	6	9.0	1.5	133.5
7	9	4.0	1.5	120.5
8	7	9.0	1.5	157.5
9	3	34.0	1.5	186.5
10	8	9.0	1.5	181.5
11	9	9.0	1.5	205.5
12	4	34.0	1.5	260.5
13	5	34.0	1.5	334.5
14	6	34.0	1.5	408.5
15	7	34.0	1.5	482.5
16	8	34.0	1.5	556.5
17	9	34.0	1.5	630.5
18	10	34.0	1.5	704.5
19	11	34.0	1.5	778.5
20	12	34.0	1.5	852.5
21	13	34.0	1.5	926.5
22	14	34.0	1.5	1000.5
23	15	34.0	1.5	1074.5

VOx ince filmlerin şekillendirildikten sonra Şekil.7.57'de #5, #8, #9, #10 ve #13 numara ile gösterilen kısımdaki elektrotlardan 22 °C sıcaklıkta elektriksel direnç değerleri ölçülmüştür. Sonuçlar Çizelge 7.25 ve Şekil.7.59'da verilmiştir.

Çizelge.7.25: VOx ince filmlerin #5, #8, #9, #10 ve #13 numaralı parçalardaki elektrot grubundan ölçülen elektriksel direnç değerleri

Elektrot Numaraları	W (mikron)	Elektriksel Direnç Değerleri (k Ω) @ 22 °C				
		#5	#8	#9	#10	#13
1	78.50	196	193	195	192	189
2	112.50	166	155	161	161	150
3	92.50	174	167	173	171	169
4	109.50	170	164	167	165	162
5	106.50	167	165	163	165	158
6	133.50	155	153	147	153	155
7	120.50	148	143	145	142	147
8	157.50	145	140	152	141	143
9	186.50	133	120	128	121	130
10	181.50	128	125	132	122	124
11	205.50	125	125	130	118	120
12	260.50	114	103	116	110	109
13	334.50	96	81	91	85	84
14	408.50	70	68	72	69	66
15	482.50	53	59	59	52	57
16	556.50	55	51	52	50	55
17	630.50	54	48	50	49	53
18	704.50	49	44	49	46	50
19	778.50	45	43	42	42	48
20	852.50	42	39	40	41	46
21	926.50	41	38	39	36	42
22	1000.50	41	36	39	36	40
23	1074.50	39	36	36	33	38

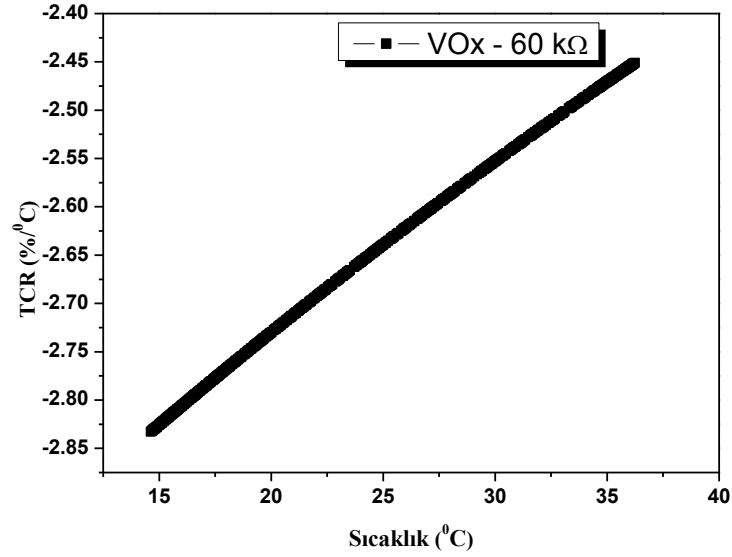


Şekil.7.59: VOx ince filmlerin #5, #8, #9, #10 ve #13 numaralı parçalardaki direnç değerleri göz önüne alındığında, değişmezlik % 5.1 olarak hesaplanmıştır

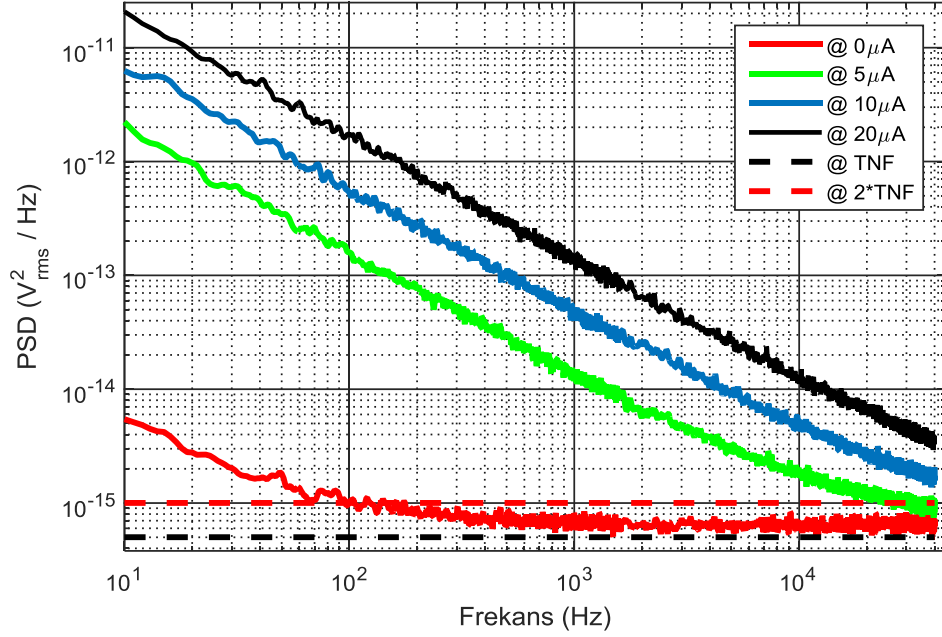
Çizelge 7.24'te elektriksel direnç ölçüm sonuçları verilmiştir. Elektrotların yüzey alanları (W) arttıkça elektriksel direncin (R) buna ters orantılı olarak düştüğü

görülmektedir. Elektrot gruplarının olduğu her bir parçada 30 k Ω ve 200 k Ω aralığında elektriksel direnç değerleri elde edilmiştir. Elektriksel direnç değerleri göz önüne alındığında, TCR değerlerinin -2.5 %/ $^{\circ}$ C değerinin üzerinde olması beklenmektedir.

Elektriksel direnci 60 k Ω olan VOx ince film, TCR ve 1/f gürültü ölçümleri için pakete yerleştirilip, % 99.99 saflıkta altın (Au) teller ile elektrottan pakete kontaklar atılmıştır. Yapılan TCR ve 1/f gürültü ölçümleri Şekil.7.60 ve 7.61’de verilmiştir.



Şekil.7.60: 60 k Ω dirence sahip VOx ince filmler için TCR - sıcaklık (T) grafiği verilmiştir ve TCR değeri 2.63%/ $^{\circ}$ C olarak hesaplanmıştır



Şekil.7.61: VOx ince filmler için 5, 10 ve 20 μA akım değerlerinde 10 Hz – 40 kHz arasında 1/f gürültü ölçümleri yapılmıştır. Gürültü değerlerinin akıma bağlı değiştiği gözlenmiştir ancak yapılan hesaplamalarda köşe frekansının yaklaşık (f_c) 40 kHz olduğu görülmüştür. Grafikte “TNF (teoritical noise floor)” ile belirtilen seviyeler, teorik hesaplamalar sonucu çıkan teorik gürültü seviyelerini göstermektedir

Şekil 7.60 ve 7.61’de görüldüğü gibi 60 k Ω elektriksel dirence sahip filmin TCR ve 1/f gürültü ölçüm grafikleri verilmiştir. TCR değeri -2.63%/°C olan VOx ince filmin 1/f gürültüsün yüksek olduğu gözlenmiştir.

Filmlerin gürültüsü (7.1) ve (7.2) ile ifade edilen eşitlikler ile hesaplanmaktadır.

$$S_{total}(f) = P_1 + \frac{P_2}{f^{P_3}} \quad (7.1)$$

$$S_{1/f}(f) = \frac{P_2}{f^{P_3}} = \frac{KI^\alpha}{f^\beta} \quad (7.2)$$

Eşitlikte (7.1)’de P_1 termal gürültüyü belirtmektedir. P_2 ve P_3 ise sürece bağlı parametrelerdir ve ölçüm sonrası bilgisayar ortamında yapılan nümerik iterasyonlar ile hesaplanmaktadır. Termal gürültünün 1/f gürültüsüne eşit olduğu frekansa köşe frekansı denilmektedir. Kısaca, gürültü ölçümü grafiklerinde 2*TNF ile gösterilen seviyenin grafiği kestiği nokta da 1/f gürültüyü belirtmektedir.

Filmlerin TCR değerleri, filmlerin sıcaklık – direnç grafiklerine (7.3) ile belirtilen Arrhenius denklemi yardımıyla atılan uyum eğrisi ile hesaplanmıştır.

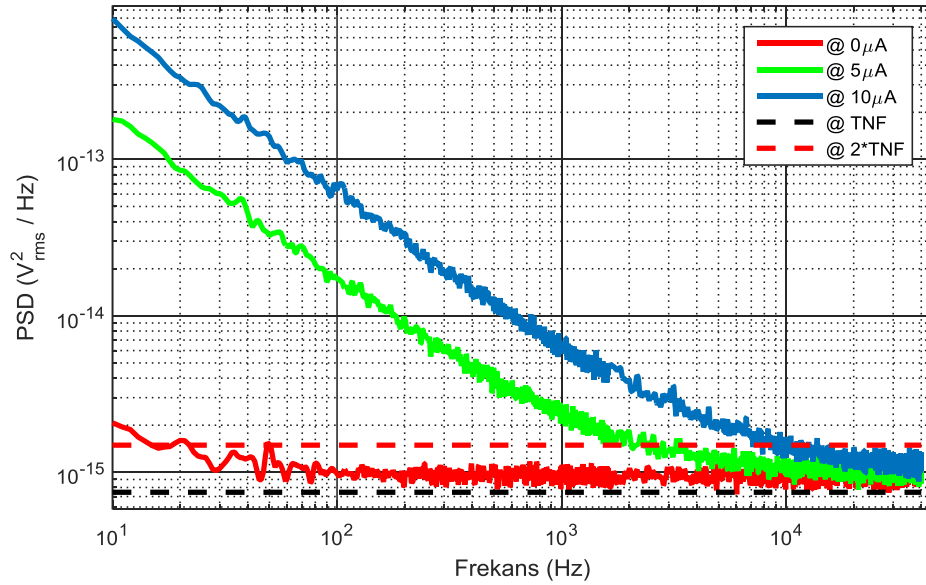
$$R = R_0 e^{\left(\frac{-E_0}{kT}\right)} \quad (7.3)$$

Eşitlik (3)'te R elektriksel direnci, R_0 sürece bağlı parametre, E_0 aktivasyon enerjisi, k Boltzmann sabiti ve T ise sıcaklığı ifade etmektedir.

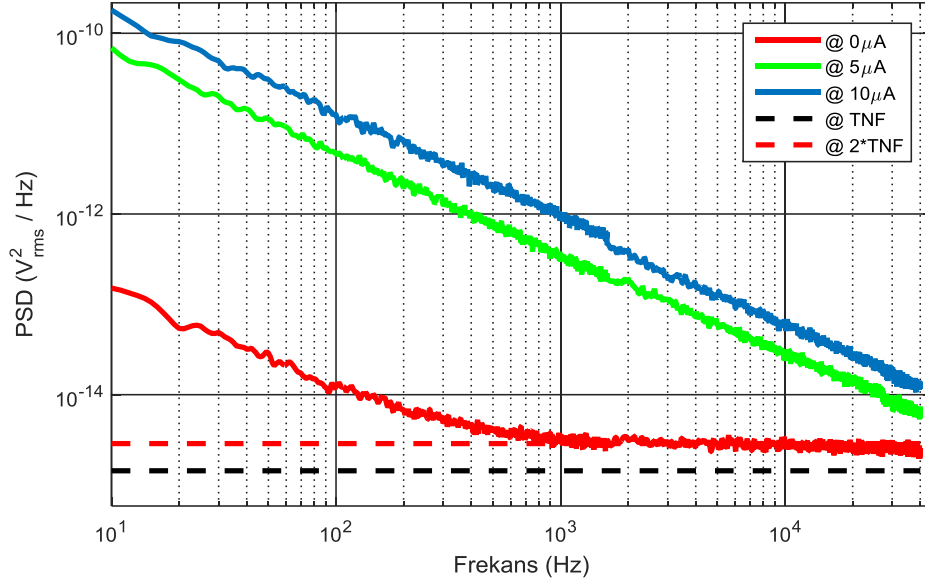
VOx ince filmlerin gürültü değerini 10 kHz seviyesinin altına düşürmek için filmlere azot (N_2) atmosferinde 200 °C ve 300 °C sıcaklıklarda ısıl işlem süreçleri uygulanmıştır. Isıl işlem sonucunda yapılan elektriksel karakterizasyon sonuçları Çizelge.7.26'da verilmiştir. Filmlerin gürültü ölçüm grafikleri de Şekil.7.62 ve 7.63'te gösterilmiştir.

Çizelge.7.26: 200 ve 300 °C sıcaklıklarda 3 saat ısıl işleme tabi tutulan VOx ince filmlerin elektriksel özellikleri verilmiştir.

	Direnç (kΩ)	TCR (%/°C)	f_c (kHz) @10 μA
Isıl işlem öncesi	60	-2.63	> 40 kHz
Isıl işlem sonrası - 3 saat @ 200 °C	90	-2.73	3.3 kHz
Isıl işlem sonrası - 3 saat @ 300 °C	206	-3.47	> 40 kHz



Şekil. 7.62: 200 °C'de 3 saat ısıl işlem gören VOx ince filmin 5, 10 μA akımlarında 1/f gürültüsü ölçüm grafikleri



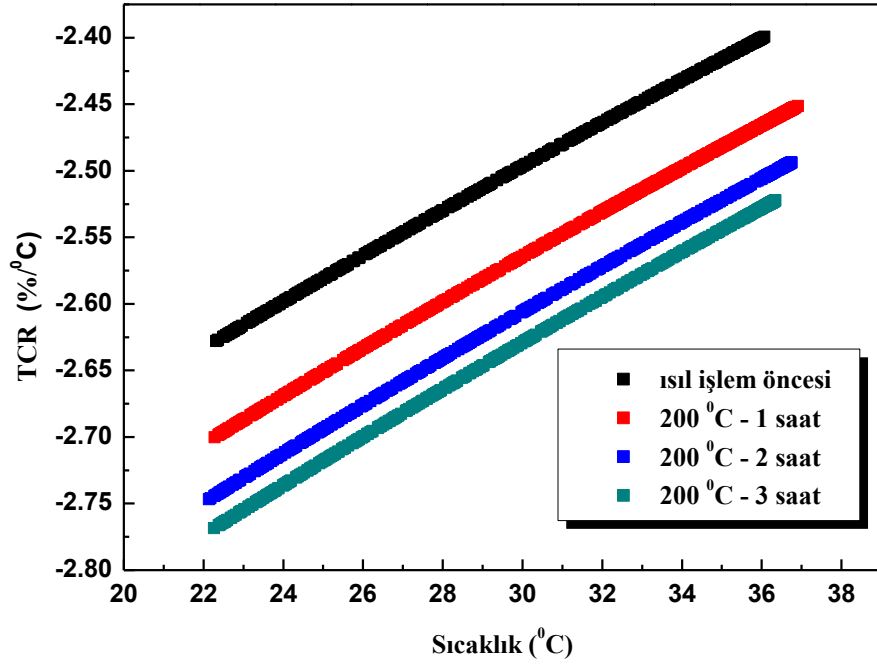
Şekil 7.63: 300 °C’de 3 saat ısıl işlem gören VOx ince filmin 5, 10 μA akımlarında gürültü ölçüm grafikleri

200 °C sıcaklıkta 3 saat ısıl işleme tabi tutulan VOx ince filmin elektriksel özelliklerinin mikrobolometre uygulamaları için çok iyi çıktığı gözlenmiştir. VOx ince filmlerin gürültü değerinin değişimini gözlemlemek için filmlere, sıcaklığın 200 °C’de sabit tutulup süresinin değiştiği bir ısıl işlem süreci uygulanmıştır ve süreç sonrası elektriksel özellikler Çizelge 7.27’de verilmiştir.

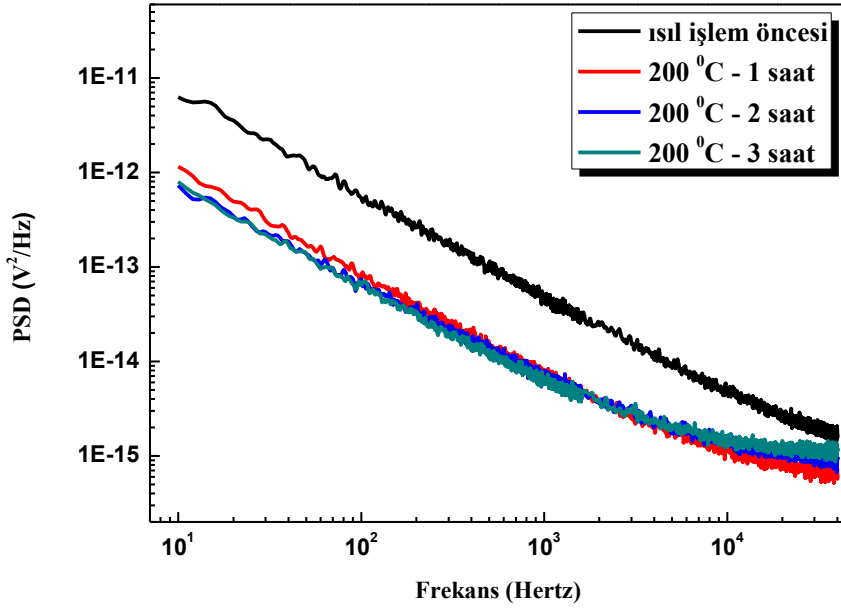
Çizelge.7.27: 200 °C sıcaklıklarda 1 ve 2 saat ısıl işleme tabi tutulan VOx ince filmlerin elektriksel özellikleri

	Direnç (kΩ)	TCR (%/°C)	f _c (kHz) @10 μA
Isıl işlem öncesi	48	-2.58	>40 kHz
Isıl işlem sonrası - 1 saat @ 200 °C	50	-2.65	9.6 kHz
Isıl işlem sonrası - 2 saat @ 200 °C	73	-2.71	6 kHz

.7.26’da da görüldüğü gibi VOx ince filmlerin 200 °C azot atmosferinde yapılan ısıl işlem süreçlerinden sonra TCR ve 1/f gürültü değerlerinde iyileşmeler olduğu tespit edilmiştir. Şekil.7.64 ve Şekil.7.65’te, 200 °C azot atmosferinde yapılan ısıl işlemler sonrasında VOx ince filmlerin TCR performansları ve 1/f gürültü ölçüm sonuçları verilmiştir.



Şekil.7.64: 200 °C azot atmosferinde farklı sürelerde tavlanan filmlerin sıcaklık – TCR grafikleri



Şekil.7.65: 200 °C azot atmosferinde farklı sürelerde tavlanan VOx ince filmlerin 1/f gürültü ölçümü sonuçları

Sonuç olarak, 25/75 nm Cr/Au elektrotlar üzerine 100 nm üretilen VOx ince filmlerin üretim sonrası elektriksel direnç ve TCR değerleri, mikrobolometre

uygulama alanları için istenilen aralıkta çıkmıştır. Ancak filmlerin 1/f gürültüsü köşe frekansları ise yüksek çıkmıştır. Üretim sonrası ısıtma işlemleri sayesinde 1/f gürültüsü ve 1/f gürültüsü köşe frekansı düşürülmüştür. Isıtma işlemleri sonucunda VOx ince filmlerin TCR performanslarında da iyileşmeler meydana gelmiştir. 2/0.4 sccm Ar/O₂ gaz akış oranlarında üretilen VOx ince filmlerin elektriksel direnç, TCR ve 1/f gürültüsünün optimizasyonu için 200 °C azot atmosferinde 3 saat tavlama sürecinin en uygun ısıtma işlem sürecinin olduğu tespit edilmiştir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, vurmali DC sıçratma tekniği ile oda sıcaklığında, Çizelge 6.1'de yer alan sistematik üretim planı ile farklı argon gaz akış ve O₂/Ar oranlarında, Si/SiO₂ ve Si/SiN altaş malzeme üzerinde 20 ve 100 nm üretilen VOx ince filmler üretilmiştir. Üretilen filmlerin elektriksel özellikleri FPP tekniğiyle, yapısal özellikleri X- ışını teknikleriyle ve elektriksel gürültü ölçümleri bu tez kapsamında kurulan ölçüm düzeneği ile incelenmiştir. Elektriksel özellikleri endüstriyel uygulamalara için uygun olan filmlerin, litografi süreçleri ile parmak yapıda şekillendirilmiş Cr/Au elektrotlar üzerine büyütülerek TCR ve 1/f gürültü analizleri yapılmıştır.

VOx ince filmler 10⁻⁹ Torr seviyelerindeki basınca inebilen vakum odacıklarında üretilmiştir. Üretim öncesi vakum odasındaki parçalar temizlendikten sonra vakum odasının içerisindeki yabancı gazların atılması için ısıl işlem süreci uygulanmıştır. Ancak ortamda hala eser miktarda nitrürlü bileşiklerin, hidrojen ve karbondioksit gazı ile su buharının olduğu RGA cihazı ile gözlenmiştir.

VOx ince filmleri Si/SiO₂ ve Si/Si₃N₄ altlıklar üzerine büyütülmüştür. Üretim öncesi altaş yüzeylerinin temizlikleri için altaşlar sırasıyla aseton, propanol ve saf su ile temizlik sürecine tabi tutulmuştur.

Si/SiO₂ ve Si/SiN altaş malzeme üzerinde 20 ve 100 nm kalınlıklarda; 4, 6 ve 8 sccm argon gaz akış ve % 5, 10, 15, 20 ve 30 O₂/Ar oranlarında üretilen VOx ince filmlerin elektriksel ve yapısal özellikleri ayrıntılı şekilde incelenmiştir. Üretilen filmlerinin, X-Işını teknikleri ile kalınlıkları ve yüzey / ara yüzey pürüzlülükleri tespit edilmiştir ve artan O₂/Ar oranları ile filmlerin yüzey pürüzlülüklerinin arttığı gözlenmiştir. Filmlerin kristal yapıları GIXRD tekniği ile yapılan ölçümlerle incelenmiştir. Üretilen filmlerin amorf (nano-kristal) yapıda oldukları tespit edilmiştir. Dört nokta iğne tekniği ile ölçülen VOx ince filmlerin elektriksel direnç değerleri filmin kalınlığı arttıkça azalırken; artan argon gaz akış oranı ve O₂/Ar oranı ile artmaktadır. Elektriksel özellikler, 6 ve 8 sccm argon basınçlarında % 15, 20 ve 30 O₂/Ar oranlarında üretilen filmlerin yüksek elektriksel dirençlerinden dolayı ölçülememiştir.

En düşük elektriksel direnç 4 sccm argon gaz akış ve % 5 O₂/Ar oranında yapılan üretimde elde edilmiştir. % 5 ve % 10 O₂/Ar oranlarında üretilen filmlerin elektriksel direnç ve TCR değerlerinin artan argon gaz akış oranı ile arttığı gözlenmiştir (bkz. Şekil 7.27 ve 7.28).

Mikrobolometre sistemleri için istenilen elektriksel özellikler, 4 sccm argon ve 0.38-0.39 oksijen gaz akış oranında üretilen VO_x ince filmlerde elde edilmiştir (7.18). Ancak üretim sistemindeki mekanik arızadan dolayı VO_x ince filmlerin üretimi sistemdeki hacimce daha büyük olan bir diğer üretim odasında tekrarlanmıştır. 4 sccm argon ve 0.38, 0.39 sccm oksijen gaz akış oranlarında yapılan üretimlerde filmler elektriksel olarak yalıtkan özellik göstermektedir. Kondisyonu farklı olan bu üretim odasında, önceki üretimler göz önüne alınarak 2 sccm argon gaz akış oranında üretimler yapılmıştır ve elektriksel direnç değeri istenilen aralıkta çıkmıştır.

Litografi süreçleri ile parmak yapıda şekillendirilen Cr/Au elektrotlar (bkz. Şekil.8.3) üzerine 2 sccm argon ve 0.40 sccm oksijen gaz akış oranlarında VO_x ince film büyütülmüştür ve filmlerin elektriksel direnç değerleri 30-200 kΩ arasındadır (bkz. Şekil.7.25). Filmlere, TCR ve 1/f gürültü performanslarında iyileştirmeler için ısıtım süreçleri uygulanmıştır. Isıtım işlemler sonucunda filmlerin TCR ve 1/f gürültü performanslarında iyileşmeler olduğu tespit edilmiştir (bkz. Şekil.7.26).

Azot atmosferinde 1, 2 ve 3 saat sürelerde tavlanan filmlerin elektriksel karakterizasyonları incelendiğinde, 3 saat azot atmosferinde tavlanan filmin elektriksel özelliklerindeki iyileşmelerin en iyi olduğu tespit edilmiştir. Kimyasal aşındırma yöntemleri ile aşındırılan ve 0.3 µm “undercut” olan Cr/Au elektrot yapılarının üzerine büyütülen VO_x ince filmlerin TCR performansının literatürde yapılan çalışmalardan daha da iyi çıktığı görülmektedir (bkz. Çizelge 8.1).

Çizelge.8.1: Üretilen VO_x ince filmin TCR performansının literatürdeki diğer üretim yöntemleri ile ve diğer aktif malzemeler ile karşılaştırılması

Üretim Tekniği	Aktif Malzeme	TCR (%/°C)	Referans
Sıçratma	YBaCuO	-3.0	Jahanzeb et al. [71]
CVD	Si _x Ge _{1-x}	-2.4	Sedky et al. [72]
Sıçratma	VO _x	-2.0	Wada and Nagashima [73]
Sıçratma	VO _x	-2.0	Cole et al [74]
Sıçratma	VO _x	-2.0	Chen et al. [75]
PLD	VO _x	-2.8	Rajendra Kumar et al [27]
İyon ışını sıçratma	VO _x	-2.1	S.B.Wang et al. [7]
Sıçratma	VO _x	-2.7	Bu çalışma

Mikrobolometre uygulamalarında kullanılan diğer malzemelerin de gürültü değerleri göz önüne alındığında, üretilen VO_x ince filmlerin gürültü değerlerinin mikrobolometre sistemleri için uygun oldukları görülmektedir (bkz Çizelge 8.2).

Çizelge.8.2: Farklı aktif malzemelerin 1/f gürültü değerlerinin karşılaştırılması [51, 70]

Malzeme	1/f gürültü değeri (V ² /Hz)
VWO	4x10 ⁻¹⁵ @ 20 Hz, 5.4 µA 2.3x10 ⁻¹⁴
VO _x	2.3x10 ⁻¹⁴ @ 30 Hz, 25 µA
YBCO	9x10 ⁻¹⁴ @ 20 Hz, 0.41 µA
Poly-Si	9x10 ⁻¹⁴ @ 10 Hz
Ge _x Si _{1-x}	7x10 ⁻¹³ @ 250 Hz, 4 µA
Doped a-Si	81x10 ⁻⁸ @ 25 Hz
a-Si	4x10 ⁻¹² @ 1Hz, 33 nA
Sputtered a-Si:H	5x10 ⁻⁸ @ 10 Hz, 160 mA
PECVD a-Si:H	1.1x10 ⁻⁶ @ 10 Hz, 160 mA
a-SiC:H	8x10 ⁻¹⁴ @ 20 kHz
Poly SiGe	1x10 ⁻¹¹ @ 1Hz
VO _x (bu çalışmada)	3.1x10 ⁻¹³ @ 30 Hz, 10 µA

Litografi süreçlerinde Cr/Au elektrotlar kimyasal aşındırma süreçleri ile şekillendirilmiştir. Kimyasal aşındırma süreçlerinde seçicilik fiziksel aşındırma süreçlerine göre çok daha fazla olmasına rağmen, sürecin kontrolü oldukça zordur. Dolayısıyla kimyasal aşındırma süreçlerinde izotropik bir aşındırma ve kontrol edilemeyen fazladan aşınmalar söz konusudur. Litografi sürecinde elektrotlar fiziksel aşındırma yöntemleri ile çok daha kontrollü yapılarak anizotropik bir aşındırma ve elektriksel gürültüye neden olacak fazladan aşınmaların olmadığı bir elektrot yapılabilir. Dolayısıyla VOx ince filmlerin gürültü performansının iyileştirilmesi için elektrotların şekillendirilmesinde fiziksel aşındırma tekniklerinin kullanılması önerilmektedir. Buna ek olarak, elektrotlara uygulanacak üretim öncesi ısıtma işlem süreçleri ile VOx ince filmlere üretim sırasında uygulanacak ısıtma işlem süreçlerinin filmin elektriksel gürültü ve TCR performanslarında iyileştirmeler yapabileceği araştırma konusudur. Bu konuda yeni yüksek lisans tezleri yapılma potansiyeli vardır.

KAYNAKLAR

- [1] Capar, O., *Nano ölçekli vanadyum oksit ince filmlerin yapısal ve elektriksel karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2010.
- [2] Bilgiç P., *Tavlama Sıcaklığının Nano Ölçekli Vanadyum Oksit İnce Filmlerin Optik ve Elektriksel Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi*, Yüksek lisans tezi, Anadolu Üniversitesi, 2012.
- [3] Liang Liu, Feng Cao, Tao Yao, Yang Xu, Min Zhou, Bingyan Qu, Bicao Pan, Changzheng Wu, Shiqiang Wei and Yi Xie, “New-phase VO₂ micro/nanostructures: investigation of phase transformation and magnetic property,” *NewJ.Chem.*, **36**, 619–625, 2012.
- [4] U. Kürüm, R.M. Öksüzöğlü, M. Yüksek, H.G. Yaglioglu, H. Çınar, Ayhan Elmali, “The third order nonlinear optical characteristics of amorphous vanadium oxide thin film,” *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, **104**,1025–1030, 2011.
- [5] Ulaş Kürüm, H. Gul Yaglioglu, Betül Küçüköz, R. Mustafa Oksuzoglu, Mustafa Yıldırım, A. Murat Yağcı, Can Yavru, T. Tıraş and Ayhan Elmali, “Modifying ultrafast optical response of sputtered VO_x nanostructures in a broad spectral range by altering post annealing atmosphere,” *J. Opt.*, **17**, 015503, 2015.
- [6] Changhyun Ko, Shriram Ramathan, ” Stability of electrical switching properties in vanadium dioxide thin films under multiple thermal cycles across the phase transition boundary,” *Journal of Applied Physics*, **104**, 086105, 2008.
- [7] R. G. Mani and S. Ramanathan, “Observation of a uniform temperature dependence in the electrical resistance across the structural phase transition in thin film vanadium oxide,” *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 062104 2007.
- [8] Chunmei B., *Synthesis and characterization of nano-scale vanadium oxides, vanadium phosphates as cathodes for lithium batteries*, Doktora Tezi, Binghamton University State University of New York, New York, 2008.
- [9] S.B.Wang, B.F. Xiong, S.B. Zhou, G. Huang, S.H. Chen, X.J. Yi, “Preparation of 128 element of IR detector array based on vanadium oxide thin films obtained by ion beam sputtering,” *Sensors and Actuators A*, **117**, 110-114, 2005.

- [10] Changhyun Ko and Shriram Ramanathan, “Effect of ultraviolet irradiation on electrical resistance and phase transition characteristics of thin film vanadium oxide,” *J. Appl. Phys.*, 103, 106104, 2008.
- [11] Changhong Chen, Xinjian Yi, Xingrong Zhao, Bifeng Xiong, “Characterizations of VO₂ -based uncooled microbolometer linear array,” *Sensors and Actuators A*, **90**, 212-214, 2001.
- [12] Karlı K., *Vanadium Oxide (VO_x) Thin Films Elaborated by Sol-Gel Method for Microbolometer Applications*, Master of Science Thesis, Middle East Technical University, Micro and Nanotechnology Department, January 2012.
- [13] Kebapçı B., *Development of High Performance Uncooled Infrared Detector Materials*, Master of Science Thesis, Middle East Technical University, Micro and Nanotechnology Department, February 2011.
- [14] H’ebert, C., Willinger, M., Su, D.S., Pongratz, P., Schattschneider, P., Schlogl, R., “Oxygen K-edge in vanadium oxides: simulations and experiments”, *European Physical Journal B*, **28**, 407–414, 2002.
- [15] Robert B Darling and Shiho Iwanaga, “Structure, properties, and MEMS and microelectronic applications of vanadium oxides,” *Sadhana*, Vol. 34, Part 4, pp. 531–542, August 2009.
- [16] Kachi, K.K.S., Takada, T., “Electrical Conductivity of Vanadium Oxides,” *Journal of the Physical Society of Japan*, **18**, 1839–1840, 1963.
- [17] G. Golan, A. Axelevitch, B. Sigalov, B. Gorenstein, “Metal – insulator phase transition in vanadium oxides films,” *Microelectronics Journal*, **34**, 255–258, 2003.
- [18] Morin, F.J., “Oxides which show a metal-to-insulator transition at the Neel Temperature”, *Phys. Rev. Lett.*, **3**, 34–36, 1959.
- [19] Kosuge, K., Kachi, S., Nagasaki, H., Minomura, S., “Phase Transition in V₆O₁₃”, *Journal of the Physical Society of Japan*, **20**, 178, 1965.
- [20] Kosuge, H.K., Okinaka, K., “Metal insulator phase transition and magnetic properties of V_nO_{2n-1}”, *IEEE Transaction on Magnetics*, **8**, 581–583, 1972.
- [21] Horiuchi, S., Saeki, M., Matsui, Y., Nagata, F., “Transition of V₆O₁₃ to VO₂ observed with a high-resolution electron microscope”, *Acta Crystallographica Section A*, **31**, 660–664, 1975.

- [22] G. Golan, A. Axelevitch, B. Sigalov, B. Gorenstein, “Investigation of Phase Transition Mechanism in Vanadium Oxide Thin Films,” *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, **6**, 189 – 195, March 2004.
- [23] Eyert, V., “The metal-insulator transitions of VO₂: A band theoretical approach,” *Annalen der Physik*, **11**, 650–704, 2002.
- [24] Zylbersztein, A., Mott, N.F., “Metal-insulator transition in vanadium dioxide” *Phys. Rev. B*, **11**, 4383–4395, 1975.
- [25] Jerominek, H., Pikard, F., Vincent, D., “Vanadium oxide films for optical switching and detection”, *Opt. Eng.*, **32**, 2092–2099, 1993.
- [26] Bryan D. Gauntta and Elizabeth C. Dickey, “Stoichiometry and microstructural effects on electrical conduction in pulsed dc sputtered vanadium oxide thin films,” *J. Mater. Res.*, Vol. 24, No. 4, April 2009.
- [27] R.T. Rajendra Kumar, B. Karunagaran, D. Mangalaraj, Sa.K. Narayandass, P. Manoravi, M. Joseph, Vishnu Gopal, R.K. Madaria, J.P. Singh, “Room temperature deposited vanadium oxide thin films for uncooled infrared detectors,” *Materials Research Bulletin*, **38**, 1235–1240, 2003.
- [28] S. S. N. Bharadwaja, C. Venkatasubramanian, N. Fieldhouse, S. Ashok, M. W. Horn et al., “Low temperature charge carrier hopping transport mechanism in vanadium oxide thin films grown using pulsed dc sputtering,” *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 222110, 2009.
- [29] A Subrahmanyam, Y Bharat Kumar Reddy and C L Nagendra, “Nano-vanadium oxide thin films in mixed phase for microbolometer applications,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41**, 195108, 2008.
- [30] Eminoglu S., *Uncooled Infrared Focal Plane Arrays with Integrated Readout Circuitry Using MEMS and Standard CMOS Technologies*, Doctor of Philosophy Thesis, Middle East Technical University, Department of Electrical and Electronics Engineering, July 2003.
- [31] Eroglu N., *Development of High Performance Active Materials for Microbolometers*, Master of Science Thesis, Middle East Technical University, Micro and Nanotechnology Department, August 2011.
- [32] Dai, J., Zhi, X., Wang, He, S., Huang Y., Yi, X., “ Low temperature fabrication of thin films for uncooled IR detectors by DC Reactive Magnetron Sputtering”, *Inf. Phys. Tech.*, **51**, 287, 2008.

- [33] Venkatasubramanian, C., Horn, M.W., Ashok, S., “Ion implantation studies on VO_x films prepared by pulsed dc reactive sputtering,” *Nuclear Instrument Methods Physical Research B*, **267**, 1476–1479, 2009.
- [34] Ulaş Kürüm, H. Gul Yaglioglu, Betül Küçüköz, R. Mustafa Oksuzoglu, Mustafa Yıldırım, A. Murat Yağcı, Sami Pakdemir and Ayhan Elmali, "Excited State Dynamics of Nanocrystalline VO₂ with White Light Continuum Time Resolved Spectroscopy," *Optics Communications*, **333**, 109-114, 2014.
- [35] Khan, K.A., Khan, M.S.R., “Preparation and properties of vanadium dioxide thermochromic thin films”, *Pramana*, **38**, 389–396, 1992.
- [36] Lopez, R., Boatner, L.A., Haynes, T. E., Feldman, L.C., Haglund, J.R.F., “Synthesis and characterization of size-controlled vanadium dioxide nanocrystals in a fused silica matrix”, *J. of App. Phys.*, **92**, 4031–4036, 2002.
- [37] Lopez, R., Haynes, T.E., Boatner, L.A., Feldman, L.C., Haglund, J.R.F., “Size effects in the structural phase transition of VO₂ nanoparticles”, *Phys. Rev. B.*, **65**, 1–5, 2002.
- [38] Borek, V.N.M., Qian, F., “Pulsed laser deposition of oriented VO₂ thin films on R-cut sapphire substrates”, *App. Phys. Let.*, **63**, 3288–3290, 1993.
- [39] Jang Woo Lee, Su Ryun Min, Han Na Cho, Chee Won Chung, “Effect of O₂ concentration on metal–insulator transition properties of vanadium oxide thin films prepared by radio frequency magnetron sputtering,” *Thin Solid Films*, **515**, 7740-7743, 2007.
- [40] Ramis Mustafa Öksüzoğlu, Pınar Bilgiç, Mustafa Yıldırım, Okan Deniz, ”Electrical and structural properties of pulsed dc reactive sputtered amorphous-nanocrystalline vanadium oxide thin films”, *Optics & Laser Technology*, **48**, 102-109, 2013.
- [41] B. G. Chae, D. H. Youn, H. T. Kim, S. Maeng, and K. Y. Kang, “Fabrication and Electrical Properties of Pure VO₂ Phase Films,” *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. **44**, No. 4, pp. 884~888, April 2004.
- [42] Xiaochun Wu, Fachun Lai, Limei Lin, Yongzeng Li, Lianghui Lin, Yan Qu, Zhigao Huang, “Influence of thermal cycling on structural, optical and electrical properties of vanadium oxide thin films,” *Applied Surface Science*, **255**, 2840–2844 2008.
- [43] Yuqiang Lv, Ming Hu, Miao Wu, Zhigang Liu, “Preparation of vanadium oxide thin films with high temperature coefficient of resistance by facing

- targets d.c. reactive sputtering and annealing process,” *Surface & Coating Technology*, **201**, 4969-4972, 2007.
- [44] R. D. Arnell, P. J. Kelly, “Recent advances in magnetron sputtering,” *Surface and Coatings Technology*, **112**, 170–176, 1999.
- [45] D. Brassard, S. Fourmaux, M. Jean-Jacques, J. C. Kieffer, A. A. El Khakani, “Grain size effect on the semiconductor-metal transition characteristic of magnetron-sputtered VO₂ thin films”, *Applied Physics Letter*, **87**, 051910, 2005.
- [46] Sun Jin Yun, Jung Wook Lim, Byung-Gyu Chae, Bong Jun Kim, Hyun-Tak Kim, “Characteristics of vanadium dioxide films deposited by RF-magnetron sputter deposition technique using V-metal target,” *Physica B*, **403**, 1381–1383, 2008.
- [47] F N Hooge, T G M Kleinpenning and L K J Vandamme Department, “Experimental studies on 1/f noise,” *Rep. Prog. Phys.*, **44**, 479, 1981.
- [48] F. N. Hooge, “1/f Noise Sources,” *Transactions on Electron Devices*, Vol. **41**, No. 11, pp. 1926-1935, November 1994.
- [49] Bryan Douglas Gaunnt, *The nano-composite of vanadium oxide thin films for use in infrared microbolometers*, Doctor of Philosophy, The Pennsylvania University, 2011.
- [50] V.Yu. Zerov, V. G. Malyarov, I. A. Khrebtov, “Dependence of current 1/f noise of VO_x films on their phase composition and structure”, *Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations(ICNF)*, 2001.
- [51] Nguyen Chi-Anh, Sung Moon, “Excess noise in vanadium tungsten oxide bolometric material Nguyen,” *Infrared Physics & Technology*, **50**, 38–41, 2007.
- [52] V. Yu. Zerov, Yu. V. Kulilov, V. G. Malyarov, I. A. Khrebtov, I. I. Shaganov, E.B. Shadrin, ” Vanadium Oxide Films with Improved Characteristic for IR Microbolometric Matrices,” *Technical Physics Letter*, Vol:**25**, No:5, 378-380, 2001.
- [53] Changhong Chen*, Xinjian Yi. Jing Zhang. Xingrong Zhao.”Linear uncooled microbolometer array based on VO_x thin films,” *Infrared Physics & Technology*, **42**, 87-90, 2001.

- [54] S. Martin, A. Dodabalapur, Z. Bao, B. Crone, H. E. Katz, W. Li, A. Passner, "Flicker noise properties of organic thin-film transistors," *Journal of Applied Physics*, **87**, 7, 2000.
- [55] M. Y. Tanrikulu, *An Uncooled Infrared Microbolometer Array Using Surface Micromachined MEMS Technology*, Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy, Middle East Technical University, Department of Electrical and Electronics Engineering, 2007.
- [56] P. W. Kruse and D. D. Skatrud "Uncooled Infrared Imaging Arrays and Systems," *Academic Press*, 1997.
- [57] U. Şenveli, *Development of High Thermal Performance Uncooled Infrared Detector Pixels with Enhanced Resistor Structures*, Master of Science Thesis, Middle East Technical University, 2010.
- [58] M. Kohin and N. Buttler, "Performance Limits of Uncooled VO_x Microbolometer Focal Plane Arrays," *Proceedings of SPIE*, Orlando, USA, Vol. **5406**, pp. 447–453, 2004.
- [59] Wasa, K., *Thin film materials technology*, William Andrew Publishing, 2004.
- [60] Ohring M., *The materials science of thin films*, Academic Press, London, 1992.
- [61] Schroder, D.K., *Semiconductor material and device characterization*, John Wiley and Sons Publication, New Jersey, A.B.D., 2006.
- [61] F. M. Smits, "Measurement of Sheet Resistivities with the Four-Point Probe," *Bell System Technical Journal*, Vol. **37**, Issue 3, pp. 711–718, May 1958.
- [62] H. A. Basantani, S. Kozlowski, Myung-Yoon Lee, J. Li, E. C. Dickey et al., "Enhanced electrical and noise properties of nanocomposite vanadium oxide thin films by reactive pulsed-dc magnetron sputtering," *Appl. Phys. Lett.*, **100**, 262108, 2012.
- [63] Vancoille, E., "A material oriented approach to the wear testing of Titanium Nitride based coatings for cutting tools," *Katholiek University Press*, 5-117, Lauen, 1993.
- [64] Lifshin, E., *X-ray chracterization of materials*, Wiley-VCH Publications, 1999.
- [65] Birkholz, M., *Thin film analysis by X-ray scattering*, Wiley-VCH Publications, Winheim, Almany, 2006.

- [66] Woolfson, M.M., *An introduction to X-ray crystallography*, Cambridge University Press, New York, A.B.D, 1997.
- [67] Stanglmeier, F., Lengeler, B., Weber, W., Göbel, H., Schuster, M., “Determination of the dispersive correction $f(E)$ to the atom from factor X-ray reflection”, *Acta Cryst.*, **48**, 626, 1992.
- [68] Venkatasubramanian C., *Preparation, Characterization and Post-Deposition Modification of Pulsed-DC Magnetron Sputtered Vanadium Oxide Thin Films for Microbolometer Applications*, Doctor of Philosophy Thesis, The Pennsylvania State University, Department of Engineering Science and Mechanics, December 2010.
- [69] Küçük S.E., *Development of High Fill Factor and High Performance Uncooled Infrared Detector Pixels*, Master of Science Thesis, Middle East Technical University, Department of Electrical and Electronics Engineering, September 2011.
- [70] A. Ahmed and R. N. Tait, “Noise Behavior of Amorphous GeSi_{1-x}O_y for Microbolometer Applications,” *Infrared Physics & Technology*, Vol. **46**, pp. 468-472, 2005.
- [71] A. Jahanzeb, C.M. Travers, Z. Celik-Butler, *IEEE Trans. Electron. Dev.* 44 (1997) 1795.
- [72] S. Sedky, P. Fiorini, M. Caymax, A. Verbiste, C. Baert, *Sens. Actuator A*, **66**, 193, 1998
- [73] H. Wada, M. Nagashima, *Proc. SPIE* 3379, **90**, 1998.
- [74] B.E. Cole, R.E. Higashi, R.A. Wood, *Proc. IEEE* 86 (8) (1998) 1679.
- [75] C. Chen, X. Yi, J. Zhang, X. Zhao, *Infrared Phys. Tech.* 42 (2001) 87.

Ek-1: INA 106 Datasheet



INA106



SBOS152A – AUGUST 1987 – REVISED OCTOBER 2003

Precision Gain = 10 DIFFERENTIAL AMPLIFIER

FEATURES

- ACCURATE GAIN: $\pm 0.025\%$ max
- HIGH COMMON-MODE REJECTION: 86dB min
- NONLINEARITY: 0.001% max
- EASY TO USE
- PLASTIC 8-PIN DIP, SO-8 SOIC PACKAGES

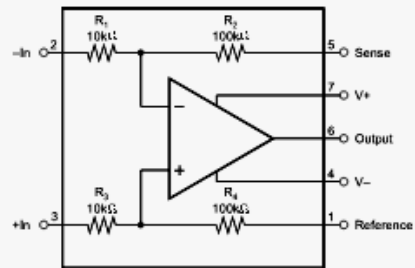
APPLICATIONS

- G = 10 DIFFERENTIAL AMPLIFIER
- G = +10 AMPLIFIER
- G = -10 AMPLIFIER
- G = +11 AMPLIFIER
- INSTRUMENTATION AMPLIFIER

DESCRIPTION

The INA106 is a monolithic Gain = 10 differential amplifier consisting of a precision op amp and on-chip metal film resistors. The resistors are laser trimmed for accurate gain and high common-mode rejection. Excellent TCR tracking of the resistors maintains gain accuracy and common-mode rejection over temperature.

The differential amplifier is the foundation of many commonly used circuits. The INA106 provides this precision circuit function without using an expensive resistor network. The INA106 is available in 8-pin plastic DIP and SO-8 surface-mount packages.



SPECIFICATIONS

ELECTRICAL

At +25°C, $V_S = \pm 15V$, unless otherwise specified.

PARAMETER	CONDITIONS	INA106KP, U			UNITS
		MIN	TYP	MAX	
GAIN					
Initial ⁽¹⁾			10		V/V
Error			0.01	0.025	%
vs Temperature			-4		ppm/°C
Nonlinearity ⁽²⁾			0.0002	0.001	%
OUTPUT					
Related Voltage	$I_O = +20mA, -5mA$	10	12		V
Rated Current	$V_O = 10V$	+20, -5			mA
Impedance			0.01		Ω
Current Limit	To Common		+40/-10		mA
Capacitive Load	Stable Operation		1000		pF
INPUT					
Impedance	Differential		10		kΩ
	Common-Mode		110		kΩ
Voltage Range	Differential	±1			V
	Common-Mode	-11			V
Common-Mode Rejection ⁽³⁾	$T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX}	86	100		dB
OFFSET VOLTAGE					
Initial	RTI ⁽⁴⁾		50	200	μV
vs Temperature			0.2		μV/°C
vs Supply	$\pm V_S = 6V$ to $18V$		1	10	μV/V
vs Time			10		μV/mo
NOISE VOLTAGE					
$f_B = 0.01Hz$ to $10Hz$	RTI ⁽⁵⁾		1		μVp-p
$f_O = 10kHz$			30		nV/√Hz
DYNAMIC RESPONSE					
Small Signal	-3dB		5		MHz
Full Power BW	$V_O = 20Vp-p$	30	50		kHz
Slew Rate		2	3		V/μs
Settling Time: 0.1%	$V_O = 10V$ Step		5		μs
0.01%	$V_O = 10V$ Step		10		μs
0.01%	$V_{CM} = 10V$ Step, $V_{DIFF} = 0V$		5		μs
POWER SUPPLY					
Rated			±15		V
Voltage Range	Derated Performance	+5		+18	V
Quiescent Current	$V_O = 0V$		±1.5	±2	mA
TEMPERATURE RANGE					
Specification		0		+70	°C
Operation		-40		+85	°C
Storage		-65		+150	°C

NOTES: (1) Connected as difference amplifier (see Figure 1). (2) Nonlinearity is the maximum peak deviation from the best-fit straight line as a percent of full-scale peak-to-peak output. (3) With zero source impedance (see "Maintaining CMR" section). (4) Includes effects of amplifiers' input bias and offset currents. (5) Includes effect of amplifier's input current noise and thermal noise contribution of resistor network.

EK-2: Elektriksel Gürültü Ölçümü Matlab Kodları

```
s=serial('COM1');
fopen(s);
s.BaudRate=19200;
Calibrate the instrument
fprintf(s,'*RST');
fprintf(s,'*CLS');
fprintf(s,':SENS:FUNC "VOLT"');
fprintf(s,':SENS:CHAN 1');
fprintf(s,':SENS:VOLT:CHAN1:RANG:AUTO ON');
fprintf(s,':SENS:VOLT:CHAN2:RANG:AUTO ON');
fprintf(s,':SENS:VOLT:CHAN1:RANG:UPP 0.01');
fprintf(s,':SENS:VOLT:CHAN2:RANG:UPP 0.01');
fprintf(s,':SENSe:VOLTage:NPLCycles0.02');
printf(s,':SENSe:VOLTage:APERture 0.0002'); % seconds
fprintf(s,':TRIG:DEL 0');
fprintf(s,':TRAC:POIN 1024');
fprintf(s,':TRAC:FEED SENS');
fprintf(s,':SAMPle:COUNt 1024');
fprintf(s,':DISPlay:ENABle OFF'); %increase speed(on ile tekrar ekranı açıyoruz.)
fprintf(s,':SENSe:VOLTage:CHANnel1:LPASs ON');%increase speed
fprintf(s,':SENSe:VOLTage:CHANnel2:LPASs ON');%increase speed
fprintf(s,':SENSe:VOLTage:CHANnel1:DFILter ON');%increase speed
fprintf(s,':SENSe:VOLTage:CHANnel2:DFILter ON');%increase speed
fprintf(s,':SENSe:VOLTage:DC:DFILter ON');%increase speed
fprintf(s,':SYST:FAZ OFF');
fprintf(s,':SYST:AZER OFF');
fprintf(s,':SYST:LSYN OFF');
fprintf(s,':SENSe:VOLTage:CHANnel1:REF:STAT ON');
fprintf(s,':SENSe:VOLTage:CHANnel2:REF:STAT ON');
fprintf(s,'*WAI');
fprintf(s,':READ?');
```

```

count = 1;
pause(2);
for q=1:2400
    time(count) = datenum(clock);
    fprintf(s,':READ?');
    voltage(count) = fscanf(s,'%f');
    count = count +1;
end
%raw to coloum convert datas for origin
alldatas=zeros(2400,1);
i=1;
for i=1:2400
    alldatas(i,1)=voltage(1,i);
end
x=alldatas;
raw to coloum convert time for origin
newtime=zeros(2400,1);
for i=1:2400
    newtime(i,1)=time(1,i);
end
x=alldatas/115000;
n=spectrum.periodogram;
Fs=48;
figure,psd(n,x,'Fs',48);
X=fft(x);
P=(abs(X).^2)/length(x)/Fs;
Fs=84;
psd2=dspdata.psd(P,'Fs',Fs);
figure,plot(psd2);
fprintf(s,':DISPlay:ENABle ON');
fprintf(s,'SYSTEM:LOCAL');
fclose(s);

```