



**VANADYUM OKSİT TABANLI KIZILÖTESİ DEDEKTÖR  
GELİŞTİRİLMESİ**

**Meltem DÖNMEZ KAYA**

**DOKTORA TEZİ  
İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2021**

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

.....

Meltem DÖNMEZ KAYA

04/01/2021

VANADYUM OKSİT TABANLI KIZILÖTESİ DEDEKTÖR GELİŞTİRİLMESİ  
(Doktora Tezi)

Meltem DÖNMEZ KAYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2021

ÖZET

Vanadyum oksit ( $VO_x$ ) bileşiklerinden  $VO_2$  ve  $V_2O_5$  formundaki ince filmler, dirençlerinin sıcaklık katsayısının yüksek olması sayesinde soğutmasız kızılötesi dedektörlerde aktif malzeme olarak tercih edilmektedir. Ayrıca  $VO_x$  filmleri Schottky diyot gibi elektronik aygıtların geliştirilmesinde de kullanılmaktadır. Fiziksel kaplama sistemleri ile polikristal olarak üretilebilen  $VO_x$  filmlerinin, düşük direnç ve direncin sıcaklık katsayısının yüksek değerde olacak şekilde elde edilmesi kaplama süreçlerinin geliştirilmesine bağlıdır. Bu tez çalışmasında magnetron püskürtme tekniği kullanılarak büyütme süreçlerinin optimizasyonu ile  $VO_x$  ince filmleri geliştirilerek karakterize edildi. Ayrıca kaplama sonrası ısıl etkinin filmlerin karakteristiklerine etkisi belirlendi. Bu kapsamda, ilk olarak, oda sıcaklığında, 30 mTorr çalışma basıncı altında n-Si ve korning cam alttaşlar üzerine 75 nm kalınlıklı  $V_2O_5$  ince filmler biriktirildi. Tavlama sıcaklığının filmler üzerindeki etkisini gözlemlemek amacıyla geliştirilen filmler 300 °C ve 500 °C'de tavlandı. Elde edilen filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri araştırıldı. Direnç ve direncin sıcaklık katsayısı açısından 500 °C'de tavlanan filmlerin avantajlı olduğu belirlendi. Bu veriler doğrultusunda 500 °C alttaş sıcaklığında ve 400 nm kalınlıklı  $V_2O_5$  filminin elektronik aygıt ve kızılötesi uygulamalar için uygun olduğu belirlendi. Geliştirilen bu filmin aygıt uygulamasına bir örnek olarak metal/ $V_2O_5$ /Si (metal: Al, Au ve Ti) Schottky diyotları üretilerek karakterize edildi. İkinci olarak, 350 °C alttaş sıcaklığında n-Si ve korning cam alttaşlar üzerine farklı kalınlıklarda ve farklı kaplama basınçlarında  $VO_2$  ince filmler üretildi. Yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özellikleri araştırıldı. Film kalınlığının ve kaplama basıncının filmler üzerine etkisini araştırmak üzere yapılan bu çalışmada uygun film kalınlığı ve kaplama basıncı sırasıyla 150 nm ve 10 mTorr olarak belirlendi. Geliştirilen filmlerin kızılötesi algılamaya uygunluğunu belirlemek hedefiyle, bir örnek olarak, kristalinitesi yüksek, iyi optik ve elektriksel özelliklere sahip, düzgün morfolojide olan  $VO_2$  ince filmi inter dijital olarak geliştirilen Au elektrotlar üzerine kaplanarak kızılötesi dedektör prototipi üretildi. Üretilen kızılötesi dedektörün TCR değerinin  $-1 \%K^{-1}$  civarında olduğu belirlendi. Elde edilen bu duyarlılığın ticari kızılötesi dedektörlerin özelliklerine oldukça yakın olduğu değerlendirildi. Araştırmalar sonucunda, ince filmlerin üretimi, aygıt üretim süreçlerinin optimizasyonu ve tasarım başarısı,  $VO_x$  ince film teknolojisine dayalı kızılötesi dedektör geliştirilmesinde ülkemize önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bilim Kodu : 20227

Anahtar Kelimeler : Vanadyum oksit ( $VO_x$ ), ince film, püskürtme sistemi, kızılötesi dedektör

Sayfa Adedi : 108

Danışman : Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAK

# DEVELOPMENT OF VANADIUM OXIDE-BASED INFRARED DETECTOR

(Ph. D. Thesis)

Meltem DÖNMEZ KAYA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2021

## ABSTRACT

Thin films form of  $\text{VO}_2$  and  $\text{V}_2\text{O}_5$  from vanadium oxide ( $\text{VO}_x$ ) compounds are preferred as an active material in uncooled infrared detectors due to their high temperature coefficient of resistance. In addition,  $\text{VO}_x$  films are used in the development of electronic devices such as Schottky diodes. Obtaining  $\text{VO}_x$  films, which can be produced as polycrystalline with physical coating systems, with low resistance and high temperature coefficient of resistance depends on the development of coating processes. In this thesis,  $\text{VO}_x$  thin films were developed and characterized by optimization of deposition processes using the magnetron sputtering technique. In addition, the effect of thermal effect on film characteristics after coating was determined. In this context, firstly, thickness of 75 nm  $\text{V}_2\text{O}_5$  thin films were deposited on n-Si and corning glass substrates at room temperature under 30 mTorr working pressure. The developed films to observe the effect of annealing on the films were annealed at 300 °C and 500 °C. The structural, morphological and optical properties of the obtained films were investigated in detail. It was determined that films annealed at 500 °C were advantageous in terms of resistance and temperature coefficient of resistance. Based on these data, it was determined that the  $\text{V}_2\text{O}_5$  film with 500 °C substrate temperature and 400 nm thickness is suitable for electronic device and infrared applications. As an example of the device application of this developed film, were characterized by producing metal/ $\text{V}_2\text{O}_5$ /Si (metal: Al, Au and Ti) Schottky diodes. Secondly,  $\text{VO}_2$  thin films were deposited with different thicknesses and different coating pressures on n-Si and corning glass substrates at 350 °C substrate temperature. The structural, morphological, optical and electrical properties were investigated. In this study conducted to investigate the effect of film thickness and coating pressure on films, the appropriate film thickness and coating pressure were determined as 150 nm and 10 mTorr, respectively. In order to determine the suitability of the developed films for infrared detection, as an example, an infrared detector prototype was produced by coating the  $\text{VO}_2$  thin film with high crystallinity, good optical and electrical properties and uniform morphology on Au electrodes developed interdigitally. It was determined that the TCR value of the infrared detector produced in the thesis was around -1 %  $\text{K}^{-1}$ . This sensitivity was evaluated to be very close to the characteristics of commercial infrared detectors. As a result of researches, it is thought that the production of thin films, optimization of device production processes and design success will make a significant contribution to our country in the development of infrared detectors based on  $\text{VO}_x$  thin film technology.

Science Code : 20227

Key Words : Vanadium oxide ( $\text{VO}_x$ ), thin film, sputtering system, infrared detector

Page Number : 108

Supervisor : Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAK

## TEŞEKKÜR

Öncelikle tez danışmanım değerli hocam Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAK'a doktora çalışmalarım süresince gözetimi, yönlendirmesi, desteği ve teşviki için teşekkür eder, sevgi ve saygılarımı sunarım.

Çok değerli sevgili hocam Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi müdürü Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e paha biçilmez rehberliği, motivasyonu, cesaretlendirmesi, güveni, anlayışı ve sonsuz desteği için en derin şükranlarımı sunarım. Onun bilgisi ve desteği olmadan bu çalışmayı tamamlayamazdım. Sonsuz saygı ve sevgilerimle.

Çalışmalarım süresince yardımlarıyla beni destekleyen, her zaman yanımda olan ve birlikte güzel işlere imza attığımız Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezindeki değerli hocalarım ve çalışma arkadaşlarımın her birine ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, her zaman yanımda olan, varlıklarına şükrettiğim canım aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

Desteğini ve sevgisini her zaman hissettiren değerli eşim, hayat arkadaşım Görkem Ali KAYA'ya sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez 2011K120290 no'lu "Fotonik Araştırma Merkezi" isimli ve 2016K121220 no'lu "Fotonik Uygulama ve Araştırma Altyapısının Geliştirilmesi" isimli T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı projeleri ile desteklenmiştir.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xx
1. GİRİŞ .....	1
2. KIZILÖTESİ DEDEKTÖRLER.....	5
2.1. Kızılötesi Işıma.....	5
2.1.1. Kara cisim ışıması.....	6
2.1.2. Atmosferik pencere .....	8
2.2. Foton Dedektörleri .....	10
2.3. Termal Dedektörler .....	11
2.3.1. Mikrobolometreler .....	11
2.3.2. Piroelektrik dedektörler.....	13
2.3.3. Termoelektrik dedektörler (Termopiller) .....	14
3. VANADYUM OKSİTLER (VO <sub>x</sub> ) VE ÖZELLİKLERİ .....	15
3.1. Termal Algılama Malzemesi Olarak Vanadyum Oksitlerin Kullanımı.....	15
3.2. Vanadyum Pentaoksit (V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ).....	16
3.2.1. Kristal yapısı, fiziksel özellikleri ve uygulama alanları.....	17

	<b>Sayfa</b>
3.3. Vanadyum Dioksit (VO <sub>2</sub> ) .....	18
3.3.1. Kristal yapısı, fiziksel özellikleri ve uygulama alanları .....	18
<b>4. İNCE FİLM TEKNOLOJİSİ</b> .....	<b>21</b>
4.1. VO <sub>x</sub> İnce Film Üretim Teknikleri.....	22
4.1.1. Magnetron püskürtme sistemi .....	22
4.1.2. Eş püskürtme sistemi .....	24
4.2. VO <sub>x</sub> İnce Film Karakterizasyon Teknikleri .....	26
4.2.1. X-ışınları kırınımı (XRD).....	26
4.2.2. Raman spektrometresi .....	28
4.2.3. İkincil iyon kütle spektrometresi (SIMS).....	29
4.2.4. X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) .....	30
4.2.5. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) .....	32
4.2.6. UV-Vis spektrometre .....	33
4.2.7. Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrometresi.....	34
4.2.8. Fotoluminesans (PL) Sistemi.....	35
4.2.9. Hall etkisi ölçüm sistemi .....	36
4.2.10. Akım-gerilim (I-V) ölçüm sistemi .....	37
4.3. VO <sub>x</sub> Kızılötesi Dedektörlerin Fabrikasyon Teknikleri .....	38
4.3.1. Lazer sistemi.....	38
4.3.2. Termal buharlaştırma sistemi .....	39
4.3.3. Hızlı ısı tavlama (RTA) sistemi .....	40
<b>5. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> İNCE FİMLERİN ÜRETİMİ</b> .....	<b>43</b>
5.1. Alttaş Hazırlama ve Temizleme İşlemi.....	43

	<b>Sayfa</b>
5.2. V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> İnce Filmlerin Eş Püskürtme Tekniği ile Üretimi .....	43
5.3. V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> İnce Filmlerin Magnetron Püskürtme Tekniği ile Üretimi .....	44
6. VO <sub>2</sub> İNCE FİMLERİN ÜRETİMİ .....	45
6.1. VO <sub>2</sub> İnce Filmlerin Eş Püskürtme Tekniği ile Üretimi .....	45
7. KIZİLÖTESİ DEDEKTÖR FABRİKASYONLARI .....	47
8. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....	49
8.1. Oda Sıcaklığında Geliştirilen V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> İnce Filmlerin Karakterizasyonları .....	49
8.1.1. Yapısal analizler .....	49
8.1.2. Morfolojik analizler .....	52
8.1.3. Optik analizler .....	54
8.1.4. Schottky diyot fabrikasyonu .....	56
8.1.5. Aygıt karakterizasyonları .....	57
8.2. 500 °C Alttaş Sıcaklığında Geliştirilen V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> İnce Filmlerin Karakterizasyonları .....	63
8.2.1. Yapısal analizler .....	63
8.2.2. Morfolojik analizler .....	67
8.2.3. Optik analizler .....	68
8.2.4. Elektriksel analizler .....	71
8.2.5. Schottky diyot fabrikasyonu .....	72
8.2.6. Aygıt karakterizasyonları .....	72
8.3. Geliştirilen VO <sub>2</sub> İnce Filmlerin Karakterizasyonları .....	75
8.3.1. Yapısal analizler .....	75
8.3.2. Morfolojik analizler .....	77
8.3.3. Optik analizler .....	78
8.3.4. Elektriksel analizler .....	82

	<b>Sayfa</b>
8.3.5. Kızılötesi dedektör fabrikasyonu .....	84
8.3.6. Kızılötesi dedektör karakterizasyonları.....	85
9. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	91
KAYNAKLAR .....	95
ÖZGEÇMİŞ .....	105



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Kızılötesi bölgelerin dağılımı .....	6
Çizelge 2.2. Dirençli mikrobolometre algılama malzemesinin istenilen özellikleri.....	13
Çizelge 3.1. Farklı vanadyum oksit fazlarının metal-yalıtkan geçiş sıcaklıkları.....	15
Çizelge 3.2. Farklı fazlarda VO <sub>2</sub> 'nin kristal yapıları ve örgü sabitleri .....	19
Çizelge 5.1. V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ince filmlerin bazı üretim parametreleri .....	44
Çizelge 5.2. V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ince filmlerin biriktirme parametreleri .....	44
Çizelge 6.1. VO <sub>2</sub> ince filmlerin biriktirme parametreleri.....	45
Çizelge 8.1. Numunelerin atomik konsantrasyonları.....	51
Çizelge 8.2. V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ince filmlerin morfolojik parametreleri .....	53
Çizelge 8.3. Üç farklı kontak için çeşitli metotlarla elde edilen elektriksel parametrelerin karşılaştırılması.....	61
Çizelge 8.4. V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ince filmlerin yapısal parametreleri.....	64
Çizelge 8.5. Farklı kalınlıklardaki V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ince filmlerin morfolojik parametreleri.....	68
Çizelge 8.6. Farklı yöntemlerden elde edilen elektriksel parametrelerin karşılaştırılması .....	74
Çizelge 8.7. VO <sub>2</sub> ince filmlerin AFM parametreleri.....	78
Çizelge 8.8. VO <sub>2</sub> ince filmlerin kalınlık ve kaplama basıncına bağlı özdirenç, taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilite değerleri .....	82
Çizelge 8.9. Üretilen VO <sub>2</sub> kızılötesi dedektörün TCR değerleri .....	89

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Kara cisim ışıması .....	6
Şekil 2.2. Kara cisimden farklı sıcaklıklarda yayılan elektromanyetik radyasyon spektrumları .....	8
Şekil 2.3. Atmosferik pencere.....	9
Şekil 2.4. Yarıiletkenlerde optik uyarılma .....	10
Şekil 2.5. Kesitsel mikrobolometre diyagramı .....	12
Şekil 2.6. Piroelektrik dedektörün şematik diyagramı .....	14
Şekil 2.7. Termoelektrik dedektörün şematik diyagramı .....	14
Şekil 3.1. VO <sub>5</sub> kare piramitlerinin yerleşimi .....	17
Şekil 3.2. V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 'in teknolojik uygulamala alanları.....	18
Şekil 3.3. VO <sub>2</sub> (M) ve VO <sub>2</sub> (R)'nin kristal yapısı.....	19
Şekil 3.4. VO <sub>2</sub> 'nin teknolojik uygulama alanları.....	20
Şekil 4.1. Bazı cisimlerin ölçüleri.....	21
Şekil 4.2. Magnetron püskürtme tekniğinin şematik gösterimi .....	23
Şekil 4.3. Eş-Püskürtme Sistemi şematik gösterimi .....	25
Şekil 4.4. Kristal düzlemlerinden X-ışınlarının saçılması.....	27
Şekil 4.5. Elektrotların desenleri ve ölçüleri .....	39
Şekil 8.1. Filmlerin XPS spektrumları a) genel tarama spektrumu b) V 2p ve O 1s çekirdek seviyelerinin dar tarama spektrumu c) C 1s çekirdek seviyesinin dar tarama spektrumu.....	50
Şekil 8.2. Geliştirilen her bir V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> filmi a) V ve b) O atomik dağılımlarının karşılaştırılması .....	52
Şekil 8.3. a) Tavlanmamış b) 300 °C'de tavlanmış c) 500 °C'de tavlanmış V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ince filmlerin 3x3 µm <sup>2</sup> tarama alanında üç boyutlu AFM görüntüleri .....	53
Şekil 8.4. a) Optik geçirgenlik spektrumları b) (ahv) <sup>1/2</sup> -hv grafiği.....	55

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 8.5. $V_2O_5$ ince filmlerin fotoluminesans spektrumları .....	56
Şekil 8.6. Geliştirilen aygıtın şematik diyagramı.....	57
Şekil 8.7. Oda sıcaklığında diyot örneklerinin I–V grafiği .....	58
Şekil 8.8. Diyot örneklerinin F(V)–V grafiği .....	59
Şekil 8.9. $dV/d\ln(I)$ -akım (I) grafiği .....	60
Şekil 8.10. H(I)-akım (I) grafiği .....	60
Şekil 8.11. Kapasitans - voltaj (V) grafiği.....	62
Şekil 8.12. Kondüktans - voltaj (V) grafiği .....	62
Şekil 8.13. $V_2O_5$ ince filmlerin XRD desenleri .....	64
Şekil 8.14. $V_2O_5$ ince filmlerin Raman spektrumları.....	65
Şekil 8.15. $V_2O_5$ ince filmlerin XPS spektrumları.....	66
Şekil 8.16. $V_2O_5$ ince filmlerinin AFM görüntüleri a) 100 nm kalınlıklı, b) 200 nm kalınlıklı c) 300 nm kalınlıklı ve d) 400 nm kalınlıklı .....	67
Şekil 8.17. Farklı kalınlıklardaki $V_2O_5$ ince filmlerin geçirgenlik spektrumları.....	69
Şekil 8.18. Farklı kalınlıklardaki $V_2O_5$ ince filmlerin Tauc eğrileri.....	69
Şekil 8.19. Farklı kalınlıklardaki $V_2O_5$ ince filmlerin FTIR spektrumları.....	70
Şekil 8.20. Oda sıcaklığında kalınlıklara bağlı olarak $V_2O_5$ ince filmlerin direnci, taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilitesi .....	71
Şekil 8.21. a) Ti/ $V_2O_5$ /n-Si/Al aygıtının şematik diyagramı b) Üretilen Schottky elektrotları .....	72
Şekil 8.22. Oda sıcaklığında diyotun I–V karakteristiği .....	73
Şekil 8.23. Diyot için F(V) - V, $dV/d\ln(I)$ - I ve H(I) - I eğrileri .....	74
Şekil 8.24. 100 nm kalınlıklı $VO_2$ ince filmlerin XPS spektrumları.....	76
Şekil 8.25. 150 nm kalınlıklı $VO_2$ ince filmlerin XPS spektrumları.....	76
Şekil 8.26. Farklı kalınlıklardaki $VO_2$ ince filmlerin AFM görüntüleri a) 100 nm b) 150 nm.....	77

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 8.27. VO <sub>2</sub> ince filmlerin UV-Vis geçirgenlik spektrumları.....	79
Şekil 8.28. 100 nm kalınlıklı VO <sub>2</sub> ince filmlerin FTIR spektrumları .....	80
Şekil 8.29. 150 nm kalınlıklı VO <sub>2</sub> ince filmlerin FTIR spektrumları .....	81
Şekil 8.30. 100 nm kalınlıklı VO <sub>2</sub> ince filmlerin kaplama basıncına bağlı özdirenç, taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilite değerleri .....	83
Şekil 8.31. 150 nm kalınlıklı VO <sub>2</sub> ince filmlerin kaplama basıncına bağlı özdirenç, taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilite değerleri .....	83
Şekil 8.32. Üretilen VO <sub>2</sub> kızılötesi dedektörün oda sıcaklığında a) doğrusal b) yarı-logaritmik I-V karakteristiği.....	86
Şekil 8.33. Üretilen VO <sub>2</sub> kızılötesi dedektörün 300 K-380 K sıcaklık aralığında a) doğrusal b) yarı-logaritmik I-V karakteristiği .....	87
Şekil 8.34. Üretilen VO <sub>2</sub> kızılötesi dedektörün direnç-sıcaklık eğrisi .....	88
Şekil 8.35. Üretilen VO <sub>2</sub> kızılötesi dedektörün voltaja bağlı TCR grafiği.....	88

## RESİMLERİN LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 2.1. a) Foton algılama ve b) termal algılama mekanizması .....	5
Resim 4.1. Magnetron Püskürtme Sistemi (BesTec) .....	23
Resim 4.2. Eş Püskürtme Sistemi (Nanovak NVTS-500) .....	25
Resim 4.3. XRD cihazının genel görünümü .....	27
Resim 4.4. Konfokal Raman spektrometresi (Witec Alpha 300R) .....	29
Resim 4.5. SIMS sistemi (Hiden Analytical) .....	30
Resim 4.6. XPS sistemi (Omicron) .....	31
Resim 4.7. AFM sistemi (NanoMagnetics) .....	33
Resim 4.8. UV-Vis spektrometresi (Perkin Elmer Lambda 2S) .....	34
Resim 4.9. FTIR sistemi (Bruker Vertex 80) .....	35
Resim 4.10. Fotoluminesans sistemi (Jobin-Yvon Florog-550) .....	36
Resim 4.11. Hall etkisi ölçüm sistemi (Lake Shore) .....	36
Resim 4.12. Akım-gerilim (I-V) ölçüm sistemi (Keithley 4200) .....	37
Resim 4.13. Lazer sistemi (Rofin-EasyMark) .....	38
Resim 4.14. Termal buharlaştırma sistemi (BesTec) .....	40
Resim 4.15. Hızlı ısı tavlama (RTA) sistemi .....	40
Resim 7.1. İnterdijital elektrotlu tasarlanan VO <sub>x</sub> tabanlı kızılötesi dedektörler .....	47
Resim 8.1. Üretilen VO <sub>2</sub> kızılötesi dedektör .....	84

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>Au</b>	Altın
<b>Al</b>	Alüminyum
<b>Ar</b>	Argon
<b><math>\alpha</math></b>	Soğurma katsayısı
<b>Å</b>	Angstrom
<b>°C</b>	Santigrat derece
<b><math>E_g</math></b>	Yasak enerji aralığı
<b><math>e^-</math></b>	Elektron
<b>eV</b>	Elektron volt
<b><math>\Phi_B</math></b>	Bariyer yüksekliği
<b>h<math>\nu</math></b>	Foton enerjisi
<b>I</b>	Akım
<b><math>I_0</math></b>	Doyum akımı
<b>I-V</b>	Akım-gerilim
<b>K</b>	Kelvin
<b>k.b.</b>	Keyfi birim
<b><math>k_B</math></b>	Boltzman sabiti
<b><math>\lambda</math></b>	Dalgaboyu
<b><math>\mu\text{m}</math></b>	Mikrometre
<b>N</b>	Azot
<b>n</b>	İdealite faktörü
<b>nm</b>	Nanometre
<b>O<sub>2</sub></b>	Oksijen
<b>R</b>	Direnç
<b>R<sub>s</sub></b>	Seri direnç
<b>Si</b>	Silisyum
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Silisyum dioksit

**Simgeler****Açıklamalar**

$\theta$	Gelme açısı
T	Sıcaklık
Ti	Titanyum
V	Gerilim
VO <sub>2</sub>	Vanadyum dioksit
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Vanadyum pentaoksit
W	Watt

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
DC	Doğru akım
FTIR	Fourier dönüşümlü kızılötesi
FWHM	Pik yarı genişliği
IL	Yalıtım tabakası
IR	Kızılötesi
MIS	Metal yalıtkan yarıiletken
MOS	Metal oksit yarıiletken
PL	Fotoluminesans
RF	Radyo frekansı
RMS	Karekök ortalama
RTA	Hızlı ısı tavlama
SIMS	İkinci iyon kütle spektrometresi
TCR	Direnç sıcaklık katsayısı
UV	Morötesi
UV-Vis	Morötesi-görünür bölge
Vis	Görünür
XPS	X-ışını fotoelektron spektroskopisi
XRD	X-ışınları kırınımı

## 1. GİRİŞ

Karanlık veya belirsiz görünürlük gibi çeşitli olumsuz koşullarda görme yeteneği, daima insanlık için bir arzu olmuştur. Bu arzunun temel sebebi, insanların gün ışığında yaptığı her şeyi karanlık veya belirsiz görünürlük durumlarında da yapabilmek istemesidir. Gün ışığı çevredeki nesnelere yansıtılır ve yansıyan bu ışık gözler ve beyin tarafından görüntüye dönüştürülür. Yani gözlerin ve beynin görebilmesi için gözlenen hedeften bir tür bilginin gelmesi gerekmektedir. Karanlıkta bu bilgi farklı yollarla gelebilir. İlk yol, hedefin yapay bir ışık kaynağı tarafından aydınlatılmasıdır. Ancak, özellikle askeri uygulamalarda her zaman gözlenen hedef aydınlatılmak istenmez. İkinci yol, hedef tarafından yayılan ışımının tespitidir. Bu olay, kızılötesi görüntüleme olarak bilinir. O K'nin üzerinde herhangi bir sıcaklığa sahip olan her şey kızılötesi ışımaya yayılır ve bu ışımaya hedefi görmek için kullanılabilir. Kızılötesi görüntüleme için birçok teknolojik uygulama vardır. Tüfek dürbünleri, füze arama, akıllı mühimmat gibi askeri alanda oldukça önemli uygulamalara sahiptir [1-4]. Ayrıca, sürücünün gece görüşünün iyileştirilmesi, yangınla mücadele, tahribatsız testler, tıbbi görüntüleme gibi çeşitli sivil uygulamaları da bulunmaktadır [5-8]. Son birkaç yılda termal görüntüleme daha birçok ticari uygulamaya girmiştir. Bu uygulamaların çoğu, soğutulmamış dedektörlü ve düşük maliyetli bir ürün gerektirir.

Kızılötesi görüntüleme için soğutulmamış termal dedektörler, yıllardır araştırma ve geliştirme konusu olmuştur ve son yıllarda önemli gelişmeler göstermiştir [9-11]. Hassasiyetleri soğutulmuş dedektörler kadar yüksek olmasa da, soğutulmuş dedektörlere kıyasla düşük maliyetleri ve ayrıca taşınabilirliği onları çeşitli kızılötesi görüntülemeler için ideal kılar [12]. Mikrobolometreler, elektromanyetik radyasyonu absorbe ederek sıcaklık artışına neden olan, dolayısıyla direnci değiştiren soğutulmamış termal görüntüleme cihazlarından biridir [13-15]. Kızılötesi absorpsiyona bağlı olarak sıcaklığa göre malzemenin direnç değişimini tanımlayan ilişki, direnç sıcaklık katsayısı (TCR) olarak adlandırılır ve  $TCR = (1/R) (dR/dT)$  ile verilir. Burada, R direnç, T ise sıcaklıktır. Sıcaklığa bağlı direnç değişikliği sergileyen herhangi bir malzemeden bir bolometre yapılabilir. Fakat bolometrede kullanılacak algılama malzemesi aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır [16-18]:

- Kızılötesi radyasyonu absorbe edebilirliğe
- Yüksek TCR'ye
- Orta derecede dirence
- Düşük gürültüye ve tercihen devre üretim teknolojisi ile işlem uyumluluğuna

Bu özellikler arasında bolometrik bir malzemenin en önemli özelliği ise direnç sıcaklık katsayısı yani TCR dir [19]. Bolometrik malzemeler metaller ve yarıiletkenler olarak iki ana kategoriye ayrılabilir. Ayrıca yarıiletkenlerde kendi içerisinde katkılı ve katkısız olarak sınıflandırılabilir. Mikrobolometre gelişiminin ilk evrelerinde metaller bolometrik malzemeler olarak kullanılmıştır. Metallerin direnç sıcaklık katsayısı  $TCR < 0,5\%/K$ 'dir ve bu değer, yarıiletkenler için bildirilen değerlerden çok daha düşüktür. Çoğunlukla kullanılan metaller Platin (Pt) ve Titanyum (Ti) olarak karşımıza çıkmaktadır [20-23]. Yarıiletkenler yüksek TCR sergiler ve bu nedenle yarıiletkenlerle elde edilen bolometrelerde duyarlılık ve algılayıcılık metallerle elde edilen bolometrelere göre daha yüksektir. Yarıiletkenler genellikle negatif TCR'ye sahiptir. Sıcaklık oda sıcaklığının (300 K) üzerine çıktıkça  $n$  ve  $p$  artarak  $\rho$ 'nun azalmasına neden olur. Dolayısıyla, yarıiletkenlerin direnci sıcaklıktaki artışla azalır ve TCR'yi negatif yapar [24]. En yaygın kullanılan yarıiletken bolometrik malzemeler vanadyum oksit ( $VO_x$ ) ve amorf silikondur (a-Si) [25]. SiGe, Ge-Si-O, V-W-O, YBaCuO ve manganitler gibi alternatif bolometrik malzemeler kullanılarak dirençli mikrobolometreleri uygulama çabaları da vardır [26]. Ancak, bunların arasında, katkılı veya katkısız  $VO_x$ , düşük  $1/f$  gürültüsü, yüksek TCR'si ve diğerlerine göre düşük direnci nedeniyle en uygun olanı gibi görünmektedir [27].

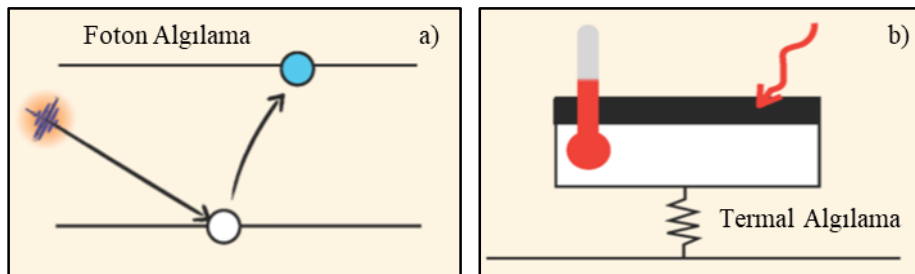
$VO_x$  filmlerin direnç değişimi ve optik özellikleri imalat koşullarına ve sonuçta ortaya çıkan stokiyometriye bağlıdır. Diğer bir deyişle, vanadyum oksit fazlarının kristalliği ve içeriği, ince filmin performansında önemli rol oynar.  $VO_x$  ince filmler, püskürtme, fiziksel buhar biriktirme, lazer biriktirme, kimyasal buhar biriktirme ve sol-jel yöntemi gibi çeşitli yöntemlerle üretilebilir [28]. Bu teknikler arasında püskürtme yöntemi, diğerlerine göre çeşitli avantajları nedeniyle dikkat çekmektedir. Teknik olarak bu yöntem hem ucuz hem de basit bir yöntemdir, biriktirme parametrelerinin kontrol edilebilirliği ve sağlanan iyi yüzey düzgünlüğü üretilen film kalitesine avantaj sağlar [29].

Sonuç olarak, bu tez çalışmasının amacı, yüksek performanslı vanadyum oksit ince filmleri püskürtme sistemi ile geliştirmek ve geliştirilen filmlerin mikrobolometre üretim teknolojisinde kullanılabilirliğini test etmek olarak belirlenmiştir. Bu tezin *2.bölümü*'nde kızılötesi ışımaya ve kızılötesi dedektörler hakkında daha ayrıntılı açıklamalar verilmektedir. *3.Bölüm*'de Vanadyum oksitler hakkında genel bilgiler,  $V_2O_5$  ve  $VO_2$  metal oksit yarıiletkenlerinin yapısı, özellikleri ve kullanım alanları ile ilgili bilgiler sunuldu. Tezin *4. Bölümü*'nde tez kapsamında üretilen ince filmlerin karakterizasyon teknikleri ve analiz sistemleri, *5. ve 6. Bölüm*'de ise  $V_2O_5$  ve  $VO_2$  ince filmlerin geliştirilmesi ve üretim süreçleri sırasıyla detaylı bir şekilde anlatıldı. Tezin *7. Bölüm*'nde  $VO_x$  tabanlı kızılötesi dedektör fabrikasyonları anlatıldı. Tez kapsamında Ar-Ge çalışmaları sonucunda üretilen ince filmlerin karakterizasyonları ve  $VO_x$  tabanlı kızılötesi dedektörlerin çıktı parametreleri *8. Bölüm*'de verildi. Elde edilen sonuçların değerlendirildiği ve önerilerin yapıldığı kısım ise tezin son kısmı olan *9. Bölüm*'ü oluşturmaktadır.



## 2. KIZILÖTESİ DEDEKTÖRLER

Kızılötesi dedektör, görüntü oluşturmak için elektromanyetik radyasyon sinyalini elektrik sinyaline dönüştürebilen bir cihazdır. Kızılötesi dedektörler çalışma prensiplerine göre, genel olarak iki tipte sınıflandırılabilir: Foton dedektörleri ve termal dedektörler [30,31]. Bu iki tip dedektör arasındaki temel fark gelen ışının soğurucu malzemeyi nasıl etkilediğidir. Bir foton detektöründe, emilen radyasyon malzeme içindeki elektronik geçişleri harekete geçirir ve bir şekilde değişen elektronik enerji dağılımından dolayı elektriksel çıkış sinyali gözlemlenir [32]. Başka bir ifadeyle, artan serbest taşıyıcı yoğunluğu, malzemenin direncinde bir değişime neden olur ve bir sinyal elde edilir. Foton dedektörleri, termal olarak indüklenen geçişleri azaltmak için genellikle oda sıcaklığının altına soğutulur. Tüm dalgaboylarında en hassas kızılötesi dedektörler, genellikle foton dedektörleri kategorisine girer [33]. Bir termal dedektörde, gelen radyasyon emilir ve malzemenin sıcaklığını değiştirir, malzemenin bazı özelliklerinde oluşan değişiklik sinyal olarak gözlemlenir. Termal dedektörler, uzak kızılötesi algılama için bile genellikle oda sıcaklığında çalıştırılır, fakat foton dedektörlerinden daha az hassasiyete sahiptir [34].



Resim 2.1. a) Foton algılama ve b) termal algılama mekanizması [35]

### 2.1. Kızılötesi Işıma

İnsan gözü, görünür aralıktaki radyasyonu görme yeteneğine sahiptir. Gün ışığında insan gözü, güneş ışığının nesnelere yansımaları ile nesnelere çoğunu görebilir. Termal radyasyon dedektörleri, kızılötesi bölgedeki insan gözüyle görülemeyen radyasyonu algılayabilir. Kızılötesi bölgenin anlaşılması, bu bölgedeki insan gözüyle görülemeyen ışımaların tespit edilmesi ve cisimlerin görüntülenmesi açısından oldukça önemlidir. Kızılötesi bölge sınıflandırmaları Çizelge 2.1’de verilmiştir.

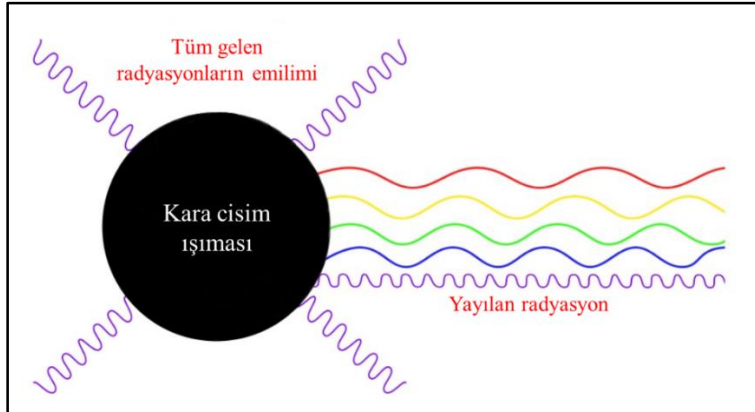
Çizelge 2.1. Kızılötesi bölgelerin dağılımı

Kızılötesi Bölge	Dalga Boyu Aralığı ( $\mu\text{m}$ )
Yakın Kızılötesi (NIR)	0.7 - 1
Kısa Dalga Boyu Kızılötesi (SWIR)	1 - 3
Orta Dalga Boyu Kızılötesi (MWIR)	3 - 5
Uzun Dalga Boyu Kızılötesi (LWIR)	8 - 12
Çok Uzun Dalga Boyu Kızılötesi (VLWIR)	12 - 25
Uzak Kızılötesi (FIR)	> 25

Kızılötesi ışımayı daha iyi anlayabilmek için, kara cisim ışımasını ve kızılötesi atmosferik pencere kavramını incelemek faydalı olacaktır.

### 2.1.1. Kara cisim ışıması

Tüm cisimler sıcaklıklarının bir sonucu olarak radyasyon yayar. Oda sıcaklığında, yayılan radyasyonun hemen hemen hepsi elektromanyetik spektrumun kızılötesi kısmında olduğu için, bir nesne kendinden ışıklı görünmez. Termal radyasyon olarak bilinen, diğer tüm cisimlere oranla aynı sıcaklıkta en fazla enerji yayan cisme kara cisim denir. Kara cisim, üzerine düşen tüm termal radyasyonu emen bir cisim olarak tanımlanır [36]. Bu nedenle oda sıcaklığında siyah görünen bir cisimdir. Ancak, kara cismin emdiği enerji bir şekilde serbest bırakılmalıdır. Kara cisim çevre ile termal dengede olduğunda, emilen enerjinin elektromanyetik dalgalar şeklinde yayılması gerekir.



Şekil 2.1. Kara cisim ışıması [37]

Aslında gerçekte mükemmel bir kara cisim yoktur. Bundan dolayı kara cisim ışımasının fiziksel anlamını en iyi şekilde açıklayabilmek için mükemmel soğurucu ve yayıcı olan bir cisim düşünülmelidir. Örneğin, termal olarak iletken bir malzemedan yapılmış, herhangi bir yerinde küçük bir delik olan tamamen kapalı bir kutu, kara cisim olarak kabul edilebilir. Delikten kutuya giren ışık, kutunun duvarlarına çarparak ve sonunda delikten çok az kaçma şansı ile tamamen emilecektir. Kutu ısıtıldığında, kutunun deliğinden çıkan elektromanyetik dalgalar, ideal bir kara cisimden gelenlere neredeyse mükemmel bir şekilde benzeyecektir [38]. Kara cisimlerin radyasyon spektrumunun, yalnızca kara cismin bulunduğu sıcaklığa bağlı olduğu bilim adamları tarafından gözlemlenmiştir. Spektrumda, sıcaklığın azalmasıyla birlikte ışınım eğrisinin zirvesi düşük şiddetlere ve yüksek dalga boylarına doğru kayar. Genel olarak ifade edilirse, kara cisim ideal bir elektromanyetik ışınım kaynağıdır. Kara cismin yayılan dalga boyu spektrumu uzun süre açıklanamadı ve enerjinin sürekli olarak dağıtılacağı varsayıldı. Fizikçi Max Planck, kara cisim radyasyonunu matematiksel olarak tanımlamayı farklı enerji seviyelerini tanıtarak başardı. Sıcaklığa ve dalga boyuna bağlı olarak elektromanyetik ışınım şiddetinin spektral dağılımı (R), Planck Yasası ile verilir [39].

$$R(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (2.1)$$

Eşitlikte; dalga boyu  $\lambda$ , kara cisim sıcaklığı T, vakum ortamındaki ışık hızını c, Planck sabiti h ve Boltzmann sabiti k ile ifade edilmektedir. Şekil 2.1'de kara cisim ışınım grafiği görülmektedir.

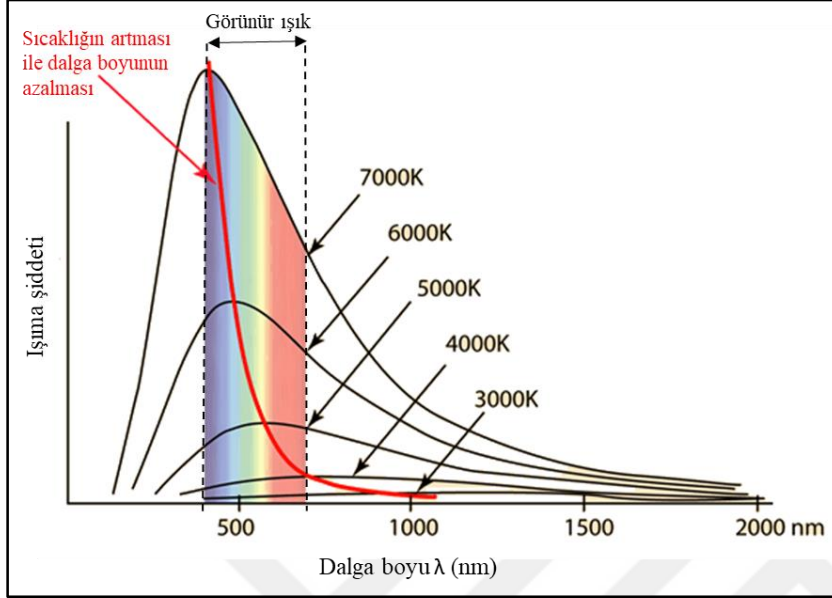
Eş. 2.1'den elde edilen yayılan toplam enerji, geniş bir spektrumda ( $\lambda = 0$  ve  $\lambda = \infty$ ) verilirse, Stefan-Boltzmann Yasası elde edilir. Bu yasa, bir yüzeyden yayılan toplam ışınım miktarının mutlak sıcaklığının dördüncü kuvveti ile orantılı olduğunu ifade eder [40].

$$R(T) = \sigma T^4 \quad (2.2)$$

Stefan-Boltzmann sabiti ( $\sigma$ )  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^2)$ 'dir. Maksimum spektral dağılım ise Wien Kayma Yasası ile ifade edilir [41].

$$\lambda_{\text{maksimum}}(T) = \frac{2898}{T} \mu\text{m} \quad (2.3)$$

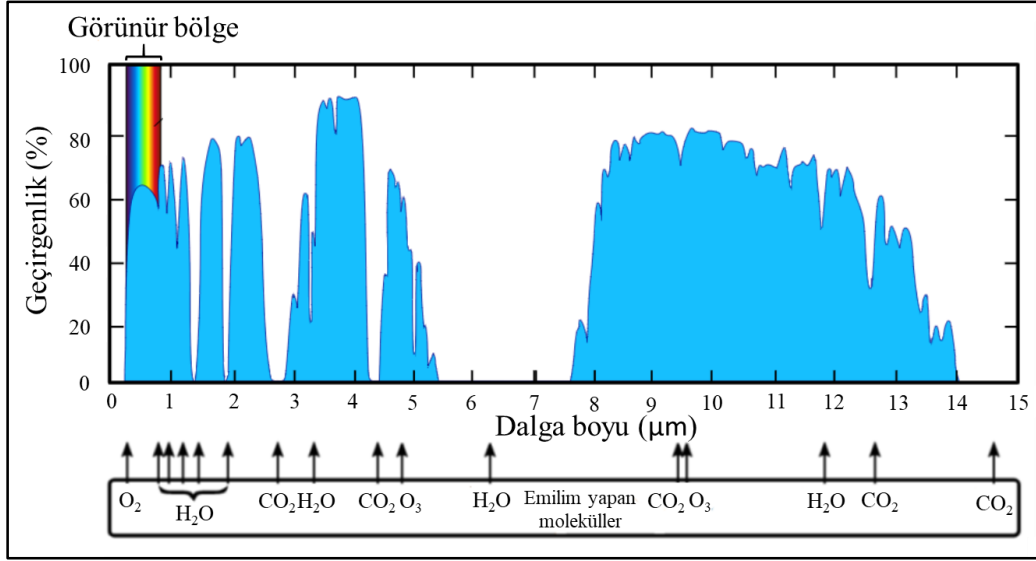
Kara cisim ışıması aynı zamanda güneşin bir modellemesi olduğundan oldukça önemlidir [42].



Şekil 2.2. Kara cisimden farklı sıcaklıklarda yayılan elektromanyetik radyasyon spektrumları [43]

### 2.1.2. Atmosferik pencere

Dünya'nın atmosferi hiçbir şekilde elektromanyetik radyasyona tamamen şeffaf değildir, çünkü elektromanyetik radyasyonun atmosfer içerisinden geçişine önemli engeller bulunmaktadır. Kaynağı güneş olan elektromanyetik radyasyon atmosferden geçerken farklı parçacıklar ile etkileşime girer. Bu etkileşimler saçılmalar ve yutulmalar şeklinde olabilir. Her iki etkileşim türünde de enerji izlediği yol boyunca azalmaktadır ve bu olaylar atmosferik zayıflama olarak adlandırılmaktadır. Atmosferin içerisindeki parçacıklar saçılmalara, atmosferi oluşturan gaz molekülleri ise soğurulmalara sebebiyet verirler. Elektromanyetik ışınım ya da diğer bir ifadeyle radyasyon parçacıklarla etkileşime girdiğinde saçılmalar meydana gelir ve ışınımın yönü değişir. Ozon (O<sub>3</sub>), karbondioksit (CO<sub>2</sub>) ve su buharı (H<sub>2</sub>O) elektromanyetik ışınımı yutan en yaygın moleküllerdir. Bu moleküllerin yutamadığı veya soğurmadığı belirli dalga boylarındaki ışınım atmosfer içerisinde yayılarak ilerleyebilmektedirler. Soğurulmadan kalan bu dalga boyu bölgeleri, “atmosferik pencere” olarak tanımlanmaktadır [44].



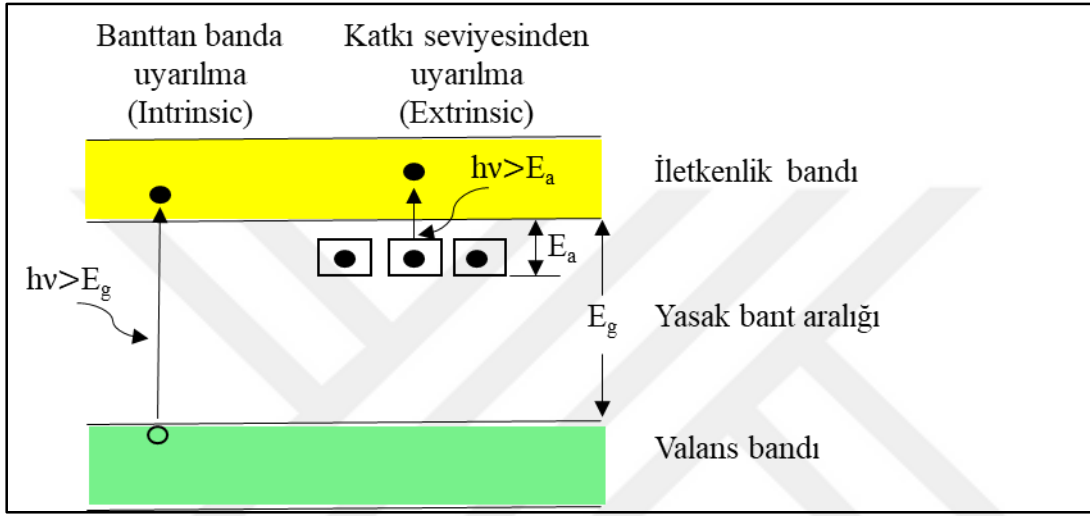
Şekil 2.3. Atmosferik pencere [45]

Bu grafiğe bakıldığında eğrinin altında kalan alanlar atmosferik pencereleri belirtmektedir. Bu bölgelerde enerji, moleküllerle etkileşmeden ve yutulmadan atmosfer içerisinde ilerlemektedir. Uzaktan algılamada, elektromanyetik spektrumun bir kısmının kullanılıp diğer kısmının kullanılmamasının sebebi, atmosferik pencere incelenerek anlaşılabilir. Atmosferik pencere irdelendiğinde, atmosfer tarafından geçişi engellenen ışıklardan görüntü oluşmayacağı için uzaktan algılamada tüm spektrum kullanılmaz.

Atmosferik iletim, dünyadaki tüm kızılötesi uygulamaları için bir zorunluluktur. Kızılötesi radyasyonu geniş bir aralığa sahip olmasına rağmen, kızılötesi dedektörlerin tasarlandığı en yaygın pencereler, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi bu dalga boyu bölgelerinde atmosferin yüksek kızılötesi ışık geçirgenliği nedeniyle 1-5 µm ve 8-12 µm'dir [46]. Şekilde görüldüğü gibi, bazı alt bölgelerde geçirgenlik neredeyse sıfırdır ve kızılötesi tespitini ulaşılamaz hale getirir ve bazı alt bölgelerde ise yüksek kızılötesi tespitini dedektör için kullanılabilir hale getirir.

## 2.2. Foton Dedektörleri

Foton dedektörlerinde gelen radyasyon, kafes atomlarına veya saf olmayan atomlara bağlı elektronlarla veya serbest elektronlarla etkileşime girerek materyal içinde emilir. Gözlemlenen elektriksel çıkış sinyali, değiştirilen elektronik enerji dağıtımından kaynaklanır. Yarıiletkenlerdeki temel optik uyarma süreçleri Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Yarıiletkenlerde optik uyarılma

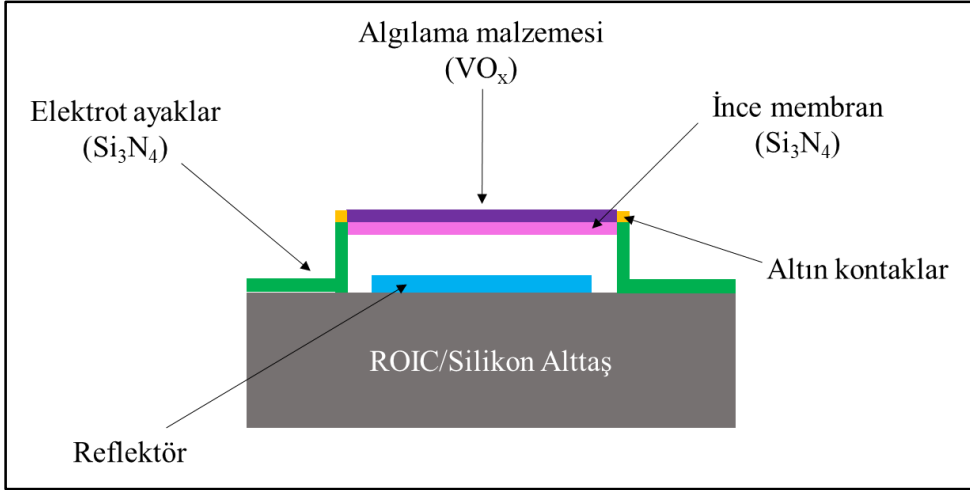
Dedektörün sıcaklığı, bant aralığı boyunca termal olarak uyarılmış taşıyıcıların sayısının daha az önemli olması için yeterince düşük olmalıdır. Düşük sıcaklığı korumak için soğutma sistemi gereklidir, bu da sistem maliyetini artırır. Genel olarak, foton dedektörlerinin hassasiyeti, spektral soğurmaya ve foto uyarıma bağlıdır. Foton dedektörü uygulamaları, iletişim, endüstriyel kalite kontrolü, optik görüntü, izleme, gözetim ve askeri gibi önemli alanlarda geniş bir yelpazeye sahiptir [47-49]. Uygulamalar için gereklilikler önemli ölçüde değiştiğinden, belirli bir durumda uygun olabilecek; fotoiletken, p-n eklem, p-i-n, Schottky bariyer, metal-yarıiletken-metal (MSM) gibi çok fazla foton dedektör tipi vardır [50].

### 2.3. Termal Dedektörler

Termal dedektörler, foton dedektörlerinden farklı olarak, gelen radyasyonun neden olduğu sıcaklıktaki değişikliği algılayarak çalışırlar. Sıcaklıktaki değişiklik, malzemenin bazı ölçülebilir özelliklerinde bir değişikliğe neden olur. Termal dedektörlerin temel avantajı, herhangi bir kriyojenik soğutmaya gerek duymadan oda sıcaklığında çalışabilmeleridir. Çoğu termal dedektör, uzak ve aşırı kızılötesi aralıkta bile soğutma gerektirmez. Bu, onları spektral seçiciliğin kritik olmadığı uygulamalar için çok uygun hale getirir. Ek olarak, termal dedektörler genellikle silisyum (Si) uyumlu teknolojiler kullanılarak üretildiğinden, işleme devreleriyle entegrasyonu yani uyumluluğu mükemmeldir. En yaygın kullanılan termal dedektörler; dirençli bolometreler, piroelektrik dedektörler ve termoelektrik dedektörlerdir [51]. Mikrobolometre dedektörleri artık diğer tüm kızılötesi teknolojilerinden daha büyük oranlarda üretilmektedir. Şu anda, VO<sub>x</sub> tabanlı mikrobolometre dedektörleri, soğutmasız dedektörler için en çok kullanılan teknolojidir [52-54].

#### 2.3.1. Mikrobolometreler

Mikrobolometrelerin çalışma prensibi, kızılötesi radyasyonunun soğurulmasıyla birlikte sıcaklık değişiminden kaynaklanan direnç değişimidir. Kızılötesi aktif alan, gelen radyasyonu emer ve direnç değişikliği; ön gerilim akımı ve voltaj değişikliği ile tespit edilir. Mikrobolometrelerin temel özelliklerinden biri, yapıları oluşturmak için kullanılan yüzey mikro işleme teknikleridir. Mikrobolometreler, termopillerden daha pahalıdır, ancak soğutmalı foton dedektörlerinden çok daha ucuzdur. Isınma süresi nedeniyle dedektör tepki süreleri foton dedektörlerinin tepki süresine göre daha uzundur. Oda sıcaklığında çalışabilirler ve bu dedektörler soğutulmaya gerek duymazlar. Bu dedektörler, foton dedektörlerinden daha az güç tüketirler ve çalışma süreleri foton dedektörlerine kıyasla nispeten daha uzundur. Dedektörün performansı, geometrik ve optik tasarıma, üretim tekniklerine, izolasyon kalitesine, entegrasyon devresinin okunmasına (ROIC) ve sıcaklık algılama malzemesinin özelliklerine bağlıdır.



Şekil 2.5. Kesitsel mikrobolometre diyagramı

Mikrobolometreler tipik olarak 6 inç veya daha büyük silikon plaka alt tabakaları üzerine inşa edilmektedir. Bir silikon plaka ile başlayarak, bir okuma entegre devresi (ROIC) oluşturulur. Daha sonra, etch ve litografi işlemlerinin kullanılması ve birkaç katmanın birleştirilmesi ile ROIC üzerinde köprü benzeri yapı oluşturulur. Şekil 2.5'te bir mikrobolometrenin genelleştirilmiş bir enine kesit görünümü verilmiştir ve bileşenler için kullanılan bazı ortak malzemeler belirtilmiştir. ROIC, algılama malzemesi ile elektriksel değişimi bir görüntüye dönüştüren bilgisayar arasında bir bağlantı sağlar. ROIC ile köprü yapısını birbirine bağlayan elektrotlar,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ile kapsüllenmiş bir metalden yapılmıştır. Metal iyi bir ısı iletkenidir ve bundan dolayı algılama malzemesinin soğutulmasına yardımcı olur. Algılama malzemesini desteklemek için genellikle  $\text{SiO}_2$  ile birleştirilmiş  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 'ten yapılmış ince bir membran kullanılır. Gelen kızılötesi radyasyonu tespit etmek için en yaygın kullanılan malzemeler amorf silikon (a-Si) ve vanadyum oksittir ( $\text{VO}_x$ ) [55]. Bir mikrobolometrenin algılama malzemesi koruma ve filmin stabilitesini artırmak için bir pasivasyon tabakası ile kaplanabilir. ROIC'in üstündeki bir reflektör tasarımı, mikrobolometre pikselinin geri kalanını oluşturur. Bunlar, kızılötesi radyasyonunun yansıtılmasına yardımcı olmak için piksele eklenir ve böylece absorbe edilen enerji miktarı maksimuma ulaştırılır.

Mikrobolometrelerin performansına etki eden temel parametrelerden birisi direnç sıcaklık katsayısıdır (TCR) [56-57]. Dirençli tip mikrobolometreler için TCR; direncin sıcaklığa bağımlılığını tanımlayan bir parametredir. Dedektörün direnci, sıcaklığın artması veya azalması ile değişir.

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \quad (2.4)$$

Burada;  $\alpha$ , dedektörün TCR'sidir, R ise T sıcaklığındaki direnç değeridir.

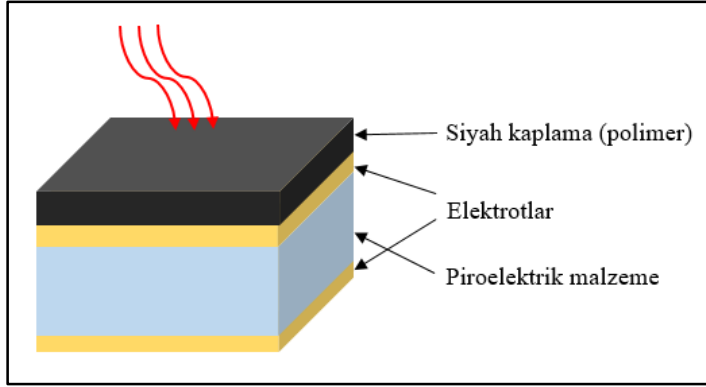
Çizelge 2.2. Dirençli mikrobolometre algılama malzemesinin istenilen özellikleri

TCR	Yüksek
Direnç	Düşük
1/f gürültü	Düşük
ROIC uygunluğu	Evet

TCR, kızılötesi radyasyonu algılamak için kabul edilebilir malzemeleri belirlemek için kullanılan birincil malzeme özelliklerinden birisidir. Kızılötesi dedektörler için, sıcaklıktaki küçük bir değişiklik ile büyük bir direnç değişikliğine uğrayan ince film malzemeler gereklidir. Algılama malzemesi metal veya yarı iletken olabilir. Malzeme metal ise TCR pozitifdir ve malzeme yarı iletken ise TCR negatiftir. Yarı iletken bolometrelerdeki algılama malzemesinin direnci sıcaklık arttıkça azalır. Bu nedenle, bu malzemeler negatif bir sıcaklık direnç katsayısına (TCR) sahiptir [58]. Algılama malzemesi bir metal ise, sıcaklık artışı malzeme direncinin artmasına ve bundan kaynaklı olarak pozitif bir TCR'ye sahip olmasına neden olacaktır [59].

### 2.3.2. Piroelektrik dedektörler

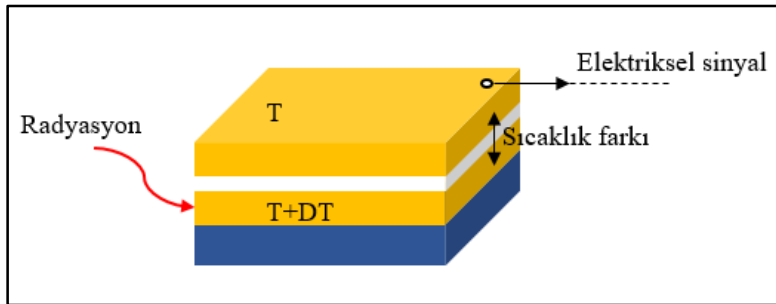
Piroelektrik malzemelerin zıt yüzleri arasındaki potansiyel fark, kendiliğinden oluşan elektrik polarizasyon değişikliği nedeniyle tespit edilir. Termal dedektörler içerisinde piroelektrik dedektörler en hassas detektörlerdir. Bazı malzemelerin (lityum tantalat, baryum titanat, triglisin sülfat) sıcaklığa hassas dipol momentleri vardır ve bu tür malzemeler metal levhalar arasına yerleştirildiklerinde sıcaklığa hassas bir kapasitör oluşur [60]. Oluşan bu kapasitör kızılötesi ışının gücünü ölçmek için kullanılır. Burada iletilen sinyal kapasitanstır. Dedektörün responsu, sıcaklıkla birlikte malzemenin elektrik polarizasyonunun artması halinde yükselir. Kızılötesi radyasyon absorblanırken sıcaklık yükselir ve elektrik polarizasyon artar. Bu nedenle malzemedeki akım yer değiştireceğinden dolayı dış devrede bu değişikliğe eşdeğer miktarda bir akım meydana gelir. Bu halde piroelektrik malzeme doğrudan bir akım jeneratörü gibi davranır.



Şekil 2.6. Piroelektrik dedektörün şematik diyagramı

### 2.3.3. Termoelektrik dedektörler (termopiller)

Termoelektrik etkiye bağlı olarak, termopiller, termal radyasyonu ölçmek için bir ısı dedektörü olarak kullanılabilirler. Bir termopil, seri olarak elektriksel olarak bağlanmış termokupl bağlantı çiftlerinden oluşturulmuştur. Kızılötesi radyasyonun aktif bağlantı adı verilen termokupl bağlantılarından biri tarafından emilmesi, sıcaklığını artırır. Aktif bağlantı ve sabit bir sıcaklıkta tutulan bir referans bağlantı arasındaki sıcaklık farkı, oluşturulan diferansiyel sıcaklıkla doğru orantılı bir elektromotor kuvveti üretir. Bu etkiye termoelektrik etki denir [61].



Şekil 2.7. Termoelektrik dedektörün şematik diyagramı

### 3. VANADYUM OKSİTLER ( $VO_x$ ) VE ÖZELLİKLERİ

Vanadyum, bir geçiş metalidir ve V sembolü ile gösterilir. On beş veya daha fazla kararlı vanadyum oksit fazı bulunmaktadır. Vanadyumun yaygın olarak kullanılan oksidasyon durumları  $V_2O_3$  (yeşil),  $VO_2$  (mavi) ve  $V_2O_5$  (sarı) dir.  $V_2O_5$ , vanadyum oksijen bileşimlerinin en kararlı fazı ve en yüksek oksijen durumudur. Vanadyumun birçok oksijen bileşimi belirli sıcaklıklarda yapısal faz geçişi gösterir. Bazı vanadyum oksit fazlarının geçiş sıcaklıkları çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Farklı vanadyum oksit fazlarının metal-yalıtkan geçiş sıcaklıkları [62]

Vanadyum oksit fazları	Faz geçiş sıcaklığı (K)
$V_2O_3$	155
$VO_2$	340
$V_2O_5$	530

Vanadyum oksitlerin ince film formu, sahip olduğu elektro-optik üstünlükleri nedeniyle teknolojiye kullanımı daha çok tercih edilmektedir. Vanadyum oksit ince filmleri üretmenin birçok metodu vardır. Kimyasal buhar biriktirme (CVD), püskürtme, darbeleri lazer biriktirme, epitaksiyel büyütme ve sol-jel yöntemi, vanadyum oksitlerin en yaygın kullanılan ince film hazırlama metotlarıdır [63,64].

#### 3.1. Termal Algılama Malzemesi Olarak Vanadyum Oksitlerin Kullanımı

$VO_x$ , a-Si, poli-SiGe, YBaCuO gibi birçok malzeme, mikrobolometrelerde algılama malzemesi olarak kullanılabilirliğini belirlemek için araştırılmıştır [65]. En yaygın kullanılan sıcaklığa duyarlı malzemelerden ikisi  $VO_x$  ve a-Si'dir. Her iki malzeme de algılama malzemesi için yüksek TCR, düşük 1/f gürültü ve düşük direnç gibi birçok uygun özelliğe sahiptir. Ancak,  $VO_x$  ince filmlerin a-Si'den daha düşük direnç değerlerine sahip olduğu bulunmuştur [66].  $VO_x$ , yüksek TCR, iyi kızılötesi absorpsiyon ve düşük 1/f gürültü özellikleri nedeniyle uygun bir bolometre aktif malzemesidir. Oda sıcaklığında  $VO_x$  aktif malzemesi kullanılarak %2/K ile %5/K aralığında yüksek TCR değerlerine ulaşılabilir [67].  $VO_x$  püskürtme tekniği ile biriktirme, darbeleri lazer biriktirme ve sol-jel yöntemi gibi yöntemler ile biriktirilebilir.

Dedektör algılama malzemesi ya da başka bir ifadeyle dedektör aktif malzemesi olarak kullanılan materyal, sıcaklık değişimine tepki olarak dirençte önemli değişiklikler sağlamalıdır. Ayrıca, oda sıcaklığında düşük dirence sahip bir malzeme kullanmak da önemlidir. Algılama malzemesinin daha düşük dirence sahip olması, daha az güç kullanılması gerektiği anlamına gelir. Buna ek olarak, direnç ile gürültü arasında bir ilişki mevcuttur, direnç ne kadar yüksek olursa gürültüde o kadar yüksek olur. Daha açık bir ifadeyle, kolay algılama için ve düşük gürültü ihtiyacını karşılamak için direnç düşük olmalıdır.

Vanadyum farklı oksidasyon durumlarına sahip bir elementtir. Mikrobolometre uygulamalarında algılama malzemesi olarak  $V_2O_5$ ,  $VO_2$ ,  $V_2O_3$  gibi çeşitli vanadyum oksit fazları kullanılmıştır. Vanadyum oksidasyon durumları arasında “mikrobolometre aktif malzemesi olarak hangisinin kullanımı daha iyi performans sağlıyor?” bu soru oldukça önemlidir.

$VO_2$  oda sıcaklığında düşük dirence sahiptir ayrıca düşük bir TCR değerine sahiptir [68]. Ancak, yaklaşık 67 °C sıcaklıkta metal yalıtkan faz değişimine uğrar.  $V_2O_5$  ise oda sıcaklığında yüksek direnç ve aynı zamanda yüksek TCR sunar [69]. Vanadyumun bu iki fazı mikrobolometre uygulamaları için daha yaygın şekilde kullanılmaktadır. Aşağıdaki kısımlarda  $V_2O_5$  ve  $VO_2$  malzemeleri hakkında daha detaylı bilgiler verilecektir.

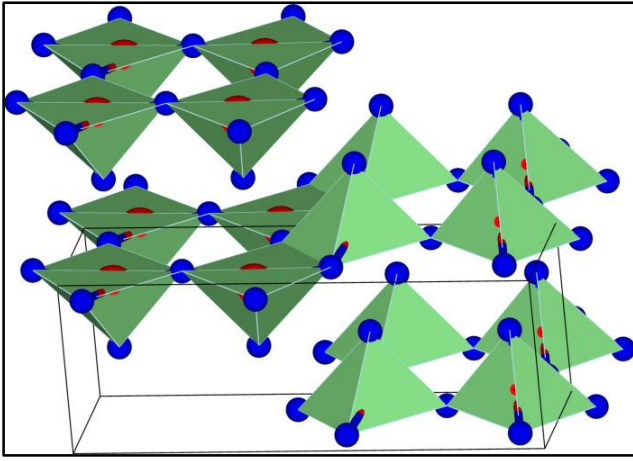
### 3.2. Vanadyum Pentaoksit ( $V_2O_5$ )

Vanadyum oksit türlerinin bazıları sıcaklık, katkılama, basınç, elektrik alan gibi dış faktörlerden herhangi birine maruz kaldıklarında metal-yalıtkan ya da yarıiletken-metal geçişi gösterirler. Bu geçişler sırasında malzemenin kristal yapısı değişime uğrar. Ayrıca, malzemenin elektriksel, optik ve manyetik özelliklerinde de belirgin değişimler meydana gelir.

Vanadyum oksit türlerinden olan vanadyum pentaoksit ( $V_2O_5$ ), kimyasal ve fiziksel özelliklerini kullanan çeşitli endüstriyel uygulamalara sahip önemli bir metal oksittir.

### 3.2.1. Kristal yapısı, fiziksel özellikleri ve uygulama alanları

$V_2O_5$  en yüksek oksidasyon durumuna sahiptir ve tüm vanadyum oksitler arasında en kararlı olanıdır. Örgü parametreleri,  $a=11,519 \text{ \AA}$ ,  $b=3,564 \text{ \AA}$  ve  $c=4,373 \text{ \AA}$ 'dur.  $P_{mmm}$  uzay grubuna ait katmanlı ortorombik birim hücre yapısına sahiptir.  $V_2O_5$ , birim hücre başına 2 vanadyum ve 5 oksijen atomundan oluşan bir bileşiktir ve Şekil 3.1'de görüldüğü gibi kristal yapısı, birim hücrenin c-ekseni boyunca, tabakaların üst üste istiflenmesinden meydana gelir. Her tabaka kenar ve köşelerini paylaşan  $VO_5$  kare piramitlerinden oluşmuştur. Böyle katmanlı bir yapı, iyonların nüfuz etmesi için yeterli alan sağlamaktadır.



Şekil 3.1.  $VO_5$  kare piramitlerinin yerleşimi [70]

Genel olarak,  $V_2O_5$  fazı n-tipi bir yarı iletken olarak kabul edilir ve indirek geçişlidir. Ayrıca, vanadyum pentoksit, yaklaşık 2,5 eV bant aralığına sahip yüksek bant aralıklı bir yarı iletken olarak kabul edilir [71]. Belirgin bir sarı renge sahiptir ve  $257 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de yarıiletkenden metale geçişe uğrar ve elektriksel ve optik özelliklerde önemli bir değişiklik olur. Vanadyum pentaoksit valans hali en yüksek vanadyum oksit bileşiğidir ve vanadyum oksit bileşiklerinin en kararlı fazı olarak bilinir.  $V_2O_5$ , mikroelektronik devrelere entegrasyon olasılığı nedeniyle özellikle ince film formunda ilgi çekicidir. Geçiş metal oksitler ( $WO_3$ ,  $MoO_3$  vb.) arasında,  $V_2O_5$ , elektrokromik cihazlar, optik anahtarlama cihazları, lityum piller için katot malzemeleri gibi endüstriyel uygulamalar nedeniyle son yıllarda teknolojik önemi oldukça yüksektir [72-74]. Bu malzemenin diğer bazı uygulamaları Şekil 3.2'de sunulmuştur.

Güneş pilleri	Lityum iyon piller
Elektrokromik, fotokromik ve termodinamik aygıtlar	Optoelektronik ve anahtarlama uygulamaları
Elektrokimyasal ve fiber optik malzemeler	Akıllı pencereler
Termal sensörler ve gaz sensörleri	Değişken yansıtıcı aynalar
Toksik gaz dedektörleri	Işık panjurları

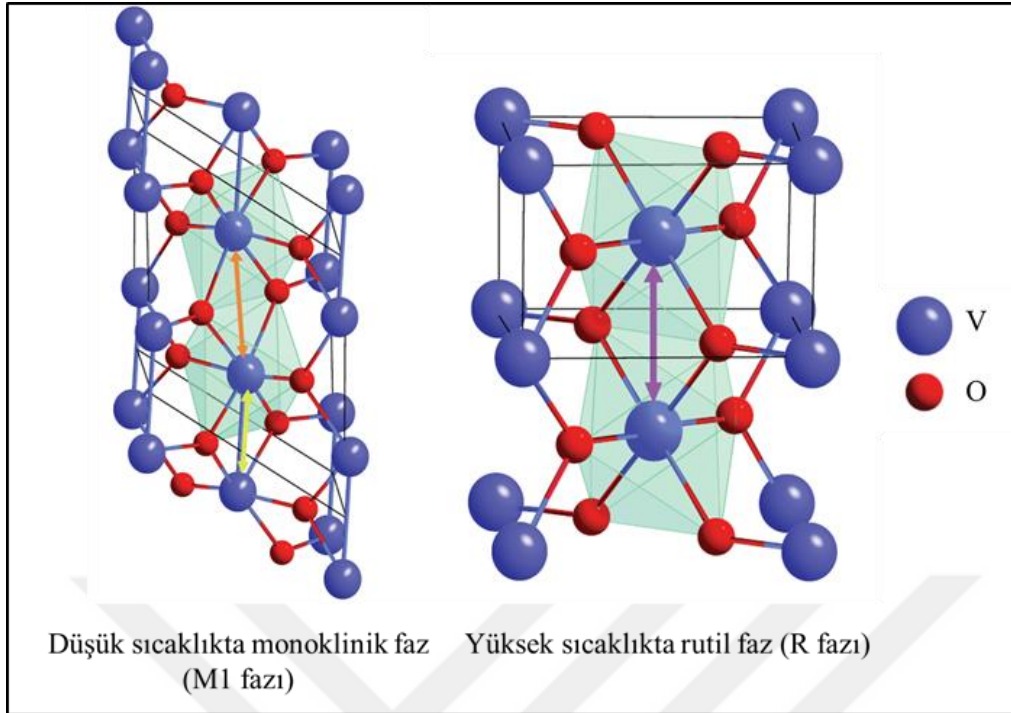
Şekil 3.2.  $V_2O_5$ 'in teknolojik uygulamala alanları

### 3.3. Vanadyum Dioksit ( $VO_2$ )

Vanadyum dioksit ( $VO_2$ ), diğer vanadyum oksit bileşiklerine kıyasla faz geçiş sıcaklığı (68 °C) oda sıcaklığına en yakın olması nedeniyle özellikle önemli bir malzemedir [75]. Vanadyum dioksit, yarım yüzyıldan fazla bir süredir teorik ve deneysel olarak geniş çapta incelenen bir malzemedir.

#### 3.3.1. Kristal yapısı, fiziksel özellikleri ve uygulama alanları

$VO_2$  düşük sıcaklıkta yalıtkan fazı gösterirken, geçiş sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda metal fazı gösterir. Faz geçiş sıcaklığında vanadyum dioksitin direncinde bir düşüş gözlenir. Isıtmaya ek olarak,  $VO_2$ 'nin faz değiştirmesi için sıcaklığın haricinde, doplama veya elektrik alanı gibi çeşitli dış faktörler de vardır. Bu malzemenin oda sıcaklığında bant aralığı değeri yaklaşık 0,7 eV'dir [76].  $VO_2$ , elektronik olarak farklı durumları ile iki farklı kristal yapıya sahiptir.  $VO_2$  düşük sıcaklıklarda monoklinik kristal yapı gösterirken, yüksek sıcaklıklarda tetragonal rutil kristal yapı gösterir [77]. Bu malzemenin kristal yapısı, oksijen atomu kırmızı renkte ve vanadyum mor renkte gösterilerek Şekil 3.3'de sunulmuştur.



Şekil 3.3. VO<sub>2</sub>(M) ve VO<sub>2</sub>(R)'nin kristal yapısı [78]

Çizelge 3.2. Farklı fazlarda VO<sub>2</sub>'nin kristal yapıları ve örgü sabitleri [79]

VO <sub>2</sub> fazı	Kristal yapısı (uzay grubu)	Örgü sabitleri		
		a (Å)	b(Å)	c(Å)
VO <sub>2</sub> (M1)	Monoklinik (P2 <sub>1</sub> /c(14))	5,38	4,52	5,74
VO <sub>2</sub> (R)	Tetragonal (P4 <sub>2</sub> /mnm(136))	4,55	4,55	2,86

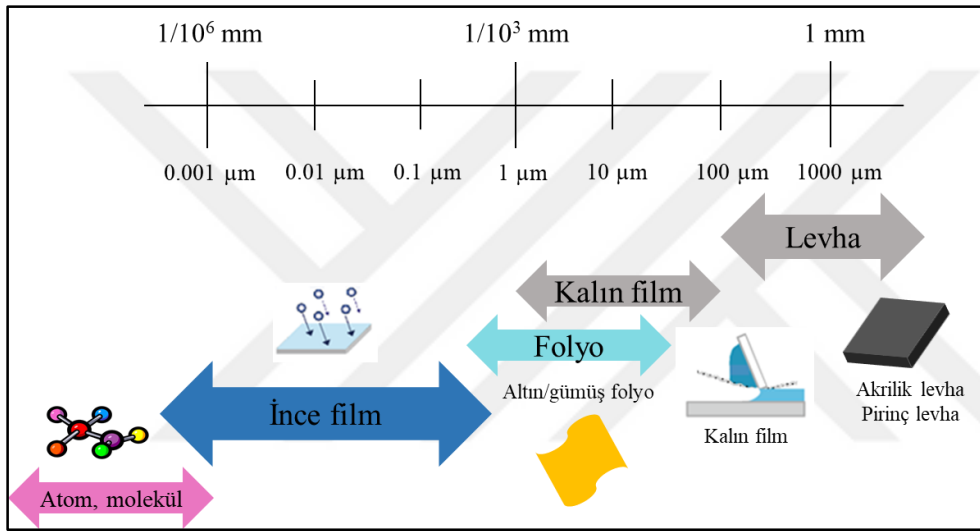
VO<sub>2</sub>, genellikle sıcaklık değişimlerine, elektrik veya manyetik alanlara ve basınç değişikliklerine tepki veren “akıllı malzemeler” sınıfına girer. VO<sub>2</sub>'deki MIT geçişi, teknolojik uygulamalar için çok sayıda öneriyi tetikledi ve birçok uygulamanın geliştirilmesine neden oldu [80,81]. Bu uygulamalardan bazıları Şekil 3.4'de verilmiştir.

Optik anahtarlama	Değişken yansıtma aynaları
Dirençli anahtarlama	Işık modülatörleri
Güneş hücreleri	Dedektörler
Akıllı pencere kaplamaları	Yüksek hızlı optik ekranlar
Sensörler	Transistörler
Optik hesaplama	Gaz sensörü

Şekil 3.4. VO<sub>2</sub>'nin teknolojik uygulama alanları

## 4. İNCE FİLM TEKNOLOJİSİ

İnce film, bir alttaş üzerine biriktirilen bir malzemenin katmanını ifade eder ve kalınlığı nanometre düzeyinden birkaç mikrometreye değişir. İnce film kaplama işlemi üç temel adımdan oluşur. Birincisi, biriktirme için gerekli uygun atomik, moleküler veya iyonik türlerin üretilmesidir. İkincisi, bu türlerin bir altlık üzerine aktarılmasıdır. Üçüncüsü yani sonuncusu ise, bu türlerin doğrudan kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar ile alttaş üzerinde birleşerek tutunmasıdır.



Şekil 4.1. Bazı cisimlerin ölçüleri

Mikro ve nano yapı malzeme endüstrisinin temelini oluşturan, teknolojik ve bilimsel araştırmalarda oldukça önemli bir yere sahip olan ince filmler, son dönemlerde en çok çalışılan araştırma konularından biridir. İnce film nanokristal malzemeler ile oluşturulan malzemelerin optik, mekanik ve elektriksel gibi temel karakteristik özelliklerinin müthiş derecede geliştiği bilinmektedir. Günümüz teknolojik gelişmelerinin temel unsurlarından biri olan ince film teknolojisi, kullandığımız kişisel bilgisayar ve donanımlardan, haberleşme sistemlerine kadar çoğu elektronik cihazın içinde bulunmaktadır.

İnce film malzemelerindeki hızlı değişim; yeni işlemlerin, malzemelerin ve teknolojilerin gelişimi ve ilerlemesi için yeni fırsatlar yaratmaktadır. İnce filmler beklenen performansı gösterebilmeleri için uygun kalınlığa, bileşime ve karakteristik özelliklere sahip olmalıdırlar.

Bu nedenle, farklı üretim teknikleri ve birbirinden farklı alttaşların üzerine üretimi denenerek daha kaliteli ince filmlerin üretim ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır.

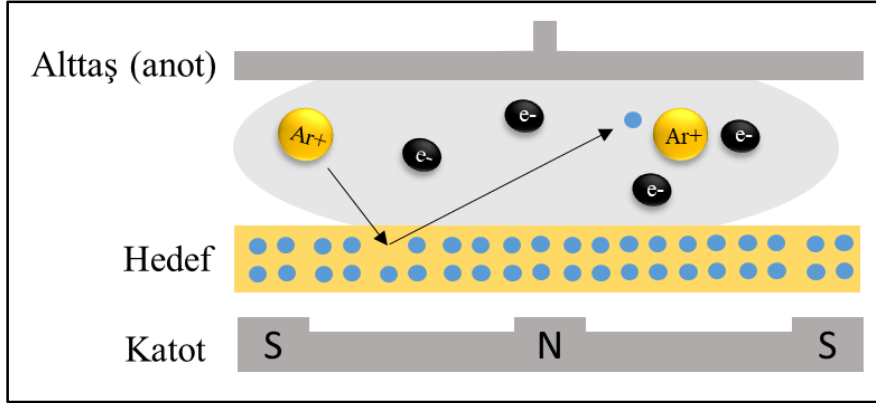
#### **4.1. VO<sub>x</sub> İnce Film Üretim Teknikleri**

Vanadyum oksit ince filmleri kaplamak için kullanılabilen pek çok yöntem vardır. Bunlar genel olarak; kimyasal buhar biriktirme (CVD), püskürtme (sputtering), lazer biriktirme, fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve sol-jel biriktirme yöntemleridir. Bu tez çalışmasında, VO<sub>x</sub> filmler püskürtme (sputtering) yöntemi ile elde edilmiştir ve bu yöntem aşağıda detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

##### **4.1.1. Magnetron püskürtme sistemi**

PVD teknikleri arasında püskürtme, benzersiz özellikleri ile akademide ve endüstride en yaygın kullanılan işlemlerden birisidir. Endüstriyel etkileriyle öne çıkan üç tane parametre vardır. Bunlar; çok yönlülük, kontrol edilebilirlik ve tekrarlanabilirlik. Birincisi tamamen boyutla ilgilidir. Püskürtme, işlemin ihtiyaçlarına yönelik ölçeklendirmek veya küçültmek basit olması sebebiyle şekillendirilebilir bir teknolojidir. Diğerleri ise özellik kontrolüne ilişkindir. Teknolojinin başarılı bir şekilde uygulanması için süreç üzerinde tam kontrol şarttır. Üçüncü parametre ve son olarak, tekrarlanabilirlik, tutarlı bir şekilde aynı özelliklere sahip filmlerin üretilmesini ifade eder. Püskürtme bu farklı özellikleri nedeniyle endüstriyel uygulamalar için tercih edilen yöntemlerden biri haline gelmiştir ve günümüzde tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bir magnetron püskürtme işlemi, bir hedefin yüksek enerjili parçacıklar ile bombardıman edilmesinden meydana gelir. Bu işlem kullanılarak yapılan kaplamalarda, reaktif ve reaktif olmayan süreçler ile malzemeler üretilmektedir. Reaktif olmayan biriktirmelerde, işlem odasına Argon (Ar) gazı gibi bir gaz verilerek hedeften koparılan atomların bir altlık üzerine biriktirilmesiyle ince film oluşturulur. Reaktif biriktirmelerde ise, oluşturulacak malzemeye bağlı olarak biriktirme boyunca Ar gazı ile birlikte aynı zamanda Oksijen (O<sub>2</sub>) veya Azot (N<sub>2</sub>) gazı kullanılır. Hedefin gaz iyonları ile bombardıman edilmesiyle ince film oluşturma işlemi gerçekleşir. Magnetron püskürtme tekniği; metal, metal oksit, metal nitrür ve metal sülfür gibi hedeflerin kullanılması ile geniş bir film üretme yelpazesine sahiptir.



Şekil 4.2. Magnetron püskürtme tekniğinin şematik gösterimi

Magnetron püskürtme tekniğinin avantajları aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

1. Plazma enerjisine bağlı olarak koparılan atomlar alttaşa güçlü bir şekilde yapışır.
2. Biriktirilen filmler oldukça iyi kalınlık homojenliğine sahiptir.
3. Biriktirme süreçleri kolaylıkla kontrol edilebilir.
4. İyi kalite ve homojenlik ile geniş alanlara biriktirme işlemi gerçekleştirilebilir.



- |  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1 » Örnek Taşıyıcı Kol                                   | 8 » Turbo Pompa               |
| 2 » RF Saçırma Kaynakları                                | 9 » Kontrol Ünitesi           |
| 3 » Plazma İzleme Penceresi                              | 10 » Vakum Gösterme Paneli    |
| 4 » Kaplama Odası  | 11 » Kalınlık Ölçer           |
| 5 » Saçırma İzleme Penceresi                             | 12 » DC Besleme Jeneratörü    |
| 6 » Gaz Balonları (Ar, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> ) | 13 » Kontrol Ünitesi Monitörü |
| 7 » Vakum Pompa  |                               |

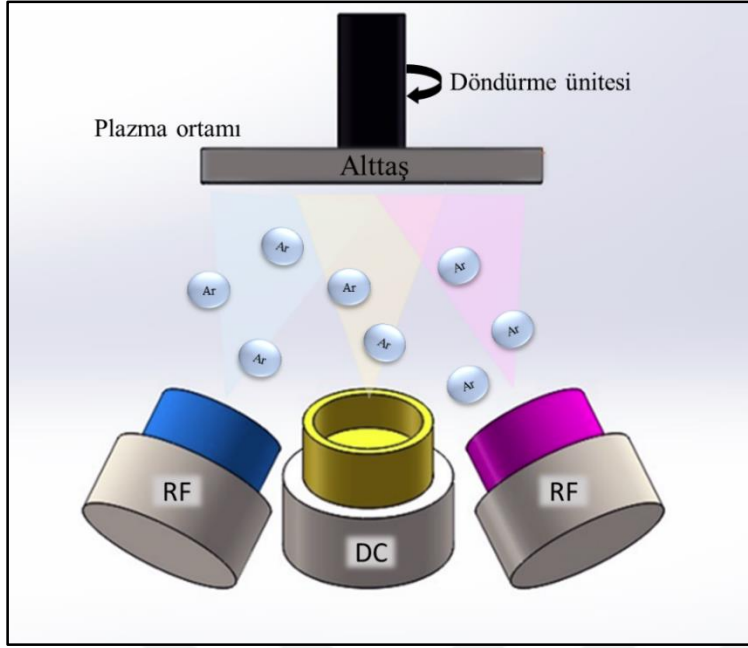
Resim 4.1. Magnetron Püskürtme Sistemi (BesTec)

Bu tez çalışmasında,  $V_2O_5$  ince filmlerin bir kısmı Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Magnetron Püskürtme Sistemi kullanılarak üretildi. Bu sistem, 4 inç çapa sahip 3 adet DC ve 2 adet RF beslemeli toplam beş adet kaynak hedefe sahiptir. Bu sistemde, 3 inç çapındaki alttaş yüzeyi, homojen bir şekilde film oluşturmaya elverişlidir. Sistemde yaklaşık  $10^{-8}$  mbar'lık başlangıç vakum seviyesi mevcuttur. Bu sistemde hedef-alttaş arası mesafe 120 mm'ye kadar ayarlanabilmektedir. 800 °C'ye kadar ısıtılabilen bir alttaş ısıtıcısına sahip olan bu sistemde iki gaz girişine olanak sağlayan gaz akış kontrol ünitesi bulunmaktadır. Ayrıca, Resim 4.1'de sunulan püskürtme sisteminin yükleme odasında alttaş yüzey temizliğini gerçekleştirebilen bir ters-püskürtme ünitesi mevcuttur.

#### 4.1.2. Eş püskürtme sistemi

Eş Püskürtme tekniği iki ya da daha fazla hedef tabancasının eş odaklı olarak yerleştirildiği ve aynı anda farklı hedef malzemelerden püskürtme yapılarak bileşimlerin oluşturulmasına imkân veren bir tekniktir. Bu teknikte, ayrıca, farklı malzemelerin ardışık film yığınlarını da elde etmek mümkündür. Öte yandan, hedeflerin alttaş yüzeyine farklı açılarda yönlendirilebilmesi sayesinde, püskürtülen atomik/moleküler türlerin gelme açısına bağlı film kaplanması da ilgi çekici bir özellik olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, ince filmlerde benzersiz bileşimler ve özellikler oluşturmak için işlem odasında farklı tipte hedef malzemelerin birleştirilmesi anlamına da gelebilir. Eş-püskürtme tekniğinde, magnetron püskürtme tekniğine benzer şekilde, katota yerleştirilen hedef malzemenin yüksek enerjili iyonlar ile bombardımanından faydalanılır. Plazma ortamında yüksek hızlı atomlar hedef malzemeden kopar ve alttaşa yapışır, böylelikle ince film üretimi gerçekleşmiş olur. Eş püskürtme, nano boyutlu filmler, çok katmanlı kaplamalar ve metal/metal oksit katkılı yapılar için sıklıkla kullanılan film oluşturma tekniğidir.

Bu tez çalışmasında kullanılan ve Resim 4.2'de sunulan eş püskürtme sisteminde, birden çok hedef kaynağı ve ortak odak noktası olarak numune tutucusuna hedeflenen bir konfigürasyon mevcuttur. Numune tutucusuna yerleştirilen alttaş kendi eksenini etrafında döner ve böylelikle homojen filmler elde edilir. Bununla birlikte, üretilen ince filmin kalitesi ve homojenliği açısından hedef kaynakların açıları alttaşa göre ayarlanmalıdır. Hedef ile alttaş mesafesi de film üretiminde çok önemlidir ve bu mesafe artırılırsa kaplama daha yavaş olur fakat oldukça homojen filmler elde edilebilir.



Şekil 4.3. Eş-Püskürtme Sistemi şematik gösterimi



- |                                |   |
|--------------------------------|---|
| 1 » Saçırma Kaynağı (RF1)      | 10 » Gaz Kontrol Ünitesi                |
| 2 » Saçırma Kaynağı (DC)       | 11 » Isıl Buharlaştırma Güç Ünitesi (1) |
| 3 » Saçırma Kaynağı (RF2)      | 12 » Isıl Buharlaştırma Güç Ünitesi (2) |
| 4 » Isıtıcı Örnek Tutucu       | 13 » DC Güç Kaynağı Ünitesi             |
| 5 » Isıl Buharlaştırma Kaynağı | 14 » RF1 Güç Kaynağı Ünitesi            |
| 6 » Isıl Buharlaştırma Kaynağı | 15 » RF2 Güç Kaynağı Ünitesi            |
| 7 » Vakum Kontrol Ünitesi      | 16 » Örnek Döndürme Motoru              |
| 8 » Kalınlık Ölçümü Ünitesi    | 17 » Kontrol Ünitesi Monitörü           |
| 9 » Sıcaklık Kontrol Ünitesi   |   |

Resim 4.2. Eş Püskürtme Sistemi (Nanovak NVTS-500)

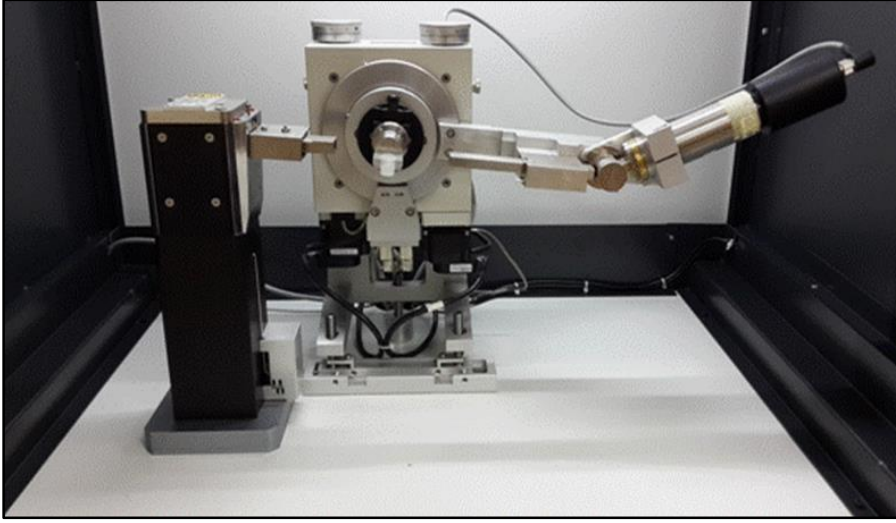
Tez çalışması kapsamında,  $V_2O_5$  filmlerin bir kısmı ve  $VO_2$  ince filmler Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Nanovak NVTS-500 eş püskürtme sistemi kullanılarak üretildi. Bu sistemde, 2 inç çapa sahip 1 adet DC ve 2 adet RF beslemeli kaynak hedef mevcuttur. Sistemin içindeki döndürme ünitesi (2-30 rpm), kaplama işlemi boyunca alttaşın dönerek kaplanmasını ve yüzeyde homojen bir ince film üretilmesini sağlamaktadır. Sistemin başlangıç vakum seviyesi yaklaşık  $10^{-8}$  Torr mertebesindedir. Ayarlanabilen hedef başlıkları ile alttaş-hedef arası mesafe 12 cm'ye kadar ayarlanabilmektedir. Sistemde, alttaş ısıtıcısı sıcaklığı  $600\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar çıkabilmektedir.

## 4.2. $VO_x$ İnce Filmlerin Karakterizasyon Teknikleri

İnce filmlerin üretim kısmı ve daha sonra üretilen filmlerin karakterizasyon aşaması, geliştirilecek aygıtlar için oldukça önemlidir. Tez kapsamında üretilen  $V_2O_5$  ve  $VO_2$  ince filmlerin karakterizasyonları; X-ışınları kırınımı (XRD), Raman spektrometresi, İkincil iyon kütle spektrometresi (SIMS), X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS), Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), UV-Vis spektrometre, Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrometresi, fotoluminesans (PL) spektrometre ve Hall etkisi ölçüm sistemi ile yapıldı. Kızılötesi dedektör fabrikasyon işlemlerinin ardından üretilen aygıtların karakterizasyonları ise Akım-Gerilim (I-V) ölçüm sistemi kullanılarak gerçekleştirildi. Karakterizasyon sistemlerine ait bilgiler aşağıda sunulmaktadır.

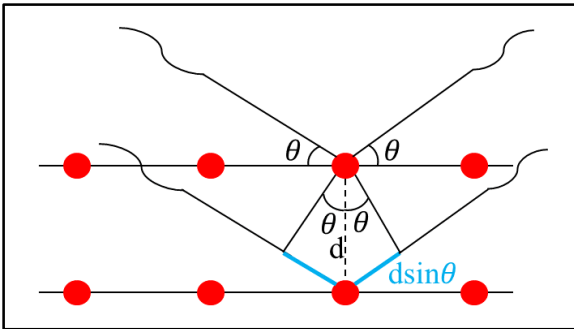
### 4.2.1. X-ışınları kırınımı (XRD)

X-ışınları, yaklaşık bir atom büyüklüğünde olan 1 Angstrom ( $\text{\AA}$ ) civarında dalga boyuna sahip elektromanyetik radyasyondur. X ışını kırınımı (XRD) kristal bir malzemenin faz tanımlamasını belirlemek ve birim hücre boyutları hakkında bilgi elde etmek için kullanılan analitik bir tekniktir. Ayrıca, Kristal yapı içeren bir malzemenin yapısal analizinde numuneye zarar vermeyen ölçüm tekniklerinin en bilinenidir.



Resim 4.3. XRD cihazının genel görünümü

Bir malzemenin atomik yapısını görüntülemek için yüksek çözünürlüklü çeşitli elektron mikroskopları kullanılabilir. Ancak bilinmeyen yapıları belirlemek ve yapısal parametreleri tayin etmek için kırınım metotlarını kullanmak gereklidir. Katıların kristal yapılarını analiz etmek için en çok tercih edilen kırınım metodu X-ışını kırınımıdır. Bu metodun ince filmlerin yapısal incelemesi için uygunluğunun iki nedeni bulunmaktadır. Bunlarda ilki, X-ışınlarının dalga boyları, maddedeki atomik mesafeler ölçüsündedir. Diğeri ise, X-ışını tekniği yıkıcı değildir ve incelenen numuneye zarar vermez.



Şekil 4.4. Kristal düzlemlerinden X-ışınlarının saçılması

X-ışınları kristal bir malzeme üzerine düşürüldüğünde, küçük geliş açılarıyla tam yansımaya uğrarlar ve daha sonra kristaldeki atomların paralel düzlemleri tarafından saçılırlar. Kristal yapıdaki bu saçılımlar kırınım olarak tanımlanır. Tüm kırınım deneyleri Bragg yasasına dayanmaktadır [82].

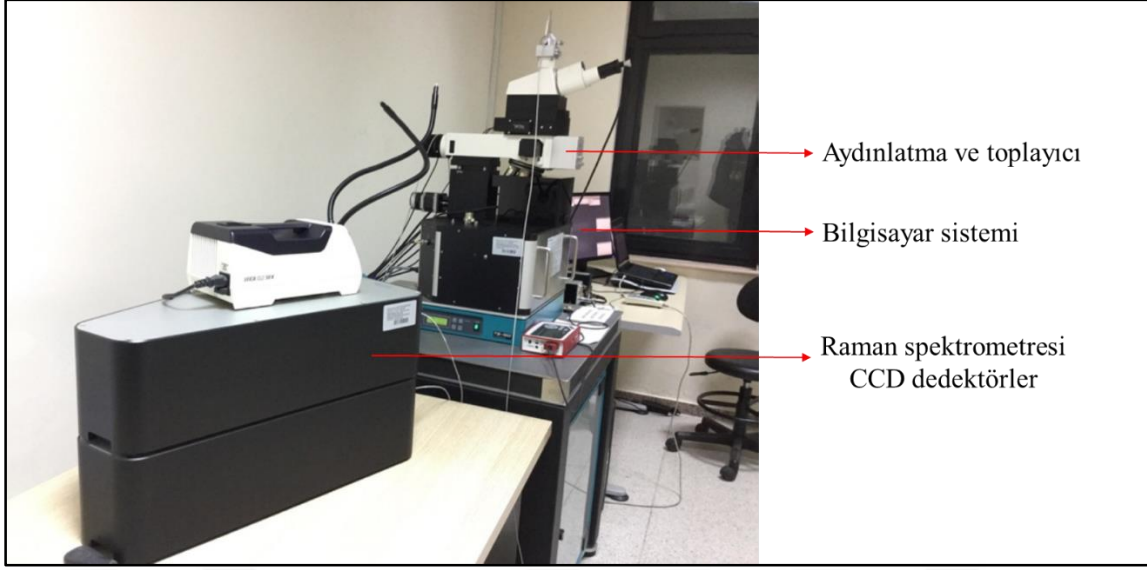
$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (4.1)$$

Bu denklemde,  $d$  kristal düzlemleri arasındaki mesafe,  $\theta$  yansıma (veya gelme) açısı,  $n$  kırınımın mertebesi ve  $\lambda$  kullanılan X-ışınının dalga boyu olarak ifade edilir. Denelerimizde kullanılan X-ışınının dalga boyu  $\lambda_{\text{K}\alpha}=1,05 \text{ \AA}$ 'dır. X-ışını kırınım deseninden  $2\theta$  saçılma açısı belirlenir. Kristal düzlemleri arasındaki  $d$  mesafesi ise Eşitlik 4.1'den hesaplanır. Bu  $d$  mesafesinin belirlenmesi ile kristal düzleminin yönelimi ve örgü parametresi belirlenerek yapısal bilgiler elde edilir. Ek olarak, X-ışını kırınım desenindeki pik pozisyonları ve pik yarı genişliğinin (FWHM) belirlenmesi ile filmlerdeki parçacık büyüklükleri belirlenebilmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan XRD cihazı Resim 4.3'te sunulmaktadır.

#### 4.2.2. Raman spektrometresi

Raman spektrometresinin çalışma prensibi, monokromatik bir ışık kaynağının elastik olmayan (inelastik) saçılması temeline dayanır. Monokromatik ışın kaynağındaki fotonların frekanslarının bir malzeme ile etkileşimi neticesinde değişmesi olayına inelastik saçılma denilmektedir. Lazer kaynağından gelen fotonlar malzeme tarafından soğurulur ve malzeme tarafından tekrar yayınlanır. Malzeme tarafından tekrar yayınlanan fotonların frekansları, gelen lazer fotonlarının frekansına göre yukarı veya aşağı yönde bir kayma gösterir. Fotonların frekanslarındaki bu değişim "Raman Etkisi" olarak adlandırılır. Fotonların frekanslarındaki değişim malzemedeki moleküllerin titreşim, dönme ve diğer düşük frekanslı geçişleri hakkında bilgi sahibi olmamıza olanak sağlar. Raman spektrometresi katı, sıvı ve gaz örneklerin analizinde kullanılabilir.

Raman spektrometresinin dört ana bileşeni bulunmaktadır. Bunlar, lazer (ışın) kaynağı, numune aydınlatma ve toplayıcı, spektrometre ve bilgisayar kontrol sistemidir. Bu sistemde detektör olarak yük-eşleşmiş detektör (CCD) kullanılmaktadır. Tez kapsamında kullanılan, Gazi Üniversitesi Yaşam Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Raman spektrometresi Resim 4.4'te verilmektedir.



Resim 4.4. Konfokal Raman spektrometresi (Witec Alpha 300R)

#### 4.2.3. İkincil iyon kütle spektrometresi (SIMS)

İkincil iyon kütle spektrometresi (SIMS), bir malzemenin ppm mertebesinde nicel analizini gerçekleştirmeye yarayan bir tekniktir. Bu teknik, pozitif veya negatif gaz kaynağından gelen birkaç keV enerjili birincil iyonların numune yüzeyine odaklanarak çarpması sonucunda numunelerin yüzeyinden yayılan ikincil iyonları analiz ederek katı yüzeyler hakkında elementel ve moleküler bilgi elde edilmesini sağlayan yüzey analiz tekniğidir. Bu ikincil iyon demeti, elementel ya da moleküler bileşimi belirlemek için bir kütle spektrometresi yardımıyla ölçülmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Hiden Analitic marka SIMS sistemi Resim 4.5'te verilmiştir. Bu sistemde, elektropozitif elementlerin iyonizasyonu için Oksijen (O) birincil iyon kaynağı olarak kullanılmaktadır. Elektronegatif malzemeleri analiz etmek için ise Sezyum (Cs) birincil iyon kaynağı olarak kullanılmaktadır.



Resim 4.5. SIMS sistemi (Hiden Analytical)

Tez çalışmalarında kullanılan SIMS sistemi, ultra yüksek vakum ( $10^{-9}$ - $10^{-10}$  mbar) şartlarına sahiptir. Sistemde, elektropozitif elementlerin iyonizasyonu için 1-5 keV enerjiye sahip, 1  $\mu$ A akım üreteçli ve 100  $\mu$ m işleme kapasiteli bir O kaynağı bulunmaktadır. Ayrıca, elektronegatif malzemelerin iyonizasyonu için 1-5 keV enerjiye sahip, 100 nA akım üreteçli ve 80  $\mu$ m işleme kapasiteli bir Cs kaynağı mevcuttur.

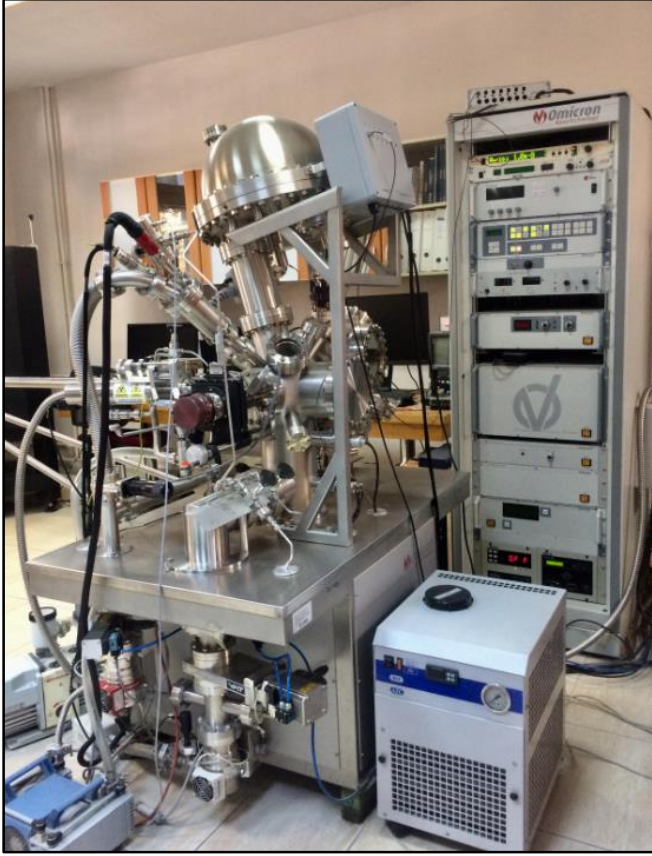
#### 4.2.4. X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS)

Malzemelerin elektronik yapısı hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla kullanılan önemli deneysel yöntemlerden biri olan fotoelektron spektroskopisi, fotoelektrik etkiye dayalıdır. Bu yöntem; bir monokromatik ışık kaynağı ile ışınlanan numune yüzeyinden fotoelektrik etki ile yayımlanan fotoelektronların; elektron enerji analizörü tarafından dedekte edilerek, kinetik enerjilerine göre analiz edilir. Böylece elektronun bağlanma enerjisi elde edilir. Bu enerji, malzeme içindeki atomların tıpkı parmak izi gibidir. Her bir element, bağlanma enerji değerlerinde karakteristik bir XPS zirvesi sunar. Enerjinin korunumu denklemi 4.2'de sunulmuştur [83].

$$E_k = hv - E_b - \phi \quad (4.2)$$

Burada  $hv$  gönderilen fotonun enerjisi,  $\phi$  iş fonksiyonu,  $E_b$  elektronun bağlanma enerjisi,  $E_k$  vakum seviyesindeki elektronun sahip olduğu kinetik enerjidir. Fotoelektron spektroskopisi kullanılan fotonun enerjisine bağlı olarak farklı şekilde adlandırılır. Fotonun

enerjisi  $h\nu = 200\text{eV} - 2000\text{eV}$  arasında ise XPS (X ışını Fotoelektron Spektroskopi),  $h\nu = 10\text{eV} - 60\text{eV}$  arasında ise UPS (Ultraviyole Fotoelektron Spektroskopi) olarak isimlendirilir.



Resim 4.6. XPS sistemi (Omicron)

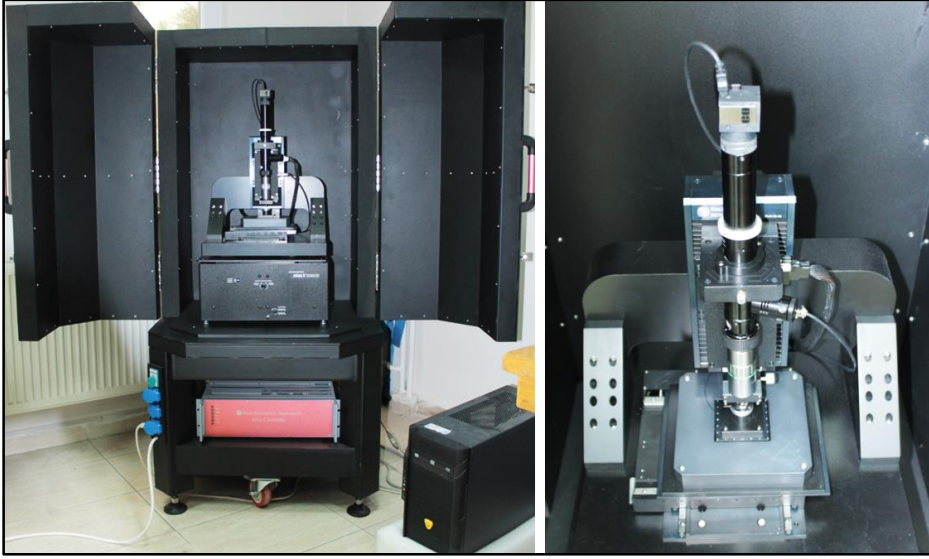
X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS), bir numune içinde var olan elementlerin bileşimi, kimyasal ve elektronik durumu hakkında bilgi veren yüzeye duyarlı bir analiz tekniğidir. XPS metodunda, örnek; ultra yüksek vakumlu sistem içerisine yerleştirilir ve X-ışınlarına maruz bırakılır. X ışını kaynağı olarak, monokromatik Mg K $\alpha$  (1253,6eV) ve Al K $\alpha$  (1486,6eV) kaynakları kullanılır. Numune üzerine düşen X-ışınları, numunenin kor (atomik kabuklarda) seviyelerinde bulunan elektronların uyarılmasına sebebiyet verirler. Bu kor seviyelerinden yayımlanan fotoelektronların enerjileri, bağlanma enerjilerinin bir fonksiyonudur. Ayrıca, bu fotoelektronların enerjileri koptuğu element için bir karakteristiktir. XPS tekniğinde, X-ışınları malzemenin derinliklerine nüfuz edebilmesine rağmen, saçılan elektronlar yaklaşık 4-5 nm kadar yol alabildikleri için yüzeye birkaç nm yakın tabakaların XPS analizleri yapılabilmektedir.

X-ışını tarafından uyarılan kor elektronlarının arkasında oluşturduğu boşluk, dış kabuklardan gelen bir elektron tarafından doldurulur. Bu geçişin enerjisi karakteristik bir x-ışınının yayımlanması ile dengelenir. Numuneden yayımlanan fotoelektronlar elektron enerji analizörü tarafından dedekte edilir ve kinetik enerjinin bir fonksiyonu olarak fotoelektronların yoğunluk spektrumu ortaya çıkar. Spektrum, Einstein eşitliği (4.2) kullanılarak bağlanma enerjisinin bir fonksiyonu olarak da kaydedilebilmektedir. Elde edilen spektrum tarafından numunenin elementel analizi, kimyasal stokiyometrisi ve kimyasal bağları analiz edilebilir. Tezde kullanılan, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan XPS sistemi Resim 4.6'da gösterilmiştir.

#### 4.2.5. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM)

AFM, yüzey topografisini angstrom mertebesinde birkaç yüz mikrona kadar ölçebilen bir tekniktir. AFM sisteminde, numune yüzeyini taramak için oldukça ince sivri bir iğne kullanılır. İğne, çok küçük silikon yay (cantilever) üzerine mikrofabrikasyon teknolojisiyle yerleştirilmiştir. Bu iğne numune yüzeyine yeteri kadar yaklaştığında, yüzey ile iğne arasında oluşan etkileşim kuvvetleri (Van der Waals, elektrostatik, manyetik vb.) yayda yüzeye doğru bir sapmaya neden olur. İğne yüzeye daha da yaklaştıkça, yüzeye temas etmesi gibi, itme kuvvetinde artış meydana gelir ve yay yüzeyden dışarı doğru sapar. Uçta kullanılan iğne, incelenmek istenilen yüzeye göre farklılık gösterir. Ancak genel olarak Silikon (Si) ya da  $Si_3N_4$  iğne kullanılır. İğnenin kalınlığı, yaygın olarak 0.2 nm ile 10 nm arasında değişmektedir. Bir lazer ışını vasıtasıyla, yüzeye doğru ya da yüzeyden uzağa doğru olan yay sapsmaları belirlenir. Lazer ışını yayın üzerinden yansır. Eğer yay hareket ederse, yansıyan ışının açısında da değişiklikler oluşacaktır. Bu değişiklikleri tespit etmede ise konuma duyarlı bir foto diyot kullanılır. Lazer ışınındaki oluşan bu sapsmalar aracılığıyla nano-ölçekteki yüzey girintileri ve çıkıntıları kaydedilir. Böylelikle, yüzeyin haritası çıkartılır. Dolayısıyla yüzeyin topografik görüntüsü elde edilmiş olur. AFM sistemi, katı-hal fiziği, yarıiletken teknolojisi, moleküler mühendislik, polimer kimyası, yüzey kimyası, moleküler biyoloji, hücre biyolojisi ve tıp gibi alanlarda kullanılabilir.

AFM görüntülerinden, malzemenin yüzey morfolojisi, yüzey pürüzlülüğü ve tanecik boyutu belirlenebilir. Tez kapsamında kullanılan, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan NanoMagnetics marka AFM sistemi Resim 4.7'de gösterilmiştir.



Resim 4.7. AFM sistemi (NanoMagnetics)

#### 4.2.6. UV-Vis spektrometre

UV-Vis spektrometresi, morötesi (UV), görünür (Vis) ve yakın kızılötesi (NIR) spektral bölgelerdeki fotonların spektroskopisini içerir. Elektromanyetik spektrumun UV-Vis-NIR bölgelerindeki fotonlar numunenin üzerine gönderilir ve numune içerisindeki moleküller elektronik geçişlere uğrar. Gelen fotonların bir kısmı soğurulmaya uğrar, bir kısmı yansır ve bir kısmı da geçer. UV-Vis spektrometresi dört kısımdan oluşur. Bunlar; ışık kaynağı, monokromatör, numune tutucu ve algılayıcı detektördür. Bu spektrometre, numunenin ışığı geçirme (T), soğurma (A) veya yansıtma (R) özelliklerini analiz etmek için kullanılır. Gönderilen optik sinyal, dedektör tarafından elektrik sinyaline çevrilir ve bilgisayara aktarılır. Böylece numunenin optik spektrumları elde edilmiş olur.

UV-Vis spektrometresi ile elde edilen geçirgenlik spektrumundan, bir ince filmin optik soğurma katsayısı eşitlik 4.3'de sunulan Beer-Lambert eşitliği ile belirlenir [84].

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln(T) \quad (4.3)$$

Burada d filmin kalınlığı, T ise optik geçirgenliğidir. Ek olarak, yarıiletken ince filmlerin optik yasak enerji aralığı değeri ( $E_g$ ) ise, eşitlik 4.4'de verilen Tauc formülü kullanılarak hesaplanır [85].

$$\alpha_{hv} = A(hv - E_g)^n \quad (4.4)$$

Bu eşitlikte, A bir sabit ve hv gelen fotonun enerjisidir.

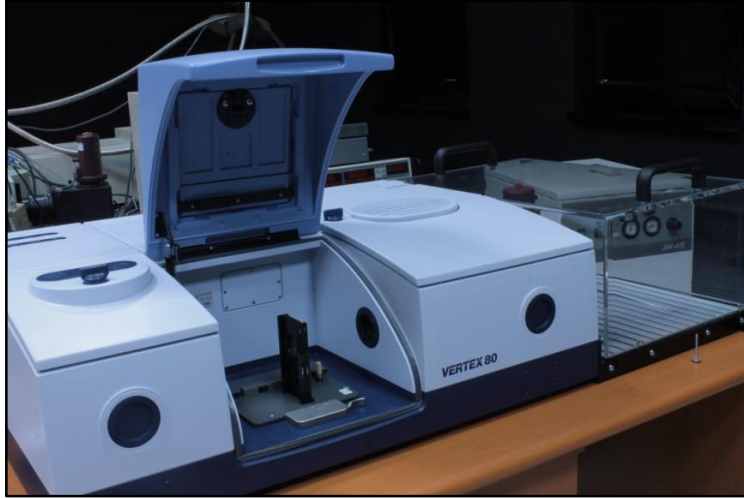


Resim 4.8. UV-Vis spektrometresi (Perkin Elmer Lambda 2S)

Tez çalışmaları boyunca, cam alttaşlar üzerine biriktirilen filmlerin optik özellikleri Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan 200-1100 nm dalga boyu ölçüm aralığına sahip UV-Vis spektrometresinin geçirgenlik ölçümleri ile analiz edildi. Bu sistemde, 200-340 nm ile 340-1100 nm arasında dalgaboylarını tarayabilen Döteryum ve Halojen 2 adet lamba, iki ayrı numune tutucu ve Si dedektör mevcuttur.

#### 4.2.7. Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrometresi

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) spektroskopisi, bir tür titreşim spektroskopisi olarak tanımlanır. FTIR spektrometresi, ışığın kızılötesi (IR) yoğunluğuna karşı dalga sayısını analiz eden kimyasal analitik bir tekniktir. Numuneye gönderilen IR ışınları molekülün titreşim hareketleri tarafından soğurulur. FTIR spektroskopisinde ışımaya şiddeti, zamanın bir fonksiyonu olarak alınır ve hızlı ve yüksek çözünürlükte spektrumlar elde edilebilir. Bu teknik ile moleküler bağ karakterizasyonu gerçekleştirilerek; katı, sıvı, gaz ya da çözelti halindeki organik bileşiklerin yapısındaki fonksiyonel gruplar, iki bileşiğin aynı olup olmadığı, yapıdaki bağların durumu, bağlanma yerleri belirlenebilir.



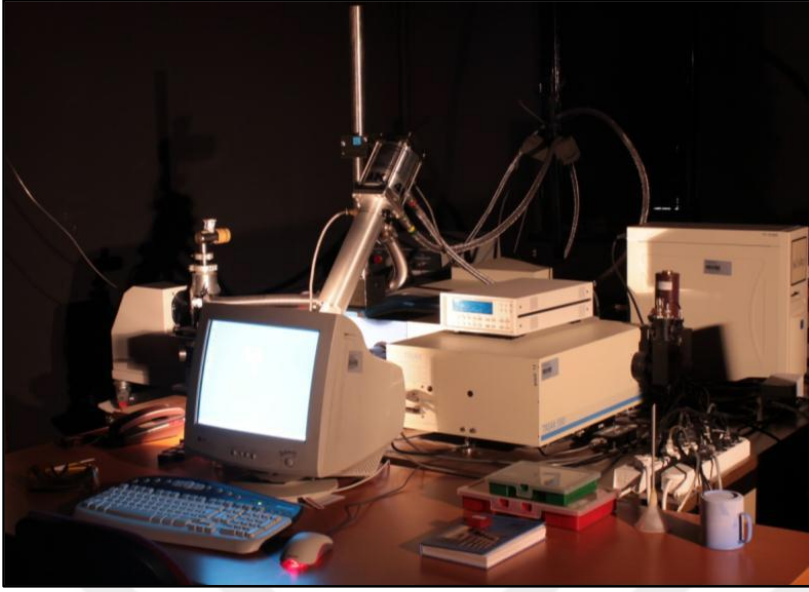
Resim 4.9. FTIR sistemi (Bruker Vertex 80)

FTIR spektrometresinde, temel olarak bir malzeme üzerine gönderilen kızılötesi bölgedeki fotonların malzeme tarafından soğrulması, dalga boyunun bir fonksiyonu olarak ölçülmektedir. Tez çalışmasında kullanılan Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan FTIR spektrometresi Resim 4.9'da gösterilmiştir. Bu sistemde bir adet HeNe lazer kaynağı, bir adet hava soğutmalı ve yüksek enerjili DLTGS dedektör, bir adet Broadband MCT dedektör ve bir adet NIR bölgede çalışan bir InGaAs dedektör mevcuttur. Ayrıca bu sistem, 1330-25000 nm dalga boyu aralığında analiz yapabilmektedir.

#### 4.2.8. Fotolüminesans (PL) Sistemi

Fotolüminesans, bir malzemenin enerji soğurması ve sonra görünür veya görünüre yakın ışınım yayınlanması süreci olarak tanımlanır. Katı malzemelerde elektromanyetik dalgaların soğrulması ve yayınlanması sonucunda meydana gelen optik özellikler, malzemelerdeki elektron enerji geçişleri ile açıklanabilir.

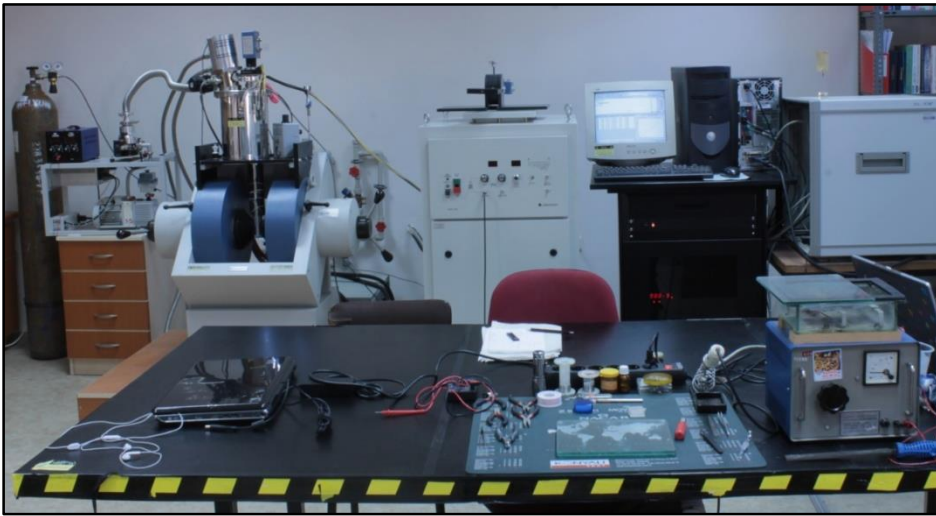
Bu tez kapsamında kullanılan, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan fotolüminesans (PL) spektrometresi Resim 4.10'da verilmiştir. Bu sistemde uyarma kaynağı olarak He-Cd lazer kullanılmaktadır. Ayrıca sistemde, morötesi görünür ve yakın kızılötesini dedekte edebilecek iki ayrı dedektör (CCD kamera ve sıvı azot soğutmalı InGaAs dedektör), düşük sıcaklık ölçümlerini gerçekleştirebileceğimiz kreostat, sıcaklık kontrol ünitesi, mekanik pompa ve optik dalga boyu seçici bulunmaktadır.



Resim 4.10. Fotolüminesans sistemi (Jobin-Yvon Florog-550)

#### 4.2.9. Hall etkisi ölçüm sistemi

Hall etkisi ölçüm sistemi, yarıiletken bir malzemenin veya cihazın; taşıyıcı yoğunluğu, mobilitesi, özdirenci vb. elektriksel parametrelerinin ölçülmesinde kullanılan bir sistemdir. Sistemin kontrol ünitesinden malzemeye uygulanan sabit akım, manyetik alan ve sıcaklık değerleri kontrol edilebilir. Bu kontrol ünitesinin bağlı olduğu bilgisayar, ölçüm esnasındaki verileri alarak programa aktarır. Bu program ile Van der pauw ve Hall ölçüm etkisi metotları kullanılarak malzemenin özdirenci, taşıyıcı yoğunluğu ve mobilite gibi değerleri bulunabilir.



Resim 4.11. Hall etkisi ölçüm sistemi (Lake Shore)

Tez çalışmasında kullanılan, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Hall etkisi ölçüm sistemi Resim 4.11'de sunulmuştur. Bu sistemde, 2 T'lık bir adet elektromıknatis, bir adet sabit akım kaynağı (10  $\mu$ A-100 mA), 1  $\mu$ V ile 1 V arasını hassas bir şekilde ölçebilen bir adet voltmetre ve numune sıcaklığını hassas bir şekilde ölçebilecek bir adet sıcaklık kontrol ünitesini bulunmaktadır. Ek olarak, 12-350 K sıcaklık aralığında ölçüm yapmaya olanak sağlayan kapalı devre Helyum soğutuculu bir sıcaklık ünitesi (kreostat) mevcuttur.

#### 4.2.10. Akım-gerilim (I-V) ölçüm sistemi



Resim 4.12. Akım-gerilim (I-V) ölçüm sistemi (Keithley 4200)

Tez çalışmasında üretilen kızılötesi dedektörlerin akım-gerilim (I-V) analizleri Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan ve Resim 4.12'de gösterilen I-V ölçüm sistemi ile gerçekleştirildi. Bu sistemde, I-V ölçümleri için gerekli akım-gerilim kaynakları ve bir numune tutucu ölçüm istasyonu bulunmaktadır. Tüm analizler bilgisayar ortamında gerçekleştirilebilmektedir. I-V sisteminin maksimum gücü; 1 A-20 W ve minimum gücü; 100 mA-2 W şeklinde ayarlanabilmektedir. I-V eğrisi ve belirlenecek elektriksel parametreler sistemdeki bir yazılım vasıtasıyla işlenmektedir. Numune tutucu ölçüm istasyonunda, I-V testleri yapılacak malzemedeki kontak alınabilmeyi sağlayan 4 tane test bağlantı noktası ve altın uçlu yaylı kontak pimleri bulunmaktadır. Bu ölçüm istasyonu karanlık ve aydınlık I-V ölçümlerine olanak sağlamaktadır.

### 4.3. VO<sub>x</sub> Kızılötesi Dedektörlerin Fabrikasyon Teknikleri

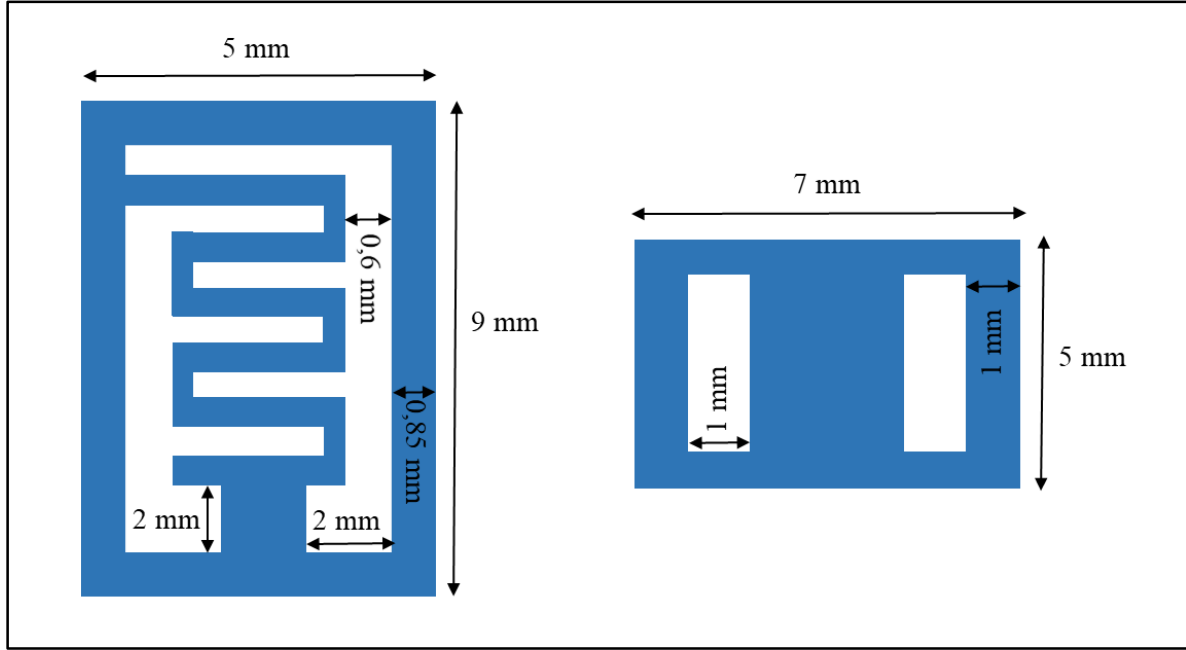
Tez kapsamında geliştirilen kızılötesi dedektör fabrikasyonu için; VO<sub>x</sub> tabanlı numunelerin yüzeyine, lazer tekniğiyle üretilen maskelerdeki desenler kullanılarak elektrot oluşturulma işleminde termal buharlaştırma ve hızlı ısı tavlama (RTA) sistemi kullanıldı.

#### 4.3.1. Lazer sistemi

Bu tez çalışmasında kullanılan lazer sistemi, Yb fiber, 900 nm-1200 nm dalga boyunda ve 20 W lazer gücündedir. Ayrıca bu sistem, 40 rpm'ye kadar dönme ve 0,05° konumlandırma hassasiyetine sahiptir. 180 x 180 mm işlem alanına sahip ve Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan bu sistemin görüntüsü Resim 4.13'te sunulmuştur. Tez kapsamında, bir metal üzerine lazer ablasyon tekniği ile iki farklı tipte elektrot şekilleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu elektrotların ölçüleri ve desenleri Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Resim 4.13. Lazer sistemi (Rofin-EasyMark)



Şekil 4.5. Elektrotların desenleri ve ölçüleri

#### 4.3.2. Termal buharlaştırma sistemi

Termal buharlaştırma sistemi, maksimum 1 inç çaplı numunelere, metal kaplamak için kullanılmaktadır. Bu sistemde buharlaştırma işlemi,  $10^{-7}$  mbar basınca kadar inildikten sonra gerçekleştirilmektedir. Sistem numuneleri, Au, Pt, Ni, Al gibi farklı metallerden her işlemde 4 adedini kaplayabilecek şekildedir. Ek olarak, buharlaştırma işlemi esnasında numuneler ısıtılabilen ve büyüme sırasında omik kontak oluşumuna imkân tanımaktadır. Numune tutacağı dönül olup, buharlaştırma sonrasında homojen bir katman oluşmasını sağlar.

Bu tez çalışması kapsamında, altın (Au) elektrot oluşturmak için kullanılan ve Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan termal buharlaştırma sistemi Resim 4.14'de sunulmuştur.



Resim 4.14. Termal buharlaştırma sistemi (BesTec)

### 4.3.3. Hızlı ısıt tavlama (RTA) sistemi

Hızlı ısıt tavlama (RTA) sistemi,  $10^{-6}$ 'lık bir vakum ortamında ya da çeşitli gaz ortamlarında halojen lambalı ısıtıcı tarafından 1000 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklara hızlı bir şekilde çıkabilen ve tekrar hızlı soğumaya olanak sağlayan bir tavlama fırınıdır.



Resim 4.15. Hızlı ısıt tavlama (RTA) sistemi

Bu tez çalışmasında, Au elektrot oluşturma işlemleri tamamlanan VO<sub>x</sub> tabanlı kızılötesi dedektörler, RTA sisteminde tavlansak altın elektrotların yüzey tutunumlarının artırılması sağlandı. Sistem içerisine yerleştirilen VO<sub>x</sub> tabanlı kızılötesi dedektörler, 10<sup>-6</sup> mbar vakum ortamında 300 °C’de 1,5 dk boyunca tavlandı. Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde bulunan ve tez çalışmasında kullanılan RTA sistemi Resim 4.15’te verildi.





## 5. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> İNCE FİMLERİN ÜRETİMİ

Tez kapsamında üretilmesi hedeflenen VO<sub>x</sub> tabanlı kızılötesi dedektör için termal algılama malzemesi olarak kullanılan VO<sub>x</sub> ince filmleri; V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ve VO<sub>2</sub> ince filmleridir. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ince filmleri, kızılötesi dedektör için termal algılama malzemesi olarak kullanımına yönelik performanslarının belirlenmesi ve detaylı Ar-Ge çıktılarına ulaşmak amacıyla iki farklı biriktirme tekniği ile biriktirildi.

### 5.1. Alttaş Hazırlama ve Temizleme İşlemi

Kullanılan tekniklerde üretilecek ince filmlerin homojen olmasının en önemli koşulu doğru alttaş temizliğidir. Yüzey kirliliğinin üretilen ince filmlerin kalitesi üzerine olumsuz etkisini ortadan kaldırmak için tez çalışması kapsamında kullanılan Si ve korning cam alttaşlar çeşitli işlemler uygulanarak temizlendi. Si alttaş temizleme işleminde, %99,99 saflıktaki metil alkol ve aseton kullanılarak her biri için 10 dakika ultrasonik banyo uygulandı ve her kimyasal temizlik sonrasında deiyonize (DI) su ile durulama işlemi uygulanarak yüksek saflıktaki kuru azot ile kurutma işlemi yapıldı. Korning cam temizliğinde ise, alttaşlar ilk olarak sabun ilave edilmiş deiyonize suda yumuşak bir sünger ile yüzeye zarar vermeyecek şekilde ovularak temizlendi. Daha sonra saf deiyonize su ile durulandıktan sonra %99,99 saflığa sahip etil alkol ile yıkanarak yüksek saflıktaki kuru azot ile kurulandı. Temizlik işlemleri ardından alttaşlar vakit kaybetmeden üretim yapılacak vakumlu sistemlere yüklendi.

### 5.2. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> İnce Filmlerin Eş Püskürtme Tekniği ile Üretimi

Tez kapsamında üretilmesi hedeflenen V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ince filmler, RF magnetron eş-püskürtme tekniği kullanılarak oda sıcaklığında biriktirildi. Biriktirme işleminde (%99,99) V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> hedefi kullanılarak n-Si ve korning cam alttaşlar üzerine 75 nm kalınlığa sahip ince film üretimi gerçekleştirildi. Filmlerin korning cam alttaş üzerine biriktirilmesinde, optik özellikler üzerine alttaşın etkisinin incelenmesi amaçlandı. Sistemde hedef-alttaş arasındaki mesafe yaklaşık 80 mm olarak ayarlandı. Daha sonra temizleme işlemi yapılan alttaşlar sisteme yüklendi ve sistemin vakuma gelmesi sağlandı. Sistem 10<sup>-6</sup> Torr basınç değerine ulaştığında yani sistem istenilen vakuma geldiğinde, kaplama işlemi için basınç 30 mTorr değerine

ayarlandı ve argon plazma ortamında kaplamalar başarılı bir şekilde gerçekleştirildi. İnce film üretimi sırasında; plazma gücü, kaplama basıncı ve hedef-altaş arası mesafe gibi parametreler kaplamayı etkileyebileceğinden dolayı, bu parametreler kaplama süresince sabit tutuldu. Eş püskürtme sistemi ile  $V_2O_5$  ince filmlerin kaplama işlemi tamamlandıktan sonra üretilen filmler, tavlamanın filmler üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla hava ortamında 300 °C ve 500 °C sıcaklıklarda tavlandı. Ar-Ge sürecinde üretilen filmlerin özellikleri detaylı bir şekilde araştırıldı.  $V_2O_5$  ince filmlerin bazı üretim parametreleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1.  $V_2O_5$  ince filmlerin bazı üretim parametreleri

Numune kodu	Numune kalınlığı (nm)	Tavlama sıcaklığı (°C)	RF gücü (W)
N1	75	Tavlammamış	100
N2	75	300	100
N3	75	500	100

### 5.3. $V_2O_5$ İnce Filmlerin Magnetron Püskürtme Tekniği ile Üretimi

Bu kısımda üretilmesi hedeflenen  $V_2O_5$  ince filmler magnetron püskürtme tekniği kullanılarak oda sıcaklığında biriktirildi. Biriktirme işleminde (%99,99)  $V_2O_5$  hedefi kullanılarak n-Si ve korning cam altaşlar üzerine farklı kalınlıklarda ince film üretimi gerçekleştirildi. Filmlerin korning cam altaş üzerine biriktirilmesinde, optik özelliklerin incelenmesi amaçlandı. Temizleme işlemi yapılan altaşlar sisteme yüklendi. Sistemde plazma gazı olarak Argon ve reaktif gaz olarak Oksijen kullanıldı. Ar-Ge sürecinde üretilen filmlerin özellikleri detaylı bir şekilde araştırıldı. Biriktirme parametreleri Çizelge 5.2’de sunuldu.

Çizelge 5.2.  $V_2O_5$  ince filmlerin biriktirme parametreleri

Biriktirme parametreleri	Optimize edilmiş değerler
Temel basınç	$4,7 \times 10^{-7}$ Torr
Çalışma basıncı	$4,3 \times 10^{-3}$ Torr
RF gücü	100 W
Altaş sıcaklığı	500 °C
Altaş-hedef arası mesafe	35 mm
Ar/O <sub>2</sub> oranı	80/20
Film kalınlığı	100, 200, 300 and 400 nm

## 6. VO<sub>2</sub> İNCE FİLMLERİN ÜRETİMİ

Tez kapsamında, VO<sub>2</sub> ince filmleri, kızılötesi dedektör için termal algılama malzemesi olarak kullanımına yönelik performanslarının belirlenmesi amacıyla eş püskürtme tekniği ile biriktirildi.

### 6.1. VO<sub>2</sub> İnce Filmlerin Eş Püskürtme Tekniği ile Üretimi

Bu bölümde ise tez kapsamında üretilmesi hedeflenen VO<sub>2</sub> ince filmler, RF magnetron eş-püskürtme tekniği kullanılarak biriktirildi. Biriktirme işleminde yüksek saflıktaki (%99,99) VO<sub>2</sub> hedefi kullanılarak n-Si ve korning cam alttaşlar üzerine 100 nm ve 150 nm kalınlığa sahip VO<sub>2</sub> ince filmlerin üretilmesi gerçekleştirildi. Yüzey pasivasyonu için 200 nm kalınlığında SiO<sub>2</sub> film n-Si alttaşlar üzerine kaplandı. Böylece VO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si yapısı elde edildi. Filmlerin korning cam alttaş üzerine biriktirilmesinde, optik özelliklerin araştırılması amaçlandı. Hedef ile alttaş arasındaki mesafe yaklaşık 80 mm olarak ayarlandı. Bölüm 5.1’de anlatılan temizleme işleminin uygulandığı alttaşlar eş-püskürtme sistemine yüklendi ve sistem temel basıncının 10<sup>-6</sup> mTorr basınca gelmesi için beklendi. Biriktirme süresince plazma gazı olarak Argon kullanıldı. İki farklı kalınlığa sahip VO<sub>2</sub> ince filmler farklı basınç (10, 20, 30 mTorr) değerlerinde kaplandı. Ayrıca kaplama süresince alttaş sıcaklığı her biriktirme için 350 °C olarak belirlendi ve RF gücü 100 W değerine ayarlandı. Geliştirilen filmlerin özellikleri detaylı bir şekilde incelendi. Biriktirme parametreleri Çizelge 6.1’te sunuldu.

Çizelge 6.1. VO<sub>2</sub> ince filmlerin biriktirme parametreleri

Numune kodu	Kalınlık (nm)	Basınç (mTorr)	Alttaş Sıcaklığı (°C)
N4	100	10	350
N5	100	20	350
N6	100	30	350
N7	150	10	350
N8	150	20	350
N9	150	30	350



## 7. KIZILÖTESİ DEDEKTÖR FABRİKASYONLARI

Geliştirilmesi hedeflenen kızılötesi dedektörlerin inter dijital elektroda sahip yapıda olması hedeflendi. Maskelerin tasarım ve çizimleri oluşturulduktan sonra paslanmaz çelik levha üzerine lazer işleme yöntemi ile desenler oluşturuldu. Bu tasarlanan maske kullanılarak iki farklı dedektör yapısı oluşturuldu. Bunlardan ilki,  $VO_2$  ince film kaplı numuneler üzerine inter dijital elektrotlar termal buharlaştırma tekniği ile oluşturuldu. Bir diğeri ise, boş n-Si alttaşlar üzerine inter dijital elektrotlar aynı teknik ile oluşturuldu. Boş alttaşlar üzerine elektrot oluşturma işlemi bittikten sonra  $VO_2$  ince filmler elektrotların üzerine kaplandı. Elektrotların film kaplanmamış bölgeleri dedektörün kontak noktalarıdır. Yapılan inter dijital elektrotlu kızılötesi dedektör tasarımı için geliştirilen maskeler Bölüm 4.3'te yer alan Şekil 4.5'te verildi. İki farklı maske tasarımı için ölçüler 5 mm x 9 mm ve 5 mm x 7 mm olarak belirlendi. Böylelikle,  $VO_2$  kaplı numuneler ve boş n-Si alttaşlar üzerinde metalik maske kullanılarak  $VO_x$  tabanlı kızılötesi dedektör fabrikasyonları gerçekleştirildi. Resim 7.1'de üretilen birkaç dedektörün fotoğrafı görülmektedir.



Resim 7.1. İnterdijital elektrotlu tasarlanan  $VO_x$  tabanlı kızılötesi dedektörler



## 8. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında  $V_2O_5$  filmleri iki farklı sistemle geliştirildi. İlk olarak, alttaş ısıtılmadan (oda sıcaklığında)  $V_2O_5$  filmleri üretildi ve daha sonra  $300\text{ }^\circ\text{C}$  ve  $500\text{ }^\circ\text{C}$ 'de tavlandı. İkinci olarak  $V_2O_5$  filmleri,  $500\text{ }^\circ\text{C}$  alttaş sıcaklığında ve farklı kalınlıklarda üretildi. Her iki şekilde geliştirilen filmlerin yapısal, optik ve yüzey morfolojik karakterleri belirlendi. Her iki gruptaki filmlerin aygıt performansını değerlendirmek hedefiyle MOS yapıda Schottky diyotlar üretilerek analizleri yapıldı. Çalışmanın devamında  $VO_2$  filmleri geliştirildi ve karakterize edildi. Bu filmlerin kızılötesi aygıt performansını belirlemek amacıyla, inter dijital geometride kızılötesi dedektör fabrikasyonu gerçekleştirilerek çıktı parametreleri analiz edildi. Bu çalışmalar ve elde edilen bulgular aşağıda sunuldu.

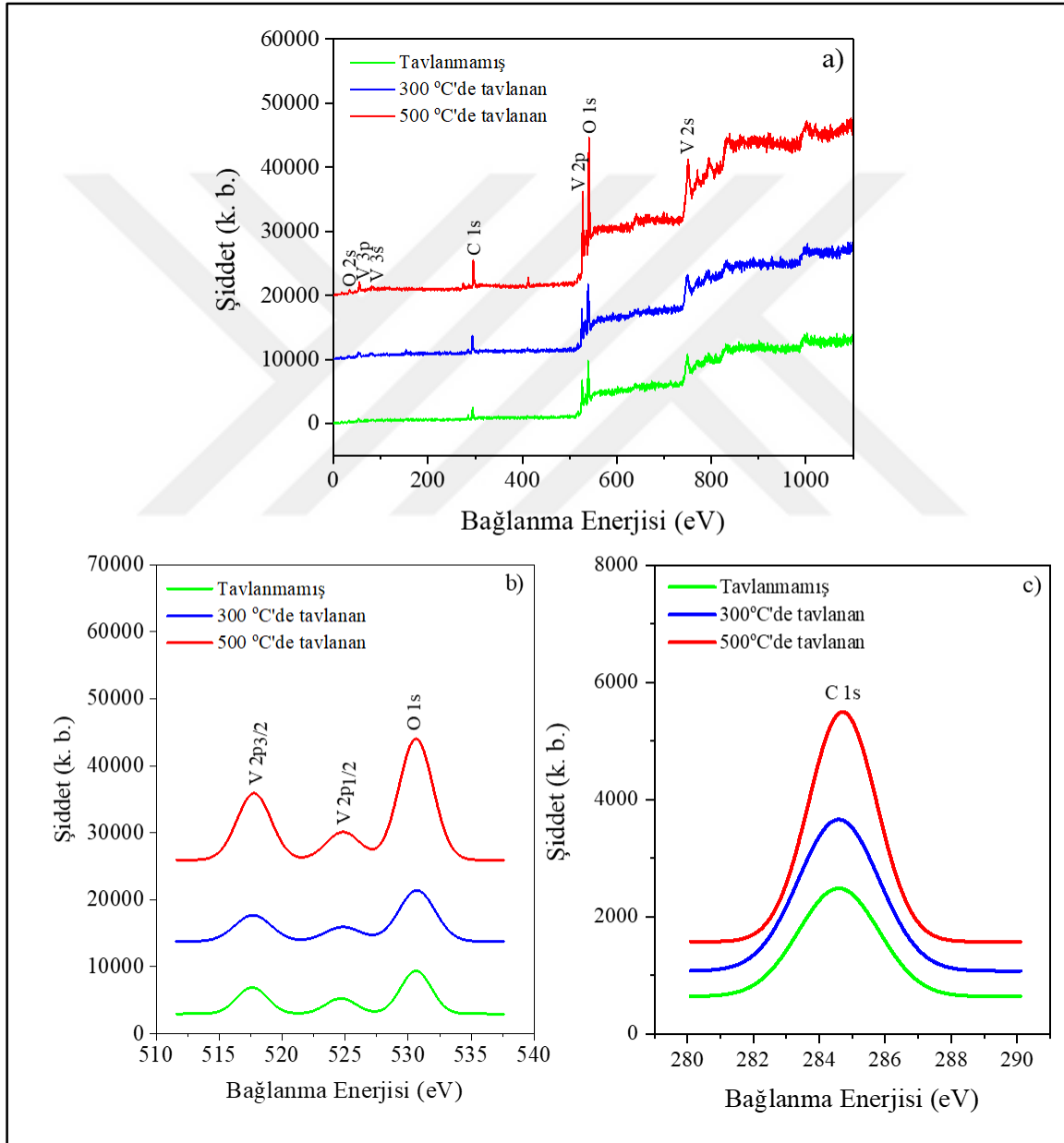
### 8.1. Oda Sıcaklığında Geliştirilen $V_2O_5$ İnce Filmlerin Karakterizasyonları

Bu bölümde magnetron eş-püskürtme sistemi ile  $V_2O_5$  hedef kullanılarak, oda sıcaklığında, n-Si ve korning cam alttaşlar üzerine geliştirilen ayrıca  $300\text{ }^\circ\text{C}$  ile  $500\text{ }^\circ\text{C}$ 'de tavlanan  $75\text{ nm}$  kalınlıklı  $V_2O_5$  ince filmlerin karakterizasyonları başlıklar halinde sunuldu.

#### 8.1.1. Yapısal analizler

Tez çalışması kapsamında n-Si alttaş üzerine geliştirilen  $V_2O_5$  ince filmlerin yapısal karakterizasyonunu araştırmak amacıyla XPS ve SIMS analizleri yapıldı. XPS, malzemelerin yüzey katmanını yaklaşık  $4\text{ nm}$  derinlikte analiz etmek için etkili bir yöntemdir. Şekil 8.1a'da tavlınmamış ve  $300\text{ }^\circ\text{C}$  ile  $500\text{ }^\circ\text{C}$ 'de tavlınmış  $V_2O_5$  filmlerin genel tarama XPS spektrumu sunuldu. Şekil 8.1b'de V 2p ve O 1s çekirdek seviyelerinin yüksek çözünürlüklü dar tarama XPS spektrumu verildi. Şekil 8.1c'de C 1s çekirdek seviyesinin yüksek çözünürlüklü dar tarama XPS spektrumu gösterildi. Karbon sinyali (bağlanma enerjisi  $284,6\text{ eV}$ 'dir) XPS çalışmalarında enerji referansı olarak kullanıldı. V2p ( $V2p_{3/2}$ ,  $V2p_{1/2}$ ) çekirdek seviyelerinin bağlanma enerjileri, vanadyumun  $V^{5+}$  oksidasyon durumu ile iyi bir uyum içinde olan  $517,4\text{ eV}$  ve  $524,3\text{ eV}$  değerlerine karşılık gelir. O1s çekirdek seviyesinin bağlanma enerji değeri ise  $530,6\text{ eV}$ 'dir ve bu bağlanma enerji değeri  $O^{2-}$  iyonlarına karşılık gelir [86].

Ek olarak,  $V_2O_5$  ince filmler için V2p ve O1s'lerin atomik konsantrasyonları hesaplandı ve Çizelge 8.1'de hesaplanan değerler listelendi. Tavlama sıcaklığının artması ile birlikte O1s atomik konsantrasyonunun arttığı gözlemlendi. Atomik konsantrasyonda ki bu artış, numunelerin hava atmosferinde tavlama sıcaklığında tavlama işlemine bağlanabilir. O/V atom oranları da Çizelge 8.1'e dahil edildi. Tavlama sıcaklığı 300° ile 500°C'de tavlama işlemine bağlanmıştır. Tavlama sıcaklığı ile O/V oranı sırasıyla 2,73, 3,02 ve 3,12 olarak belirlendi.

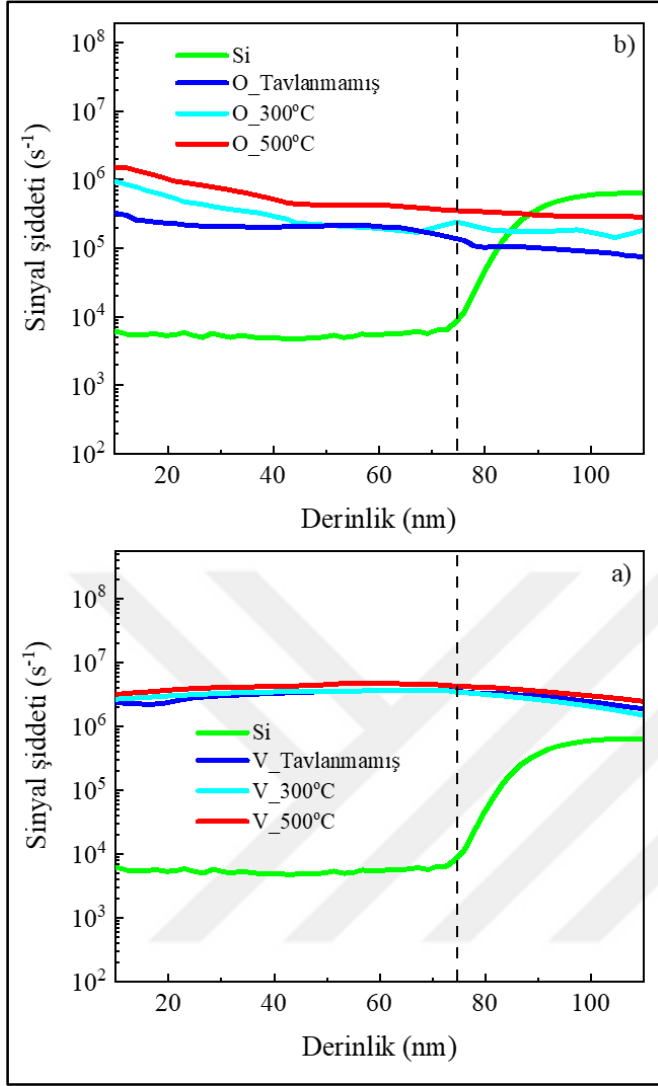


Şekil 8.1. Filmlerin XPS spektrumları a) genel tarama spektrumu b) V 2p ve O 1s çekirdek seviyelerinin dar tarama spektrumu c) C 1s çekirdek seviyesinin dar tarama spektrumu

Çizelge 8.1. Numunelerin atomik konsantrasyonları

Tavlama sıcaklığı (°C)	Atomik konsantrasyon (%)		
	O1s	V2p	O/V oranı
-	73,20	26,79	2,73
300	75,17	24,82	3,02
500	75,73	24,26	3,12

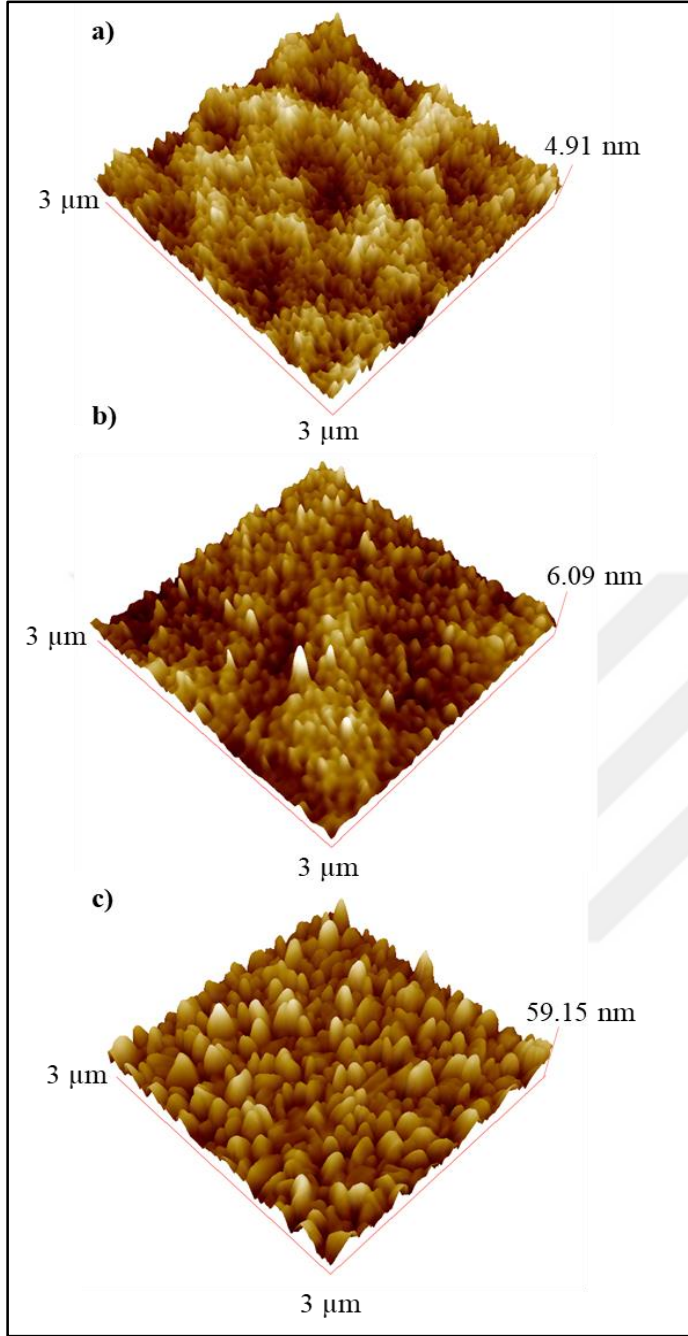
SIMS, yarıiletken cihaz yapılarının derinlik profilini anlamak için yaygın olarak kullanılan analitik bir tekniktir. Vanadyum (V), oksijen (O) ve silikon (Si) elementlerinin atomik dağılımları SIMS derinlik profili analizinden elde edildi. V, O ve Si dağılımları O<sub>2</sub> ve Cs tabancası kullanılarak ölçüldü. Şekil 8.2, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ince filmlerde ki atomik dağılımların (V ve O) karşılaştırılmasını göstermektedir. SIMS analizinden elde edilen krater alanı kullanılarak V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ince filmin kalınlığı, stylus tipi profilometre ile belirlendi. Kalınlığın yaklaşık 75 nm olduğu bulundu. Kaplama sırasında film kalınlığının kalınlık sensörü ile ölçülen kalınlık ile aynı olduğu görüldü. Filmlerin derinlik profilleri değerlendirildiğinde, 500 °C'de tavlanan filmin, film kalınlığı boyunca en iyi atomik dağılıma sahip olduğu belirlendi. Ayrıca artan tavlama sıcaklığı ile O miktarının arttığı açıkça görülmektedir. Bu sonuç, XPS ölçümünde elde edilen sonuçları desteklemektedir.



Şekil 8.2. Geliştirilen her bir  $V_2O_5$  filmi için a) V ve b) O atomik dağılımlarının karşılaştırılması

### 8.1.2. Morfolojik analizler

Filmlerin yüzey özelliklerini belirlemek için AFM ölçümleri gerçekleştirildi. Numunelerin  $3 \times 3 \mu m^2$  tarama alanına sahip üç boyutlu (3D) AFM görüntüleri Şekil 8.3'te gösterilmektedir. AFM sonuçları, tavlama sıcaklığının artması ile  $V_2O_5$  filmlerin yüzey pürüzlülüğü ve tanecik boyutu değerlerinin arttığını gösterdi. Şekil 8.3'te görüldüğü gibi en büyük pürüzlülüğün ve tanecik boyutunun  $500^\circ C$  tavlama sıcaklığında olduğu anlaşıldı. Ayrıca, morfolojik parametreler Çizelge 8.2'de listelenmiştir. Yüksek tanecik boyutu değerleri, ince filmlerin elektriksel iletkenliğinin geliştirilmesine olanak sağlayabilir ve bu da muhtemelen cihaz performansını etkileyebilir [87].



Şekil 8.3. a) Tavlanmamış b) 300 °C’de tavlanmış c) 500 °C’de tavlanmış  $V_2O_5$  ince filmlerin  $3 \times 3 \mu m^2$  tarama alanında üç boyutlu AFM görüntüleri

Çizelge 8.2.  $V_2O_5$  ince filmlerin morfolojik parametreleri

Tavlama sıcaklığı (°C)	Tanecik boyutu (nm)	RMS (nm)
-	11,6	2,19
300	23,5	3,46
500	56,5	7,80

### 8.1.3. Optik analizler

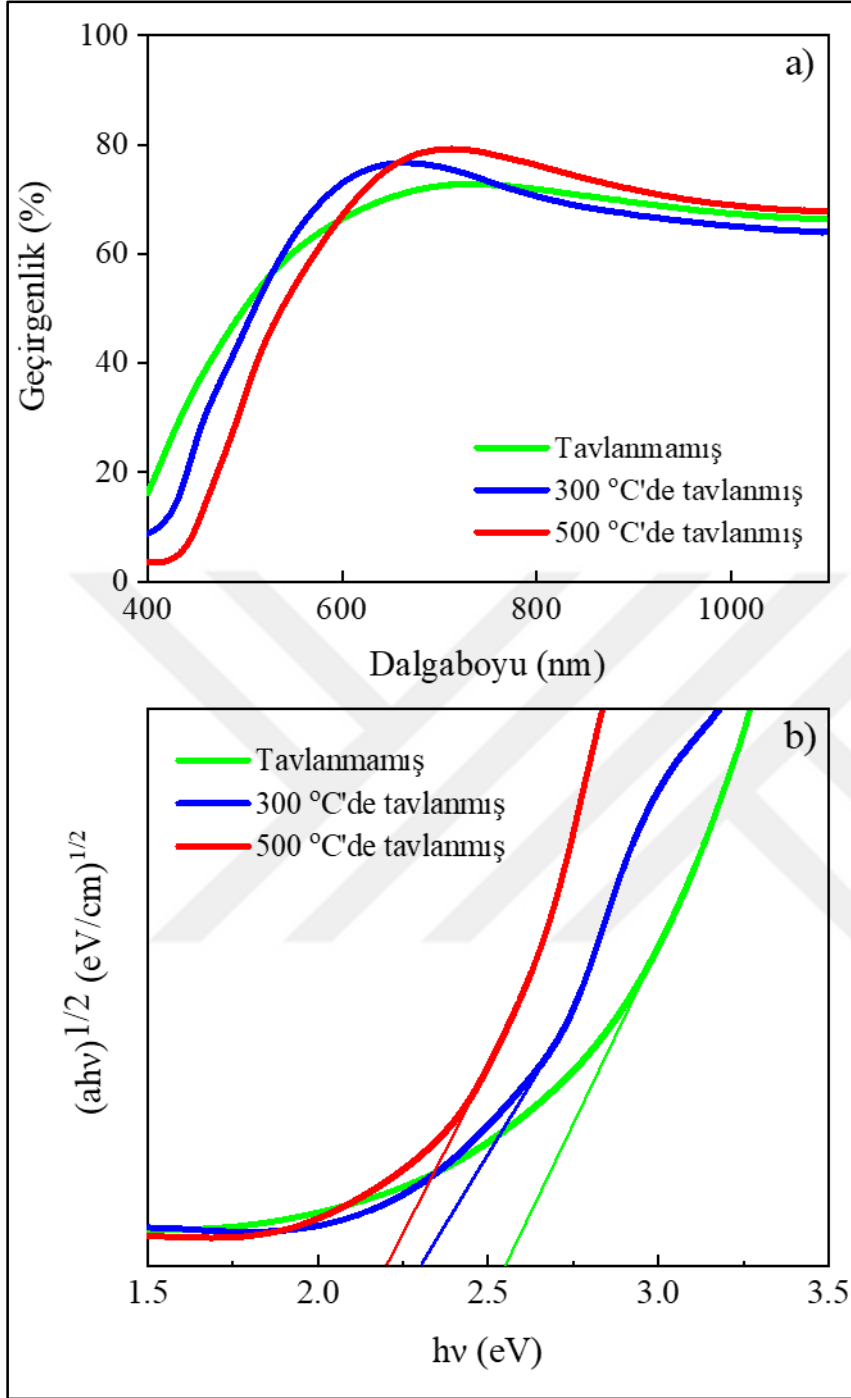
200-1100 nm dalga boyu aralığında korning cam alttaş üzerine biriktirilen  $V_2O_5$  ince filmin tavlama sıcaklığına bağlı optik geçirgenlik spektrumları Şekil 8.4a'da gösterildi. Tavlama sıcaklığının artırılmasıyla filmin optik geçirgenliğinin %72 'den %80 'e çıktığı görüldü. Tavlama sıcaklığının artmasıyla birlikte optik geçirgenlikteki bu artış, filmdeki kusurların azalmasına bağlanabilir.

Tavlama sıcaklığının optik enerji bant aralığı ( $E_g$ ) üzerine etkisi optik soğurma spektrumundan yararlanılarak belirlendi. Filmlerin  $E_g$  değerleri;

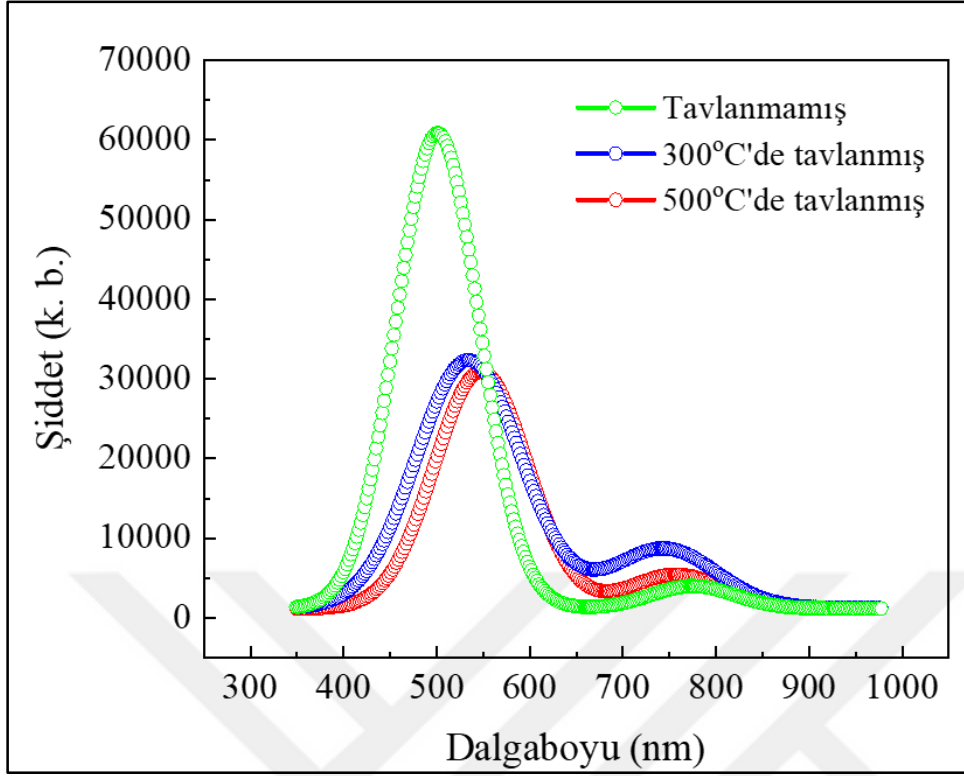
$$\alpha hv = A(hv - E_g)^n \quad (8.1)$$

Tauc modeli kullanılarak hesaplandı. Bu eşitlikte;  $hv$  foton enerjisi,  $A$  sabittir ve  $\alpha$  soğurma katsayısıdır. Direkt bant aralığı için  $n$  değeri  $1/2$  olarak alındı. Şekil 8.4b'de görüldüğü gibi,  $E_g$  değerleri tavlama sıcaklığının artmasıyla 2,6 eV'den 2,2 eV'ye değişmektedir. Soğurma kenarının da kırmızıya kaydığını da ifade eden bu azalmanın, filmlerin tanecik boyutunun artışı ile ilişkili olduğu değerlendirildi [88].

Şekil 8.5'de  $V_2O_5$  ince filmler için oda sıcaklığında fotoluminesans (PL) emisyon spektrumları gösterildi. Ölçümlerde, 50 mW gücünde ve 325 nm dalgaboyuna sahip He-Cd lazer, uyarma kaynağı olarak kullanıldı. Emisyon zirveleri 496, 532 ve 553 nm'de gözlemlendi. Tavlama sıcaklığının artmasıyla, emisyon pik pozisyonunda bir kırmızıya kayma olduğu ve tepe yoğunluğunda bir azalma olduğu gözlemlendi. Bu kaymanın, optik soğurma bant kenarının kayması ile benzerlik içerisinde olduğu değerlendirildi. Optik enerji bant aralığı değerleri emisyon dalga boyundan da ayrıca hesaplandı; tavlama sıcaklığına göre sırasıyla 2,5, 2,3 ve 2,2 eV olarak elde edildi. 750 nm civarındaki emisyon zirvesinin, biriktirme sırasında oluşan oksijen boşlukları gibi kusurlardan kaynaklandığı değerlendirildi [89].



Şekil 8.4. a) Optik geçirgenlik spektrumları b)  $(ahv)^{1/2}$ - $h\nu$  grafiği

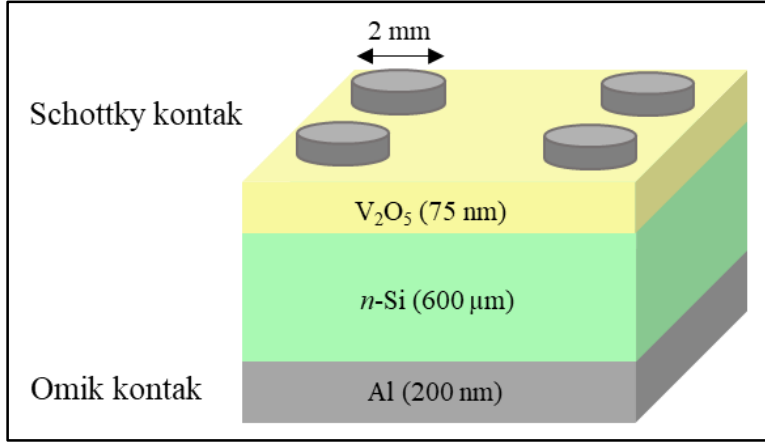


Şekil 8.5.  $V_2O_5$  ince filmlerin fotoluminesans spektrumları

#### 8.1.4. Schottky diyet fabrikasyonu

Filmlerin tüm karakterizasyon sonuçları kapsamlı bir şekilde değerlendirildi. Üretilen filmlerin elektronik uygulamalarda kullanımına yönelik Schottky diyet performansını da gözlemlemek amacıyla 500 °C'de tavlanan  $V_2O_5$  ince film üzerine üç farklı kontak (Al, Ti, Au) alınarak Schottky diyetler üretildi.

Diyet fabrikasyonu sürecinde, öncelikle Si alttaşın (üç parça) arka yüzeyi uygun paslanmaz maske ile magnetron püskürtme sistemine yüklendi. 200 nm kalınlığında Al filmi, oda sıcaklığında ve  $3,9 \times 10^{-3}$  mbar basınç altında yüksek saflıkta Al (% 99.999) biriktirilerek oluşturuldu. Daha sonra alttaş hızlı termal tavlama (RTA) yöntemi kullanılarak 300 °C'de 2 dakika süreyle tavlanaarak iyi bir omik kontak elde edildi. Bu aşamadan sonra, her bir parçanın (filmin) ön yüzeyine 200 nm kalınlığında yüksek saflıkta Al, Ti, Au elektrotları (yaklaşık 2 mm çapında) ayrı ayrı bir gölge maske vasıtasıyla biriktirildi. Diyet yapısının şematik diyagramı Şekil 8.6'da gösterilmektedir.



Şekil 8.6. Geliştirilen aygıtın şematik diyagramı

### 8.1.5. Aygıt karakterizasyonları

Modern cihaz teknolojisinde önemli bir yere sahip olan Schottky bariyer diyotları (SBD'ler) ile ilgili son zamanlarda birçok çalışma yapılmıştır. Metal oksit yarıiletken (MOS) tabanlı Schottky diyotlarının opto-elektronik uygulamalar için önemli olduğu düşünülmektedir. Arayüz katmanı (IL), MOS cihazlarının yüksek performansı için önemli bir faktördür. Şimdiye kadar, Schottky diyotunun performansını artırmak için yapılan çalışmalarda IL olarak farklı malzemeler ( $\text{MoO}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  ve  $\text{ZrO}_2$ ) kullanılmıştır. Bunlar arasında  $\text{V}_2\text{O}_5$ , Schottky diyot tabanlı cihaz uygulamaları için ilgi çekici bir metal oksit malzemedir [90].

Bu çalışmada  $500^\circ\text{C}$ 'de tavllanmış filmler üzerine oluşturulan  $\text{Al}/\text{V}_2\text{O}_5/\text{n-Si}$ ,  $\text{Ti}/\text{V}_2\text{O}_5/\text{n-Si}$  ve  $\text{Au}/\text{V}_2\text{O}_5/\text{n-Si}$  MOS yapıları Schottky diyotları için I-V ölçümleri yapıldı. Schottky diyotları nicel olarak analiz etmek için kullanılan klasik metot aşağıdaki gibidir [91].

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (8.2)$$

Bu eşitlikte,  $V$  ileri beslem voltajı,  $IR_s$  ifadesi diyotun seri direnci boyunca voltaj düşüşüdür.  $I_0$ , sıfır öngerilimdeki doyum akımıdır ve

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \quad (8.3)$$

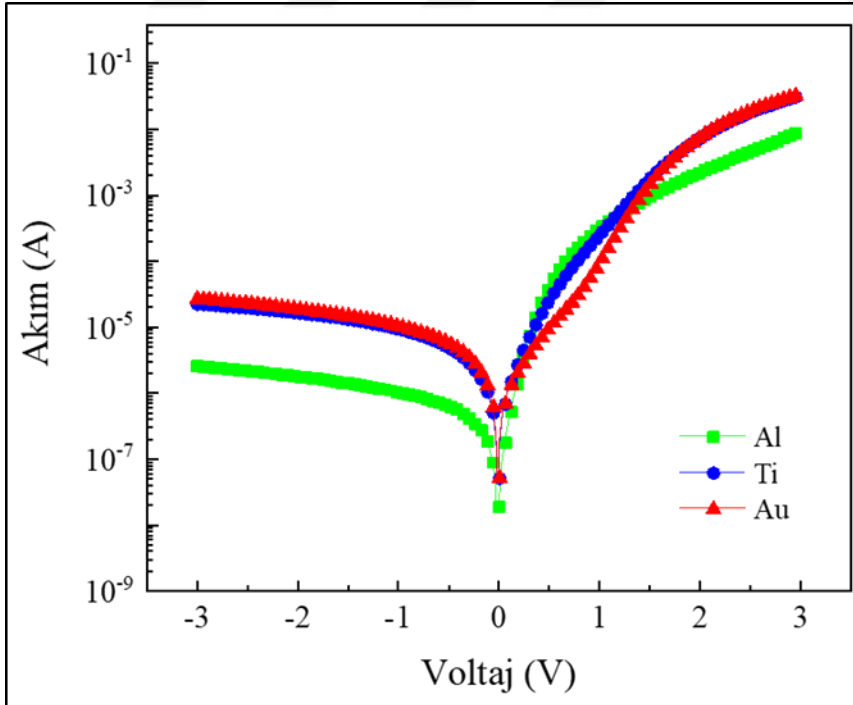
ile ifade edilir. Burada  $\Phi_B$ , sıfır öngerilimdeki bariyer yüksekliğidir ve

$$\Phi_B = \frac{kT}{q} \ln \left[ \frac{AA^*T^2}{I_0} \right] \quad (8.4)$$

ifadesinden elde edilebilir. Burada T, q, k, A, A\*, sırasıyla; Kelvin ölçeğinde çalışma sıcaklığı, elektronik yük, Boltzmann sabiti, doğrultucu kontak alanı ve Richardson sabitidir (n-Si için  $112 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ ) [92]. İdealite faktörü (n),  $\ln(I-V)$  grafiğinin doğrusal bölgesinin eğiminden hesaplanabilir.

$$n = \frac{q}{kT} \left( \frac{dV}{d(\ln I)} \right) \quad (8.5)$$

Şekil 8.7, oda sıcaklığında diyotların I-V eğrilerini göstermektedir. Diyotların hesaplanan n ve  $\Phi_B$  değerleri Çizelge 8.3'te verildi. İdealite faktörü, ideal bir diyot için 1'e eşittir; ancak deneysel olarak Schottky diyot için 1'den büyüktür. İdealite faktörünün ideal değeri 1 ile karşılaştırıldığında daha yüksek olan değer, üretim-rekombinasyon akımlarından, arayüz durumlarının varlığından, seri direnç etkisinden kaynaklanıyor olabilir [93].



Şekil 8.7. Oda sıcaklığında diyot örneklerinin I-V grafiği

Ayrıca  $R_s$  ve  $\Phi_B$  gibi Schottky parametreleri Bohlin tarafından geliştirilen Norde metodu ile de belirlenebilir. Bu metot aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir [94]:

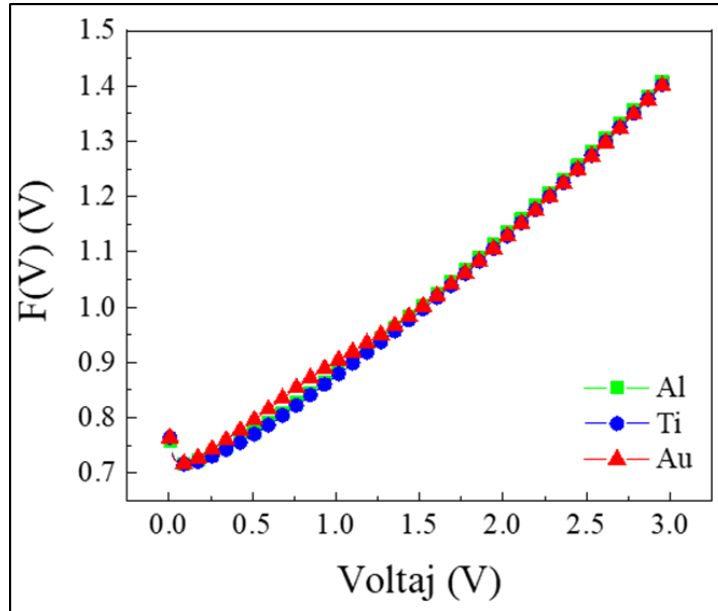
$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{q}{kT} \ln \left( \frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (8.6)$$

Burada  $I(V)$ , I-V eğrisinden elde edilen akım değeridir ve Schottky diyotun idealite faktöründen daha büyük bir tam sayıdır.  $F(V)$  ise Norde fonksiyonu olarak bilinir.

$$\Phi_B = F(V_{\min}) + \frac{V_{\min}}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (8.7)$$

$$R_s = \frac{kT(\gamma-n)}{qI_{\min}} \quad (8.8)$$

Tüm örnekler için bir  $F(V) - V$  grafiği Şekil 8.8'de gösterilmektedir.  $F(V_{\min})$  ve  $V_{\min}$ ,  $F(V) - V$  grafiğindeki minimum noktanın koordinatlarıdır.  $I_{\min}$ ,  $V_{\min}$ 'e karşılık gelen akım değeridir. Norde metodu kullanılarak hesaplanan  $\Phi_B$  ve seri direnç ( $R_s$ ) değerleri Çizelge 8.3'te gösterildi.



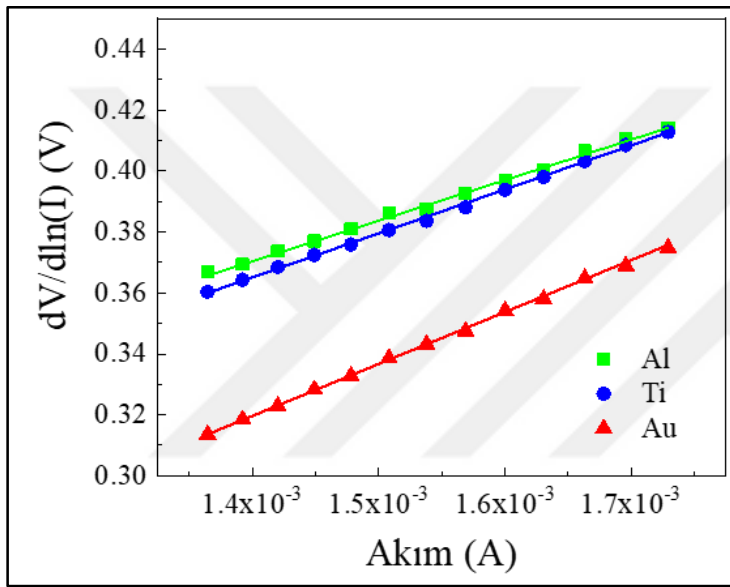
Şekil 8.8. Diyot örneklerinin  $F(V) - V$  grafiği

$\Phi_B$  ve  $R_s$  ayrıca Cheung metodu kullanılarak elde edildi. Cheung fonksiyonları şu şekilde ifade edilir [95]:

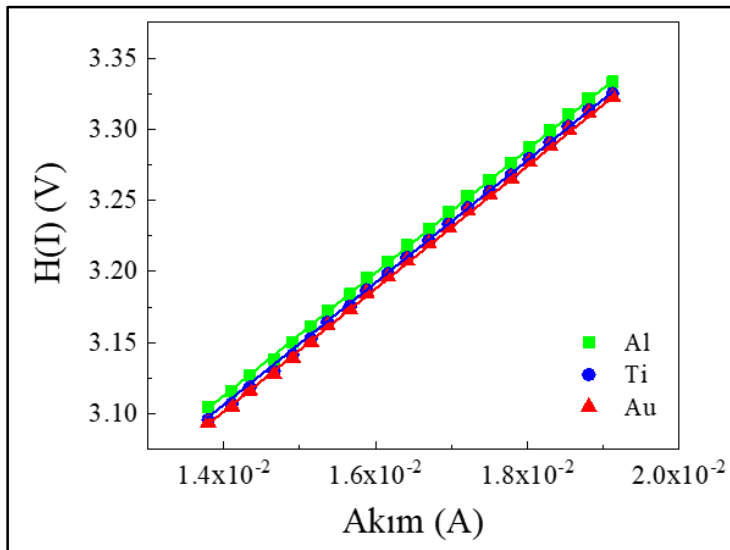
$$\frac{dV}{d(\ln I)} = IR_s + n \left( \frac{kT}{q} \right) \quad (8.9)$$

$$H(I) = V - n \left( \frac{kT}{q} \right) \ln \left( \frac{I}{AA^*T^2} \right) = n\Phi_B + IR_s \quad (8.10)$$

Burada,  $IR_s$  terimi, diyotların seri direnci boyunca voltaj düşüştür.  $dV/d\ln(I) - I$  ve  $H(I) - I$  grafikleri Şekil 8.9'da ve Şekil 8.10'da sunulmaktadır. Bu metot ile hesaplanan  $\Phi_B$  ve  $R_s$  değerleri Çizelge 8.3'te listelendi.



Şekil 8.9.  $dV/d\ln(I)$ -akım (I) grafiği



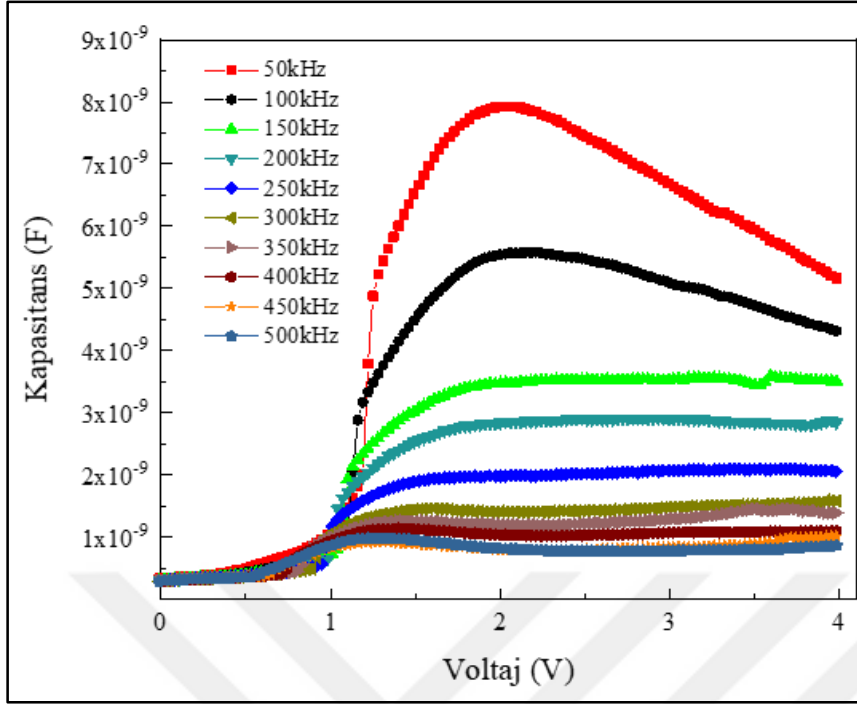
Şekil 8.10.  $H(I)$ -akım (I) grafiği

Çizelge 8.3. Üç farklı kontak için çeşitli metotlarla elde edilen elektriksel parametrelerin karşılaştırılması

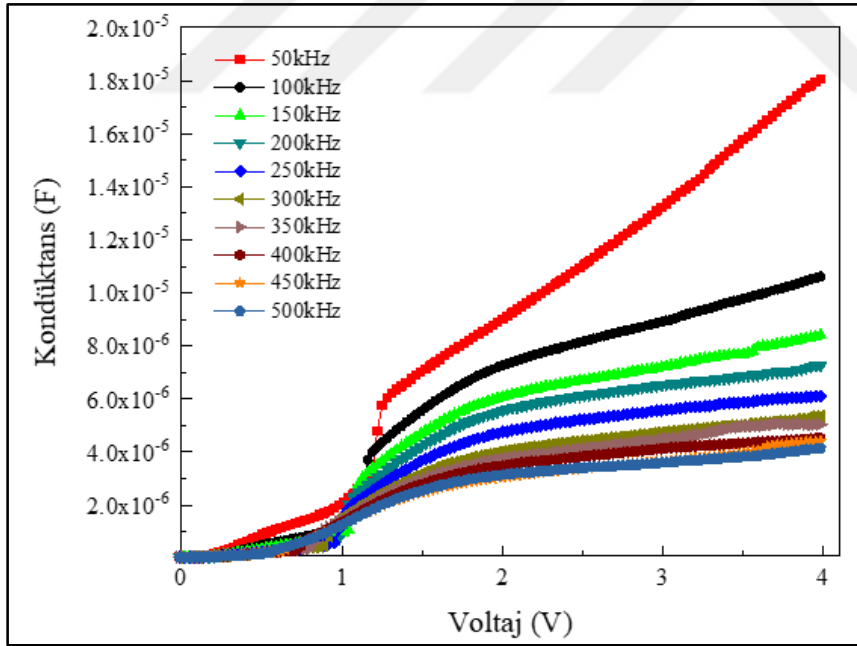
Parametreler	Metot	Al kontak	Ti kontak	Au kontak
n	lnI – V	1,65	2,01	2,68
	lnI – V	0,77	0,72	0,72
$\Phi_B$ (eV)	H(I)	0,81	0,76	0,70
	F(V)	0,82	0,79	0,73
$R_s$ ( $\Omega$ )	dV/d ln I	1502	1183	3206
	H(I)	1317	1043	1078
	F(V)	749	2685	4106

Klasik, Norde ve Cheung metodlarından elde edilen, diyotların temel elektriksel parametreleri (n,  $\Phi_B$  ve  $R_s$ ) arasında iyi bir uyum vardır. Üretilen tüm diyotlar iyi düzeltme performansına sahip olmalarına rağmen, Al Schottky kontağı, daha iyi düzeltme performansı nedeniyle öne çıkmaktadır. Karakterizasyon sonuçları, n = 1,65,  $\Phi_B$  = 0,77 eV ve  $R_s$  = 749  $\Omega$  olarak bulunan Al/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Ti Schottky bariyer diyotunun daha iyi diyot performansı sergilediğini gösterdi. Üretilen MOS yapılı Schottky bariyer diyotunun elektro-optik uygulamalarda kullanımı açısından oldukça uygun olduğu belirlendi.

Al/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Ti Schottky bariyer diyotunun daha iyi performans sergilediğini belirledikten sonra bu diyotun birde kapasite-voltaj (C-V) ve kodüktans-voltaj (G/w-V) ölçümleri oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Frekansa bağlı gerçekleştirilen ölçümlerin grafikleri Şekil 8.11’de ve Şekil 8.12’de sunuldu. Şekillerden görüldüğü üzere, elde edilen sonuçlar, MOS yapılı diyotun dielektrik özelliklerinin frekansa bağımlı olduğunu açık bir şekilde göstermektedir. C-V eğrilerinin yaklaşık 1,2 V’da belirgin bir pik değerine sahip olduğu ve artan frekanslarda bu pik değerinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca pikin konumunun, gerilimin artmasıyla, yüzey durumlarının yeniden yapılanması ve düzenlenmesi nedeniyle yüksek voltajlara doğru kaydığı değerlendirildi. Diğer önemli sonuç ise, numunenin indüktif davranışdır. Diğer bir deyişle, kapasitans (C) değerlerinin zirveden sonra azalmasına karşın G/W değerleri artmaktadır. C ve G/W değerlerinin bu davranışı, arayüzey durumlarının ve seri direncin varlığına atfedilebilir [96].



Şekil 8.11. Kapasitans - voltaj (V) grafiği



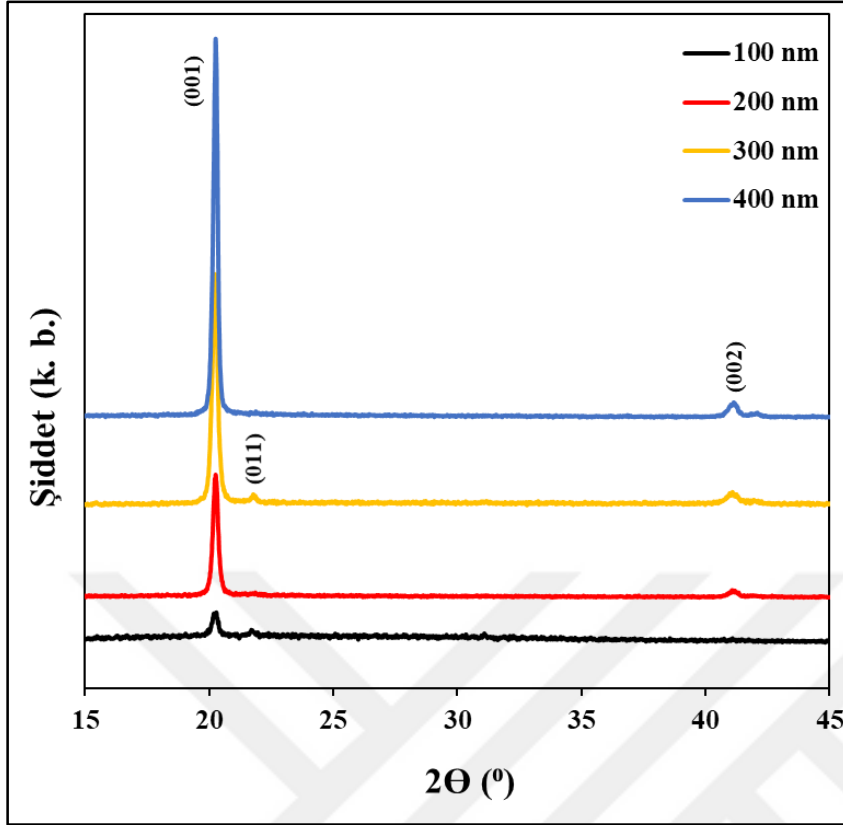
Şekil 8.12. Kondüktans - voltaj (V) grafiği

## 8.2. 500 °C Alttaş Sıcaklığında Geliştirilen V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> İnce Filmlerin Karakterizasyonları

Bu bölümde Magnetron Püskürtme Sistemi ile V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> hedef kullanılarak, 500 °C alttaş sıcaklığında, n-Si ve korning cam alttaşlar üzerine geliştirilen farklı kalınlıklarda (100 nm, 200 nm, 300 nm, 400 nm) biriktirilen V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ince filmlerin karakterizasyonları başlıklar halinde sunuldu.

### 8.2.1. Yapısal analizler

V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ince filmlerin yapısal özellikleri XRD, Raman ve XPS sistemleri ile analiz edildi. Şekil 8.13, çeşitli kalınlıklarda RF püskürtmeli V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ince filmlerin XRD desenlerini göstermektedir. Her bir desen, sırasıyla 100, 200, 300 ve 400 nm'lik kalınlıklara karşılık gelen farklı kırınım desenini göstermektedir. Gözlemlenen tüm XRD pikleri, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>'in ortorombik fazına atfedilebilir [97]. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> filminin (001) düzlemine karşılık gelen  $2\theta = 20,26^\circ$ 'de tüm numuneler için güçlü bir kırınım piki gözlemlendi. Bu gözlem, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> filminin, alttaşa dik c eksenini boyunca büyüdüğünü gösterir. Şekil 8.13'te görüldüğü gibi, (001) piki, artan film kalınlığı ile daha şiddetli ve daha keskin (dar) hale gelmiştir. Numuneler için pik yarı maksimum genişlikleri (FWHM) Çizelge 8.4'te listelenmiştir. Bu çizelgeden, artan film kalınlığının kristaliteyi arttırdığı anlaşıldı. 400 nm film kalınlığı en yüksek ve en keskin (001) tepe yoğunluğuna sahiptir. Sonuç olarak, XRD verileri film kalınlığının V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ince filmlerin kristalinitesi üzerinde olumlu etki sağladığını gösterdi.



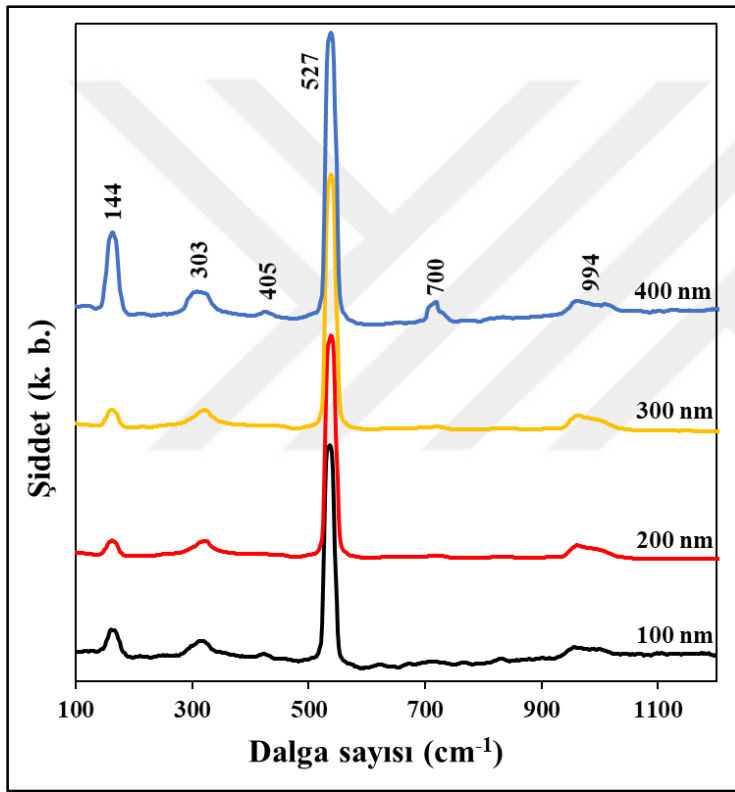
Şekil 8.13.  $V_2O_5$  ince filmlerin XRD desenleri

Filmlerin kalınlığı ile tanecik boyutundaki değişim Çizelge 8.4'te özetlendi. Sonuçlar, tanecik boyutunun 100 nm ile 400 nm arasında değişen kalınlıkla arttığını gösterdi. 100, 200, 300 ve 400 nm kalınlıktaki  $V_2O_5$  ince filmler için tanecik boyutu değerleri sırasıyla 37, 56, 57 ve 69 nm olarak bulundu.

Çizelge 8.4.  $V_2O_5$  ince filmlerin yapısal parametreleri

Film Kalınlığı (nm)	$2\theta$ (°)	FWHM (nm)	Tanecik Boyutu (nm)
100	20,23	0,38	37
200	20,25	0,25	56
300	20,27	0,24	57
400	20,26	0,20	69

Şekil 8.14, 100–1200  $\text{cm}^{-1}$  aralığında çeşitli kalınlıklarda  $\text{V}_2\text{O}_5$  ince filmlerden toplanan Raman spektrumunu göstermektedir. Filmlerin Raman spektrumları, bu filmlerin polikristal doğasını gösteren, ayırt edilebilir Raman piklerini sergiler. Karakteristik pikler, 144, 303, 405, 527, 700 ve 994  $\text{cm}^{-1}$  gibi daha düşük titreşim frekanslarında ortorombik  $\text{V}_2\text{O}_5$ 'e atfedilmiştir. 144  $\text{cm}^{-1}$ 'deki Raman piki, V-O-V bağlarının titreşimine ve 405  $\text{cm}^{-1}$ 'deki pik V=O titreşim bağlarına ve 303  $\text{cm}^{-1}$  ve 527  $\text{cm}^{-1}$ 'deki pikler  $\text{V}_3\text{=O}$  bağlarının gerilme titreşimlerine atfedildi. Ayrıca, 700  $\text{cm}^{-1}$ 'deki pik  $\text{V}_2\text{=O}$  bağlarının ve 994  $\text{cm}^{-1}$ 'deki pik V=O bağlarının titreşimine atfedildi [98].

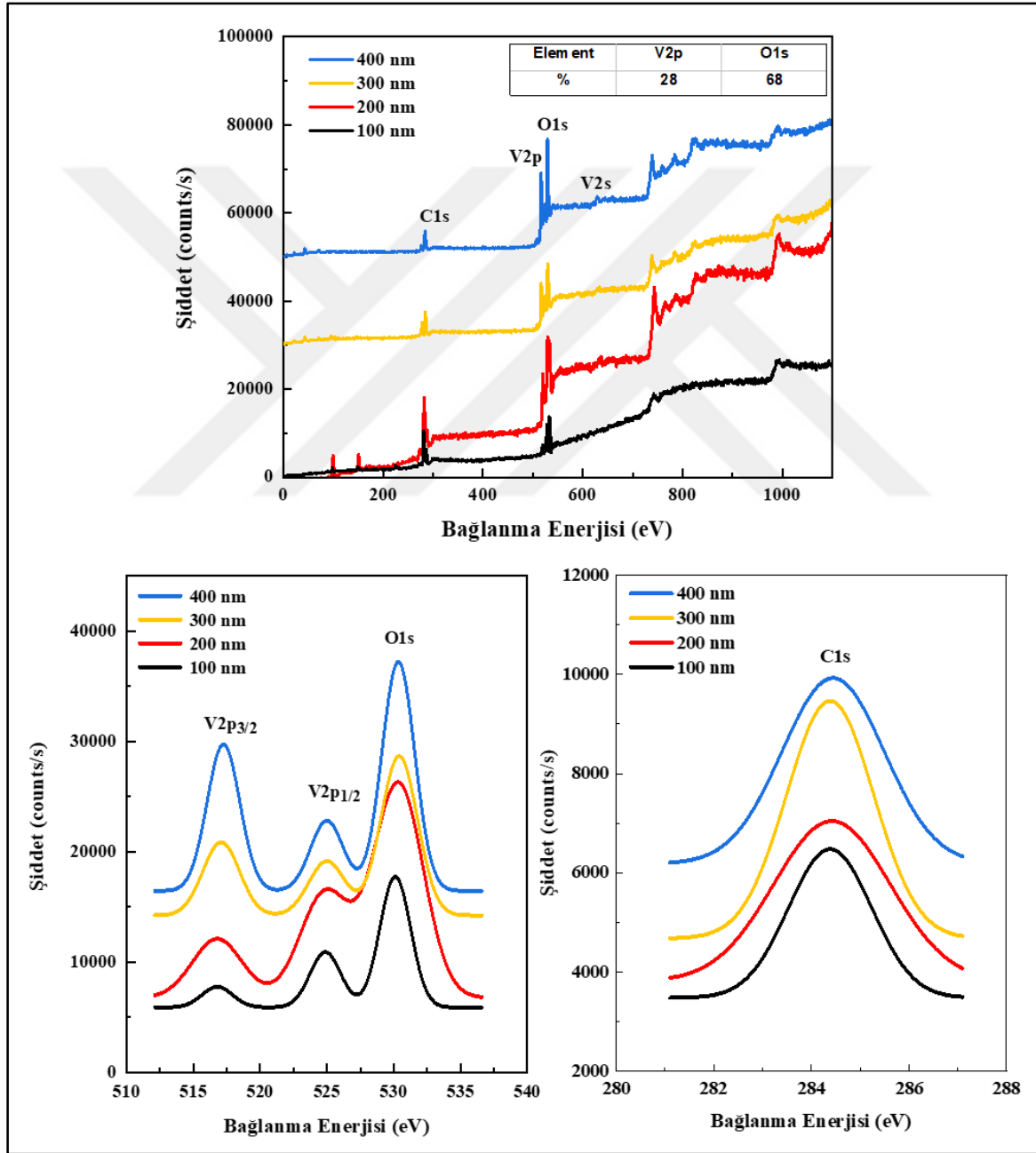


Şekil 8.14.  $\text{V}_2\text{O}_5$  ince filmlerin Raman spektrumları

Raman spektrumları, farklı kalınlıklardaki  $\text{V}_2\text{O}_5$  ince filmlerin XRD sonuçlarıyla tutarlı olan tek fazlı bir  $\text{V}_2\text{O}_5$  yapısına sahip olduğunu göstermektedir.

$\text{V}_2\text{O}_5$  ince filmlerin XPS tarama spektrumları Şekil 8.15'te gösterildi. Bağlanma enerjileri, 284 eV'de karbon (C) sinyaline karşı kalibre edildi. XPS spektrumlarında, karşılık gelen pikler, numunelerde vanadyum, karbon ve oksijen elementlerinin varlığını doğrular.  $\text{V}_2\text{O}_5$  filmler için, sırasıyla 517 eV, 525 eV ve 530 eV olan V 2p<sub>3/2</sub>, V2p<sub>1/2</sub> ve O1s çekirdek seviyelerinin bağlanma enerjileri Şekil 8.15'te görülmektedir. Bu bağlanma enerjisi (BE)

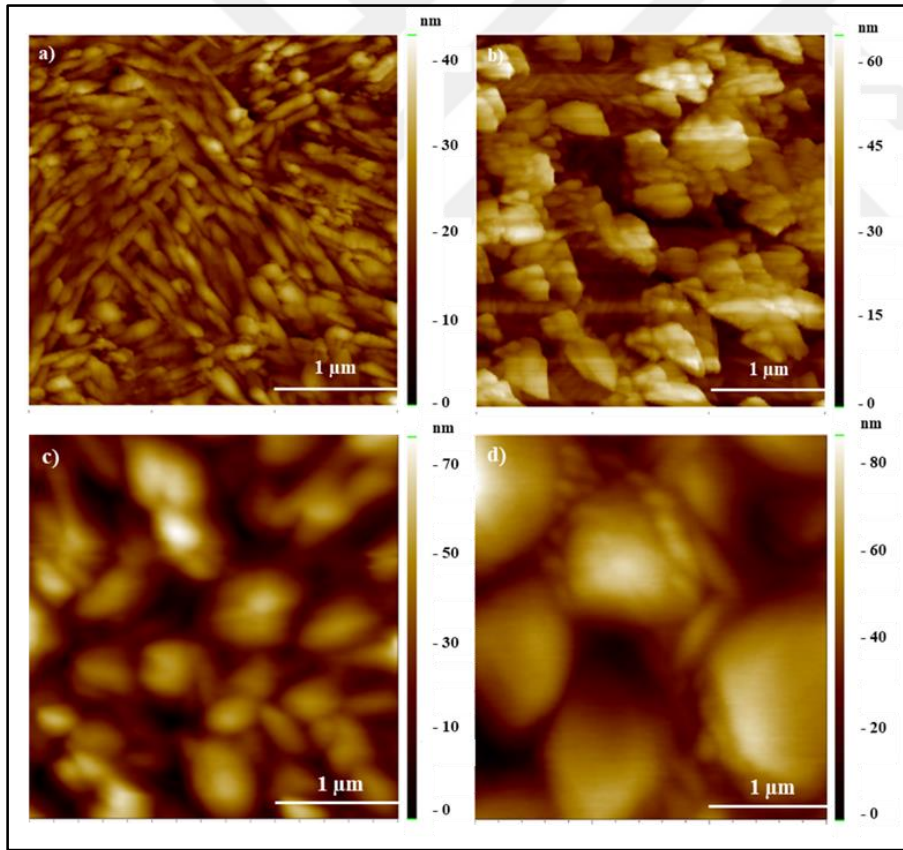
değerleri (517 eV, 525 eV) vanadyumun  $V^{+5}$  durumuna karşılık gelir ve  $EB = 530$  eV metal oksitteki ( $V_2O_5$ )  $O^{2-}$  iyonlarına karşılık gelir. XPS spektrumundan, 400 nm kalınlıkta film için V 2p ve O 1s'lerin atomik konsantrasyonları sırasıyla %28 ve %68 olarak hesaplandı. Bu konsantrasyon değerleri filmde yaklaşık %5 değerinde değişiklik gösterdi. Ölçülen O/V oranı 2,37 olarak belirlendi. Bu oran, literatürde saf  $V_2O_5$  için 2,5 olarak verilen değer ile tutarlıdır [99].



Şekil 8.15.  $V_2O_5$  ince filmlerin XPS spektrumları

### 8.2.2. Morfolojik analizler

$V_2O_5$  ince filmlerin yüzey morfolojisi AFM tarafından incelenmiştir. Oda sıcaklığında tüm ölçümler  $3 \times 3 \mu m^2$  tarama alanında yapıldı. Çeşitli film kalınlıklarındaki  $V_2O_5$  ince filmlerin iki boyutlu (2D) topografik görüntüleri Şekil 8.16'da gösterilmektedir. AFM görüntüleri, filmlerin yüzey özelliklerini anlamak için bir kanıttır.  $V_2O_5$  filmlerin yüzey pürüzlülüğünün kök ortalama kare (RMS) değerleri, artan film kalınlıkları ile 4,21 nm'den 9,96 nm'ye yükselmiştir. AFM görüntüleri, taneciklerin boyutunun, şeklinin ve düzenlemesinin çeşitli kalınlıklarda  $V_2O_5$  filmler için farklı olduğunu göstermektedir. AFM ve XRD sonuçları, film kalınlığının artmasıyla tanecik boyutunun arttığını göstermektedir. Parçacıkların boyutundaki bu artış, taneciklerin kümelenmesi ya da başka bir ifadeyle topaklaşması ile açıklanabilir [100].



Şekil 8.16.  $V_2O_5$  ince filmlerinin AFM görüntüleri a) 100 nm kalınlıklı, b) 200 nm kalınlıklı c) 300 nm kalınlıklı ve d) 400 nm kalınlıklı

Çizelge 8.5. Farklı kalınlıklardaki V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ince filmlerin morfolojik parametreleri

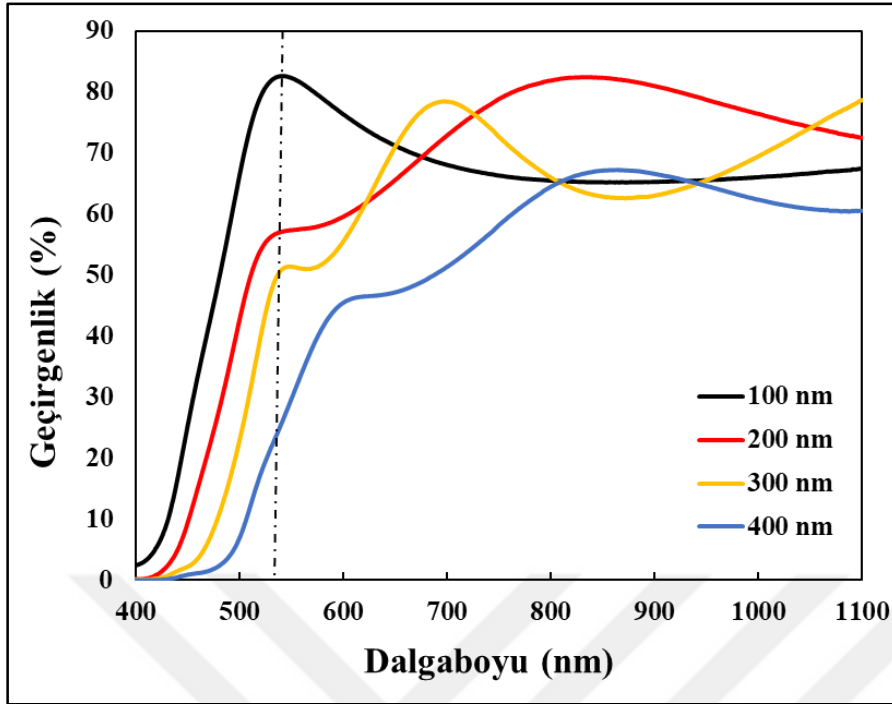
Film Kalınlığı (nm)	Tanecik Boyutu (nm)	RMS (nm)
100	25,6	4,21
200	43,5	5,04
300	76,8	5,58
400	124,2	9,96

### 8.2.3. Optik analizler

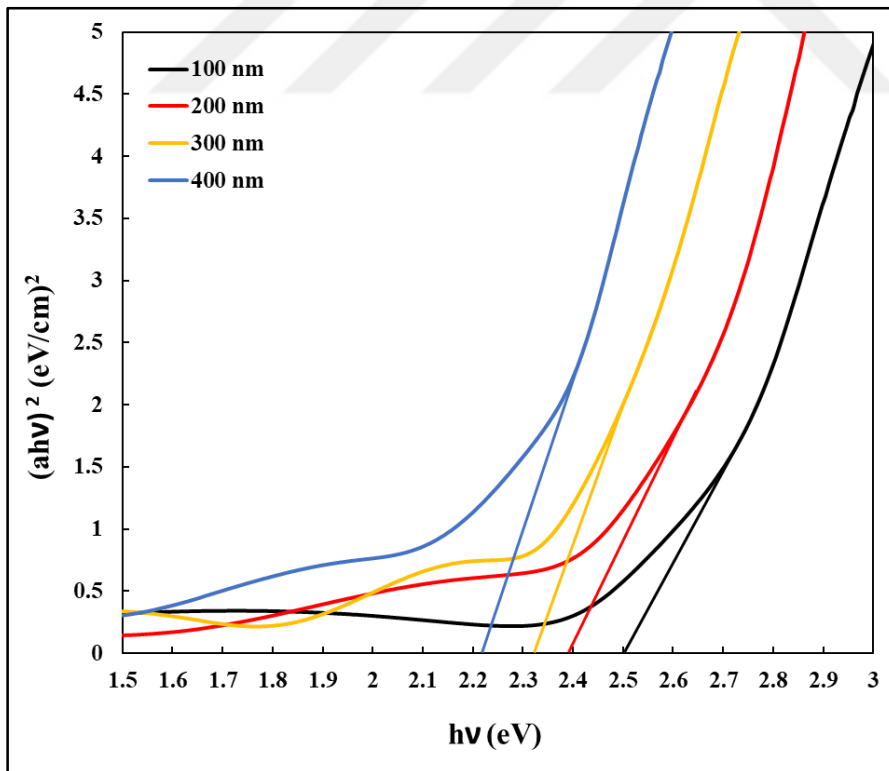
V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ince filmlerin optik özellikleri UV-Vis spektrometre kullanılarak analiz edildi. Yarı iletken malzemelerin optik özellikleri; tanecik boyutu, yüzey pürüzlülüğü ve film kalınlığı gibi film parametrelerine bağlıdır. Pek çok elektro-optik uygulama için, filmin optik geçirgenliği önemli bir role sahiptir. Şekil 8.17, farklı kalınlıklarda V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ince filmler için dalga boyunun bir fonksiyonu olarak geçirgenlik spektrumlarını göstermektedir. Film kalınlığı arttıkça görünür bölgede geçirgenlik yüzdesinin yaklaşık % 80'den % 20'ye düştüğü açıkça görülmektedir. Bu, artan film kalınlığından dolayı artan absorpsiyona atfedilir [101].

Yarı iletken bir malzemenin ışığı emme kapasitesi, soğurma katsayısı ile değerlendirilir. Film kalınlığının optik enerji aralığı ( $E_g$ ) değerleri üzerindeki etkisi, optik absorpsiyon ölçümleri ile analiz edildi. Numunelerin bant aralığı değeri, foton enerjisi ( $h\nu$ ) ve soğurma katsayısı ( $\alpha$ ) arasında ilişki yani Tauc modeli kullanılarak hesaplanabilir.

Şekil 8.18'de sunulan Tauc eğrileri kullanılarak V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ince filmlerin  $E_g$  değerlerinin 2,23 eV-2,50 eV aralığında olduğu bulundu.  $E_g$  değerindeki bu azalma, tanecik boyutundaki artışa bağlanabilir.

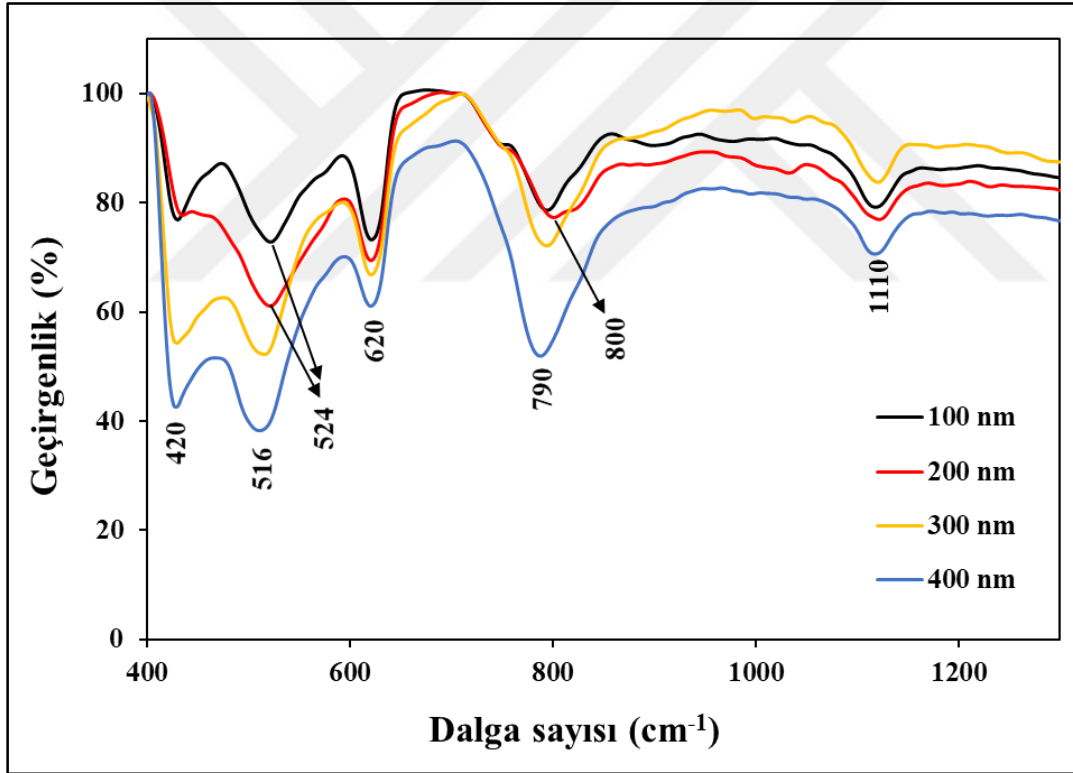


Şekil 8.17. Farklı kalınlıklardaki  $V_2O_5$  ince filmlerin geçirgenlik spektrumları



Şekil 8.18. Farklı kalınlıklardaki  $V_2O_5$  ince filmlerin Tauc eğrileri

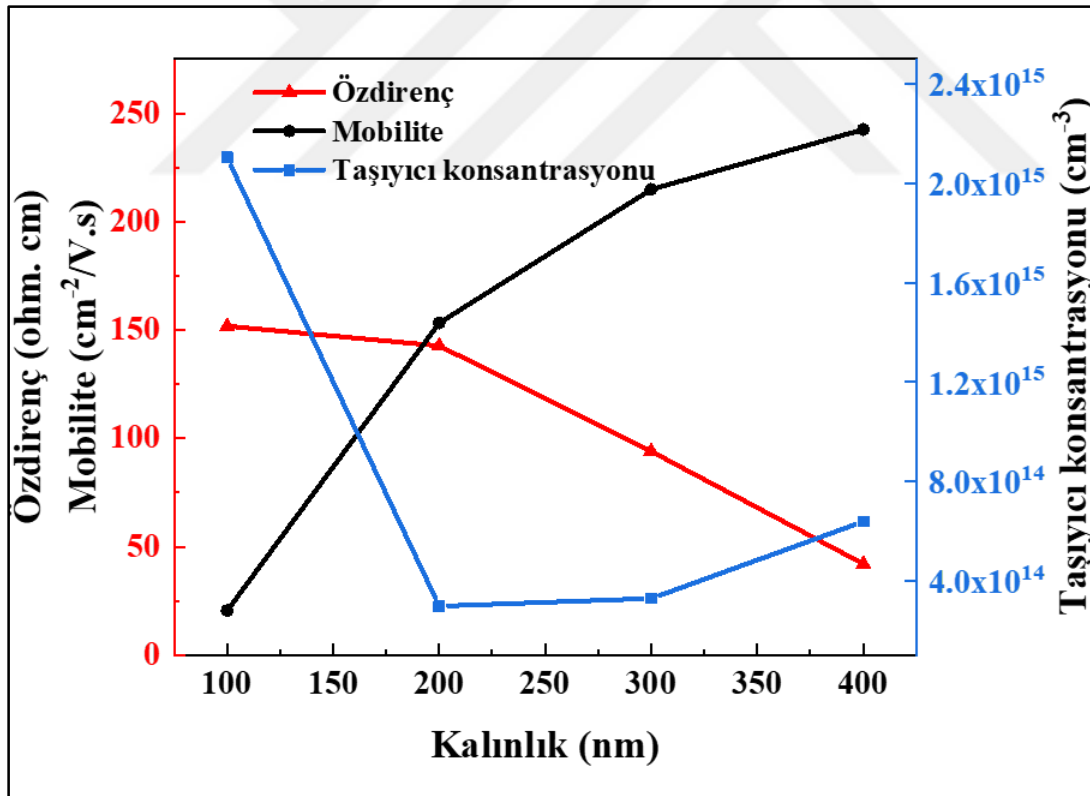
Geliştirilen  $V_2O_5$  filmlerinin kimyasal bağ yapısını değerlendirmek amacıyla FTIR spektrometrik ölçümleri yapıldı. FTIR spektrumu, farklı kalınlıklarda  $V_2O_5$  filmler için 400–4000  $cm^{-1}$  aralığında kaydedildi ve Şekil 8.19'da gösterildi. Çeşitli kalınlıklarda biriktirilen  $V_2O_5$  ince filmler, 420  $cm^{-1}$  ve 1150  $cm^{-1}$  arasında vanadyum oksijen bağına karşılık gelen titreşim modları sergiler. V-O-V köprüleme modu 420  $cm^{-1}$ 'deki tepeye karşılık gelir. 516  $cm^{-1}$  ve 524  $cm^{-1}$ 'de V-O-V grubunun simetrik gerilme titreşimlerine atfedilebilecek düşük bir frekans bandı gözlemlendi. 620  $cm^{-1}$ 'deki tepe Si-Si bağına ve yaklaşık 1110  $cm^{-1}$ 'deki tepe Si-O-Si bağına karşılık gelir. 800  $cm^{-1}$ 'deki tepe noktası, iki vanadyum atomu (V-O-V) tarafından paylaşılan oksijen bağının titreşimlerini temsil eder. Yaklaşık 800  $cm^{-1}$ 'deki tepe, kalınlık değişikliği ile ilişkili olarak 790  $cm^{-1}$ 'e kaymıştır [102]. Bu analizler, literatüre uygun olarak  $V_2O_5$  yapısına ait kimyasal bağların oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 8.19. Farklı kalınlıklardaki  $V_2O_5$  ince filmlerin FTIR spektrumları

### 8.2.4. Elektriksel analizler

$V_2O_5$  ince filmlerin Hall etkisi ölçüm sistemi ile elde edilen direnci, taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilitesi Şekil 8.20'de sunuldu. Film kalınlığı arttıkça, öz direnç azalır ve  $V_2O_5$  filmlerin mobilitesi (hareketliliği) artar. Ayrıca, Şekil 8.20 direnç ve hareketlilik değerleri ile uyumlu filmlerin taşıyıcı konsantrasyonunu göstermektedir. Film kalınlığının artması, hareketliliğin ve taşıyıcı konsantrasyonunun artmasına yol açabilir, çünkü ince filmlerin taşıma özellikleri, kristalliklerinden ve ayrıca tanecik boyutlarının artmasından büyük ölçüde etkilenir. Nano ince filmlerin kristalliği kalınlığa duyarlıdır. Daha kalın filmler, daha iyi yapısal ve elektriksel özelliklere sahip olma avantajı sunar. Farklı kalınlıklardaki  $V_2O_5$  filmlerin öz direnç değerlerinin yaklaşık 42-150  $\Omega$  cm arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Elde edilen bu düşük direnç değerleri sayesinde  $V_2O_5$  filminin elektro-optik aygıt geliştirmede uygun olduğu şeklinde değerlendirildi.

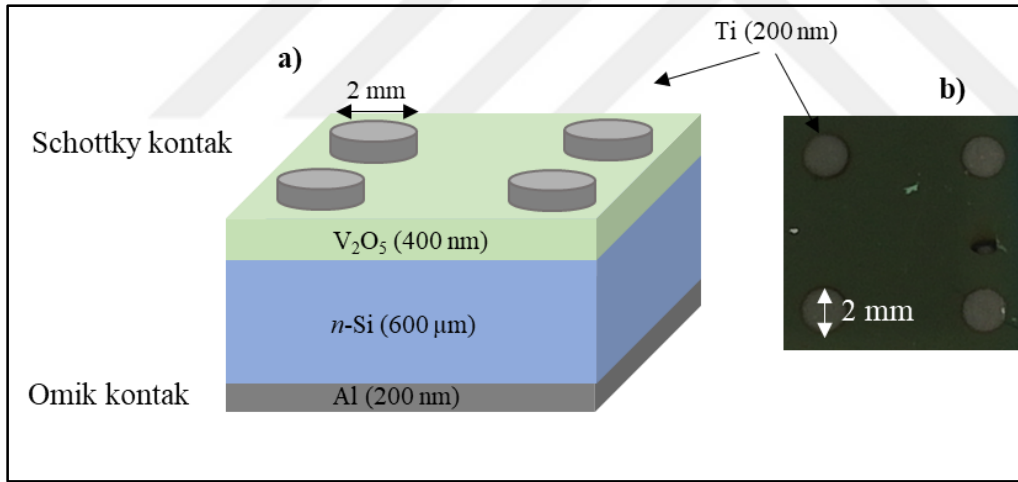


Şekil 8.20. Oda sıcaklığında kalınlıklara bağlı olarak  $V_2O_5$  ince filmlerin direnci, taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilitesi

### 8.2.5. Schottky diyot fabrikasyonu

$V_2O_5$  ince filmlerin tüm karakterizasyon sonuçları kapsamlı bir şekilde değerlendirildi. Üretilen filmlerin elektronik uygulamalarda kullanımına yönelik Schottky diyot performansını gözlemlemek amacıyla 400 nm kalınlıklı  $V_2O_5$  ince film üzerine üç farklı Ti kontak alınarak Schottky diyot geliştirildi ve karakterize edildi.

Şekil 8.21a'da şematik olarak gösterilen Ti/ $V_2O_5$ /Si/Al Schottky bariyer diyodu, magnetron püskürtme tekniği kullanılarak imal edilmiştir. İlk olarak, oda sıcaklığında  $3,9 \times 10^{-1}$  Pa basınç altında yüksek saflıkta Al (% 99.999) biriktirilerek n-Si üzerinde 200 nm kalınlığında alüminyum (Al) arka temas oluşturuldu. Daha sonra numune hızlı ısıl tavlama fırınında 300 °C'de  $N_2$  atmosferinde 2 dakika tavlansak iyi bir omik temas sağlanmıştır. Daha sonra, 200 nm kalınlığında yüksek saflıkta titanyum (Ti) Schottky elektrotları (yaklaşık 2 mm çapında), oda sıcaklığında bir gölge maskesi aracılığıyla biriktirildi.



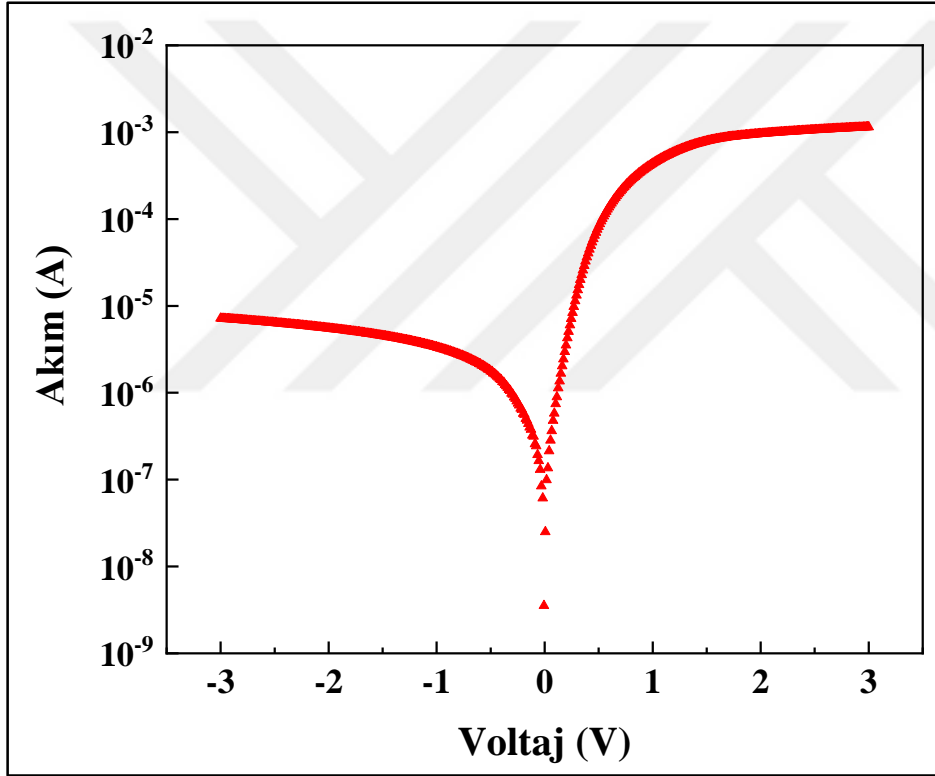
Şekil 8.21. a) Ti/ $V_2O_5$ /n-Si/Al aygıtının şematik diyagramı b) Üretilen Schottky elektrotları

### 8.2.6. Aygıt karakterizasyonları

$V_2O_5$ , Schottky diyot uygulamaları için en çok tercih edilen malzemelerdir. Metal-arayüz tabakası-yarı iletken (MIS) tabanlı Schottky cihazları, yalıtım tabakasının (IL) benzersiz elektriksel, optik ve yapısal özellikleri nedeniyle büyük öneme sahiptir. Yalıtım tabakası, I-V özelliklerini güçlü bir şekilde etkiler. Schottky diyot performansını iyileştirmek için şimdiye kadar çeşitli metal oksitler ( $MoO_3$ ,  $WO_3$ ,  $Ta_2O_5$ ,  $V_2O_5$ ,  $TiO_2$ ,  $ZrO_2$ ) kullanılmıştır.

$V_2O_5$ , yüksek iş fonksiyonuna sahip olması nedeniyle diğer metal oksitler arasında yaygın olarak kullanılmaktadır [103].

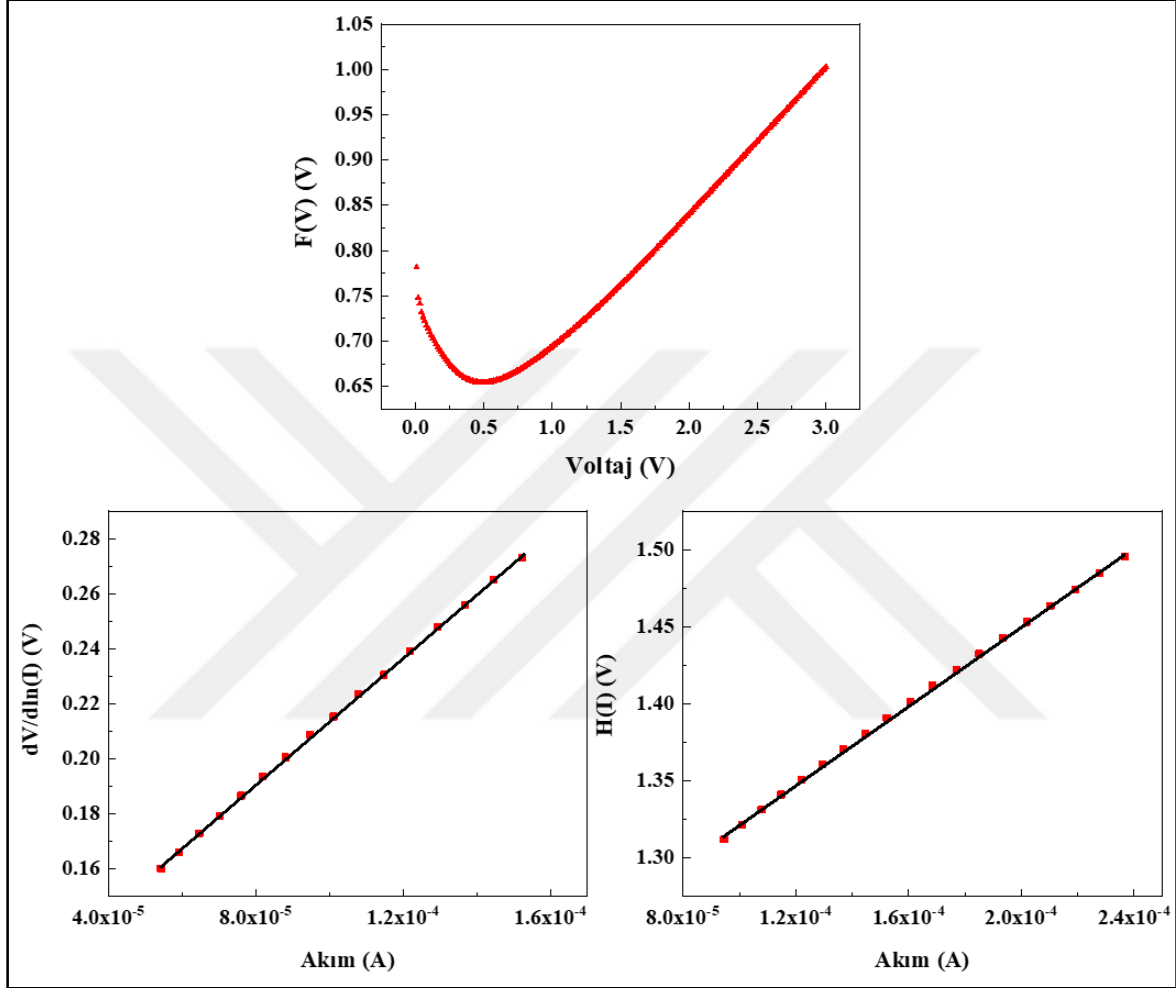
400 nm kalınlığındaki  $V_2O_5$  ince film seçilerek üretilen Ti/ $V_2O_5$ /n-Si metal-yarıiletken diyot için I-V ölçümleri gerçekleştirilmiştir. SBD'nin idealite faktörü, bariyer yüksekliği ve seri direnç gibi temel parametrelerinin belirlenmesi, SBD tabanlı cihazların tasarımı için son derece önemlidir. Tez çalışmasının bu bölümünde, Ti/ $V_2O_5$ /n-Si yapısındaki ana SBD parametrelerinin belirlenmesinde Bölüm 8.1'de ifade edilmiş olan üç farklı metot (Klasik, Norde ve Cheung) kullanıldı.



Şekil 8.22. Oda sıcaklığında diyotun I-V karakteristiği

Şekil 8.22, diyotun oda sıcaklığında I-V karakteristiğini göstermektedir. In (I) –V grafiğinin kesişiminden ve eğiminden,  $\Phi_B$ , n ve  $I_0$ 'ın deneysel değerine ulaşılabilir. Bariyer yüksekliği, ideallik faktörü ve doyum akımı değerleri sırasıyla  $\Phi_B = 0,76$  eV,  $n = 1,39$  ve  $I_0 = 6,12 \times 10^{-8}$  olarak bulunmuştur. Norde ve Cheung metotları için çizilen eğriler Şekil 8.23'de verilmiştir. Ayrıca, bu yöntemler ile hesaplanan parametreler Çizelge 8.6'da listelenmiştir.

Elde edilen bu sonuçlar, bu modellerin tutarlılığını ve geçerliliğini göstermektedir. Sonuç olarak, çeşitli yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçlar, Ti/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/n-Si yapısı için iyi doğrultma performansını kanıtlamaktadır.



Şekil 8.23. Diyot için  $F(V) - V$ ,  $dV/d\ln(I) - I$  ve  $H(I) - I$  eğrileri

Çizelge 8.6. Farklı yöntemlerden elde edilen elektriksel parametrelerin karşılaştırılması

Klasik Metot			Norde		Cheung	
n	$\Phi_B$ (eV)	$I_0$ (A) $\times 10^{-8}$	$\Phi_B$ (eV)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_s$ ( $\Omega$ ) ( $dV/d \ln I$ )	$R_s$ ( $\Omega$ )( $H(I)$ )
1,39	0,76	6,12	0.70	548	1157	1286

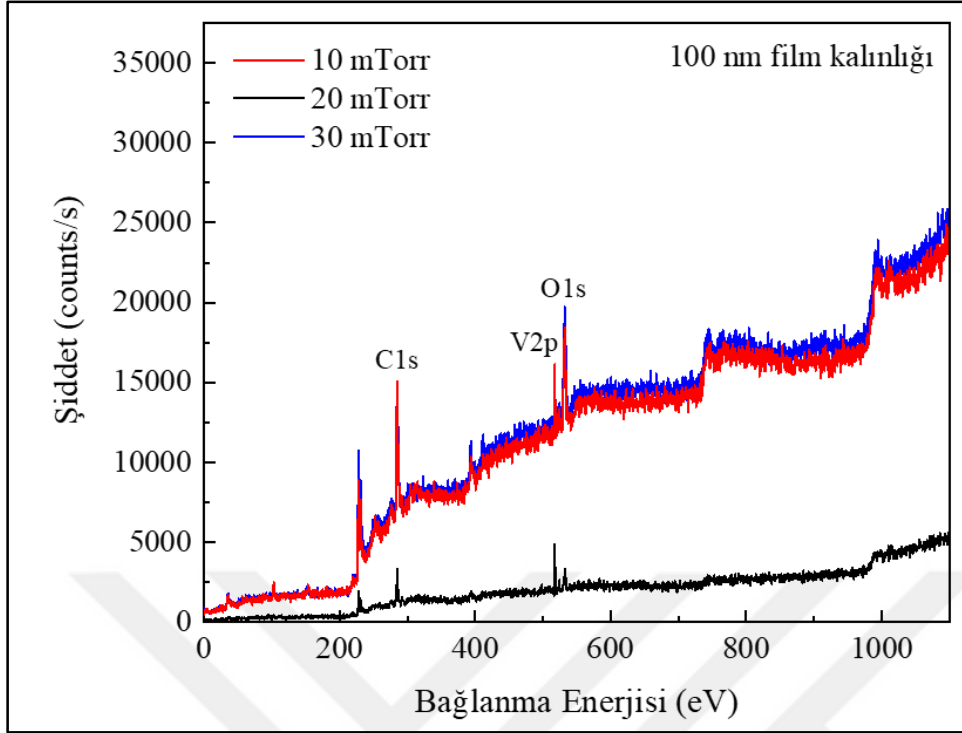
Ti/n-Si Schottky bağlantısında V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ince film kullanımının iyi bir doğrultma davranışı sergilediği sonucuna varılabilir. Böylece, I-V sonuçları, üretilen bu diyot yapısının çeşitli elektro-optik cihaz uygulamaları için uygun olduğunu gösterdi.

### 8.3. Geliştirilen VO<sub>2</sub> İnce Filmlerin Karakterizasyonları

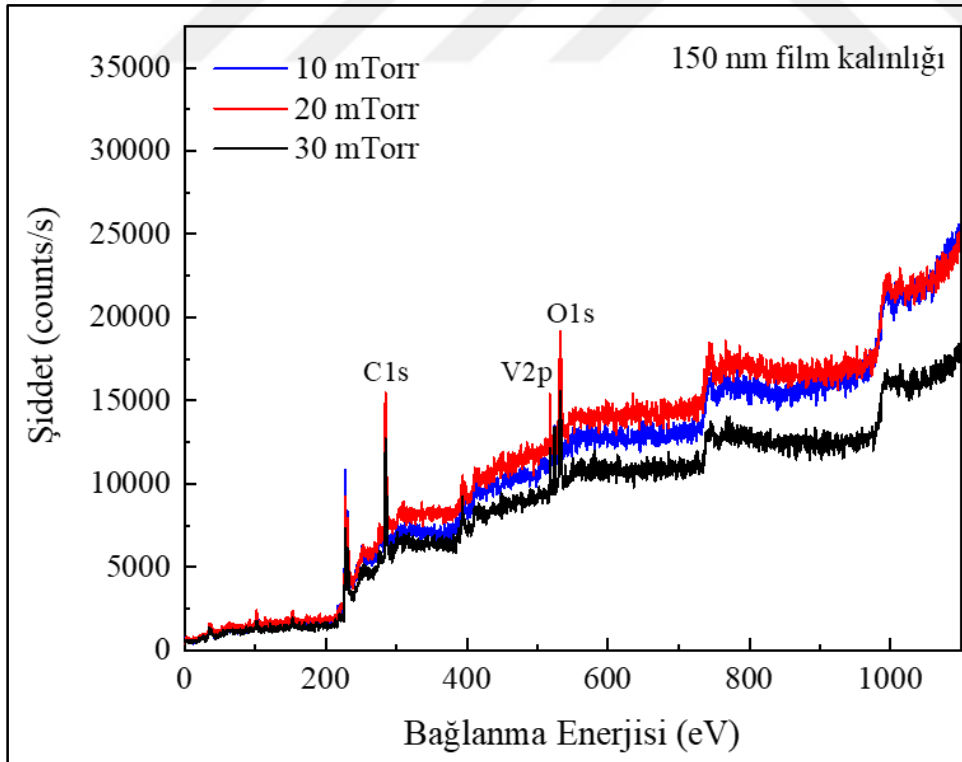
Bu bölümde Eş Püskürtme Sistemi ile VO<sub>2</sub> hedef kullanılarak, 350 °C alttaş sıcaklığında, n-Si ve korning cam alttaşlar üzerine geliştirilen farklı kalınlıklarda (100 nm, 150 nm) ve farklı basınçlarda (10 mTorr, 20 mTorr, 30 mTorr) biriktirilen VO<sub>2</sub> ince filmlerin karakterizasyonları başlıklar halinde sunuldu.

#### 8.3.1. Yapısal analizler

Tez çalışması kapsamında n-Si alttaş üzerine biriktirilen VO<sub>2</sub> ince filmlerin yapısal karakterizasyonunu araştırmak amacıyla XPS analizleri gerçekleştirildi. XPS, malzemelerin yüzey katmanını yaklaşık 4 nm derinlikte analiz edebilmemize olanak sağlayan etkili bir tekniktir. Şekil 8.24'te 100 nm kalınlığında biriktirilen VO<sub>2</sub> ince filmlerin genel tarama XPS spektrumu sunuldu. Şekil 8.25'te ise 150 nm kalınlığında biriktirilen VO<sub>2</sub> ince filmlerin genel tarama XPS spektrumu sunuldu. Karbon sinyali (bağlanma enerjisi 284 eV'dir) XPS çalışmalarında enerji referansı olarak kullanıldı. Her iki spektrumda da vanadyum ve oksijen elementlerinin varlığı açık bir şekilde görülmektedir. Bu sonuçlar, tez kapsamında VO<sub>2</sub> ince filmlerin başarılı bir şekilde oluşturulduğunu göstermektedir. V2p<sub>3/2</sub>, V2p<sub>1/2</sub> çekirdek seviyelerinin bağlanma enerjileri, vanadyumun V<sup>4+</sup> oksidasyon durumu ile iyi bir uyum içinde olan 516 eV ve 523 eV değerlerine karşılık gelir. O1s çekirdek seviyesinin bağlanma enerji değeri ise 530 eV'dir ve bu bağlanma enerji değeri O<sup>2-</sup> iyonlarına karşılık gelir.

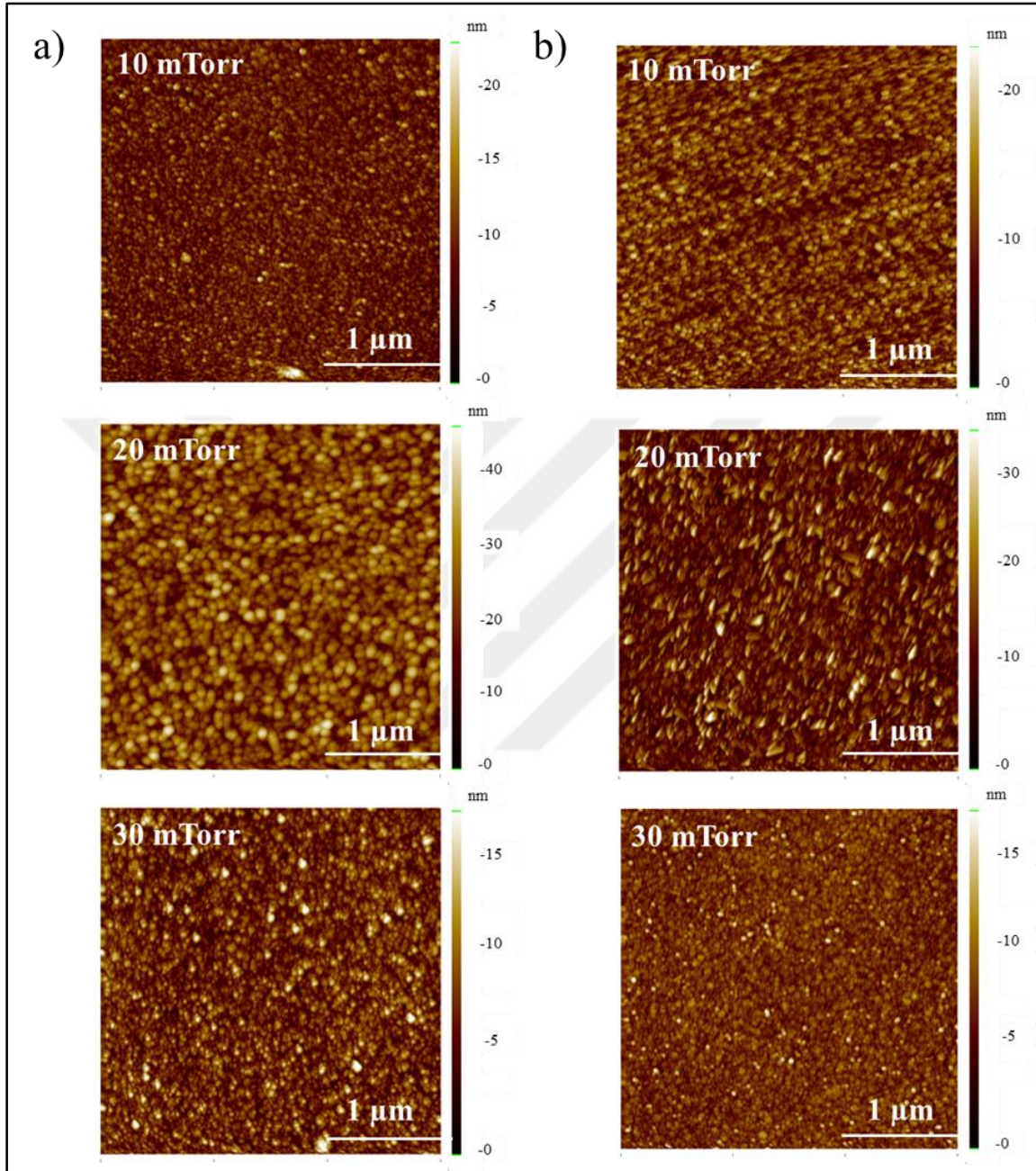


Şekil 8.24. 100 nm kalınlıklı VO<sub>2</sub> ince filmlerin XPS spektrumları



Şekil 8.25. 150 nm kalınlıklı VO<sub>2</sub> ince filmlerin XPS spektrumları

### 8.3.2. Morfolojik analizler



Şekil 8.26. Farklı kalınlıklardaki VO<sub>2</sub> ince filmlerin AFM görüntüleri a) 100 nm b) 150 nm

VO<sub>2</sub> ince filmlerin yüzey morfolojisi AFM tarafından incelenmiştir. Oda sıcaklığında tüm ölçümler 3x3 μm<sup>2</sup> tarama alanında yapılmıştır. Farklı film kalınlıklarında (100 nm ve 150 nm) ve farklı basınçlarda (10 mTorr, 20 mTorr, 30 mTorr) biriktirilen VO<sub>2</sub> ince filmlerin iki boyutlu (2D) topografik görüntüleri Şekil 8.26'da gösterilmektedir. AFM görüntüleri, filmlerin yüzey özelliklerini anlamak için iyi bir çıktıdır. VO<sub>2</sub> ince filmlerin yüzey

pürüzlülüğünün kök ortalama kare (RMS) değerleri ve tanecik boyutları Çizelge 8.7’de listelendi. AFM görüntüleri, taneciklerin boyutunun, şeklinin ve düzenlemesinin çeşitli kalınlıklarda VO<sub>2</sub> filmler için farklı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 8.7. VO<sub>2</sub> ince filmlerin AFM parametreleri

Film Kalınlığı (nm)	Basınç (mTorr)	Tanecik Boyutu (nm)	Rms (nm)
100	10	10,6	2,13
100	20	18,2	5,82
100	30	11,3	1,85
150	10	11,7	3,45
150	20	13,5	4,45
150	30	10,2	1,78

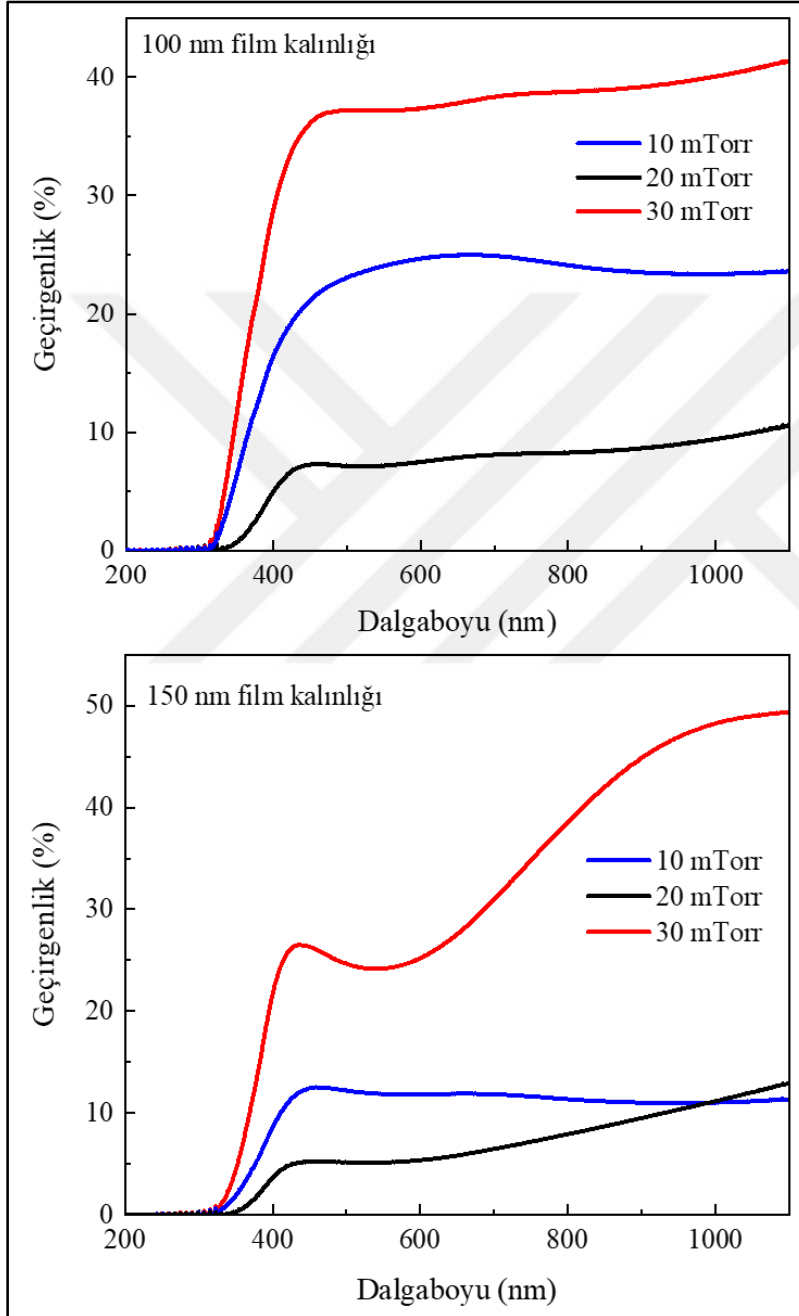
### 8.3.3. Optik analizler

VO<sub>2</sub> ince filmlerin optik özellikleri UV-Vis ve FTIR spektrometreleri kullanılarak analiz edildi. Yarıiletken malzemelerin optik özellikleri genellikle tanecik boyutu, yüzey pürüzlülüğü ve film kalınlığı gibi film parametrelerine bağlıdır. Birçok elektro-optik uygulama için, filmin optik geçirgenliği önemli bir role sahiptir. Şekil 8.27, farklı kalınlıklarda ve farklı basınçlarda biriktirilen VO<sub>2</sub> ince filmler için dalga boyunun bir fonksiyonu olarak UV-Vis geçirgenlik spektrumlarını göstermektedir. 100 nm film kalınlığına sahip VO<sub>2</sub> ince filmler için en yüksek geçirgenlik değeri yaklaşık % 38 olduğu belirlendi. 150 nm film kalınlığına sahip VO<sub>2</sub> ince filmler için en yüksek geçirgenlik değeri yaklaşık % 28 olduğu görüldü.

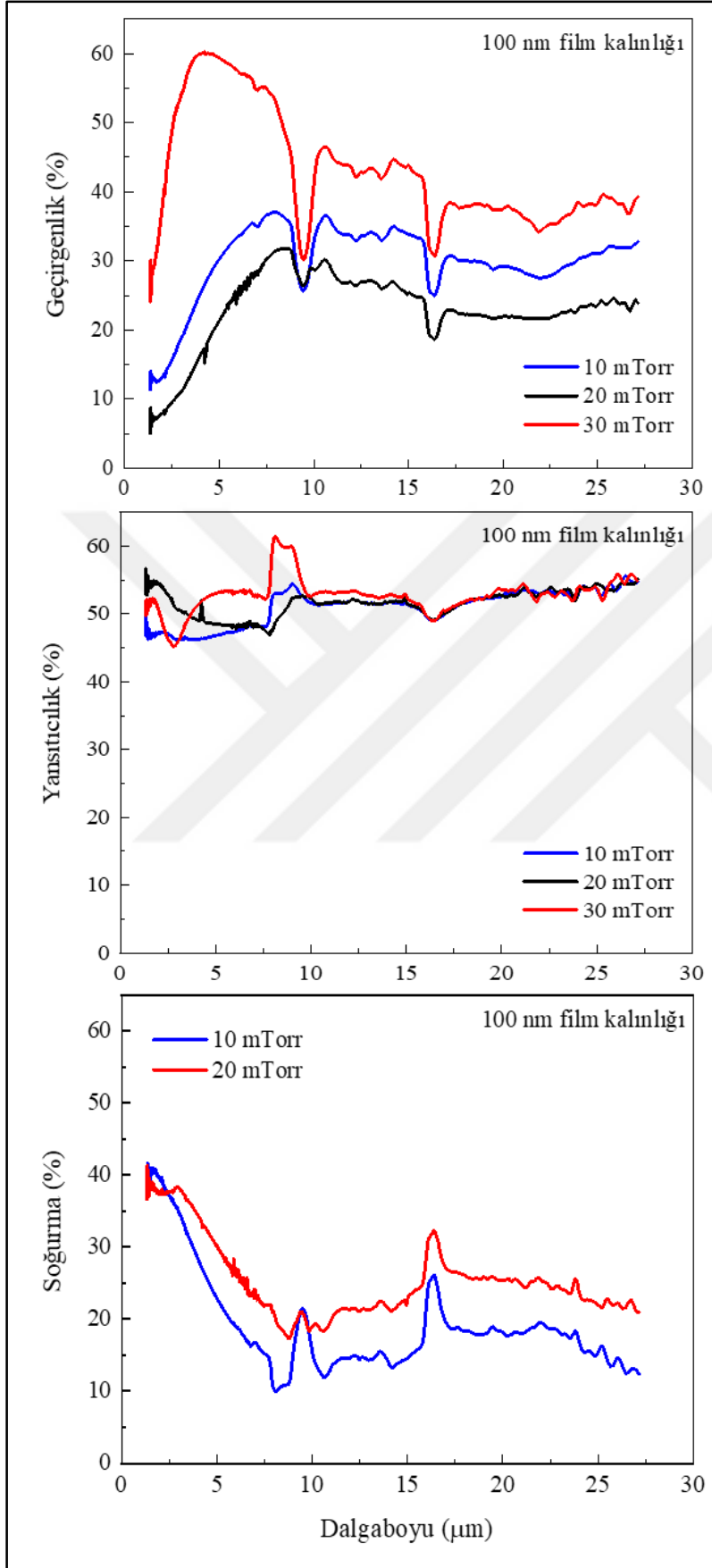
Kızılötesi dedektör uygulamaları için üretilen filmlerin kızılötesi soğuruculukları oldukça önemlidir. Bu nedenle geliştirilmek istenilen aygıtta göre istenilen kızılötesi bölgede, biriktirilen filmin soğuruculuğunun yüksek olması gerekmektedir. VO<sub>2</sub> ince filmlerin kızılötesi bölgede optik geçirgenlikleri, yansıtıcılıkları ve soğurma özellikleri FTIR ölçümleri ile belirlendi.

100 nm kalınlığa sahip VO<sub>2</sub> ince filmlerin geçirgenlik, yansıtıcılık ve soğurma spektrumları Şekil 8.28’de verildi. Ayrıca, 150 nm kalınlığa sahip VO<sub>2</sub> ince filmlerin geçirgenlik, yansıtıcılık ve soğurma spektrumları ise Şekil 8.29’da sunuldu. VO<sub>2</sub> ince filmlerin soğurma

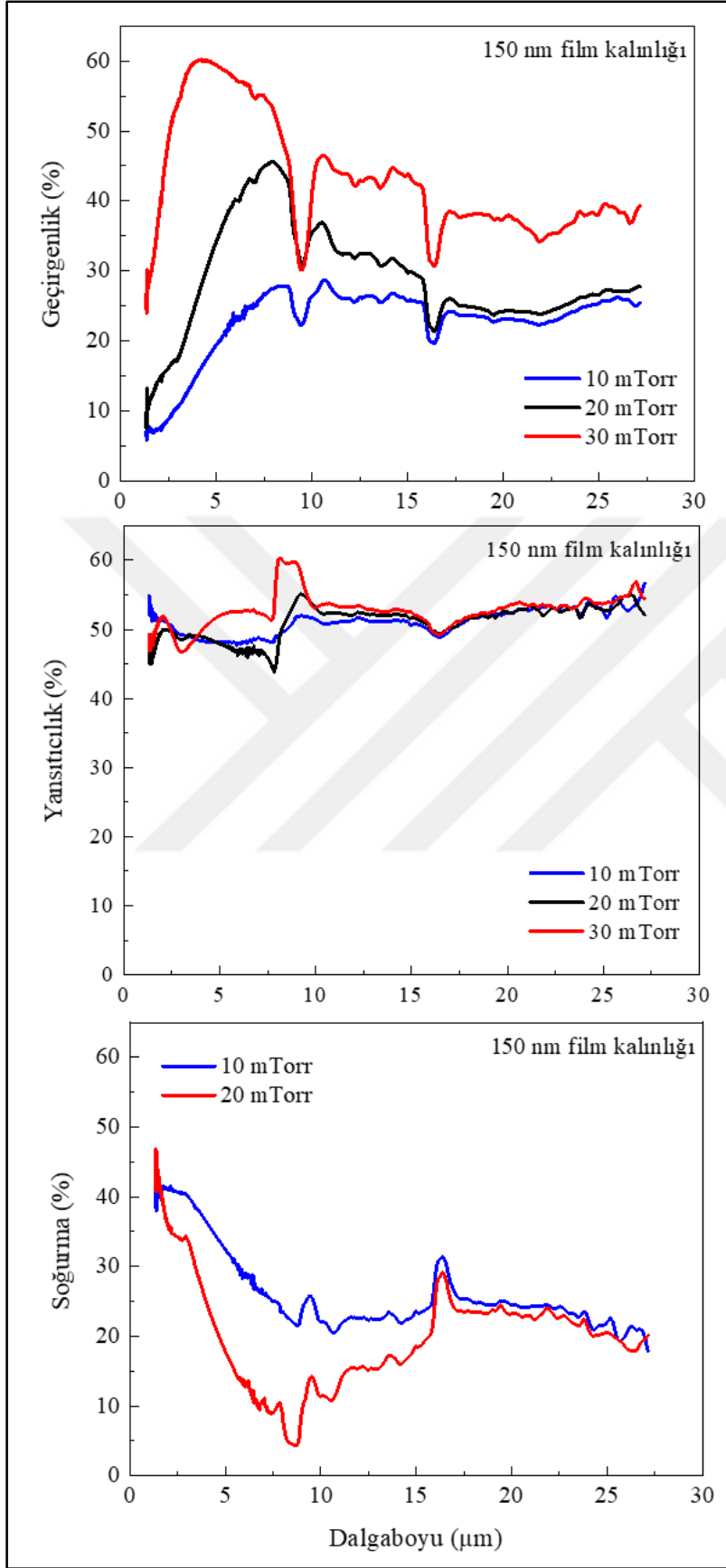
spektrumları incelendiğinde, istenilen kızılötesi soğurma bölgesi olan 1-2  $\mu\text{m}$  dalga boyu aralığında ortalama % 40'lık bir soğurmaya sahip olduğu görülmektedir. Ortalama % 40 optik soğurmaya sahip VO<sub>2</sub> ince filminin kızılötesi dedektörler için kullanılabilir olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 8.27. VO<sub>2</sub> ince filmlerin UV-Vis geçirgenlik spektrumları



Şekil 8.28. 100 nm kalınlıklı VO<sub>2</sub> ince filmlerin FTIR spektrumları



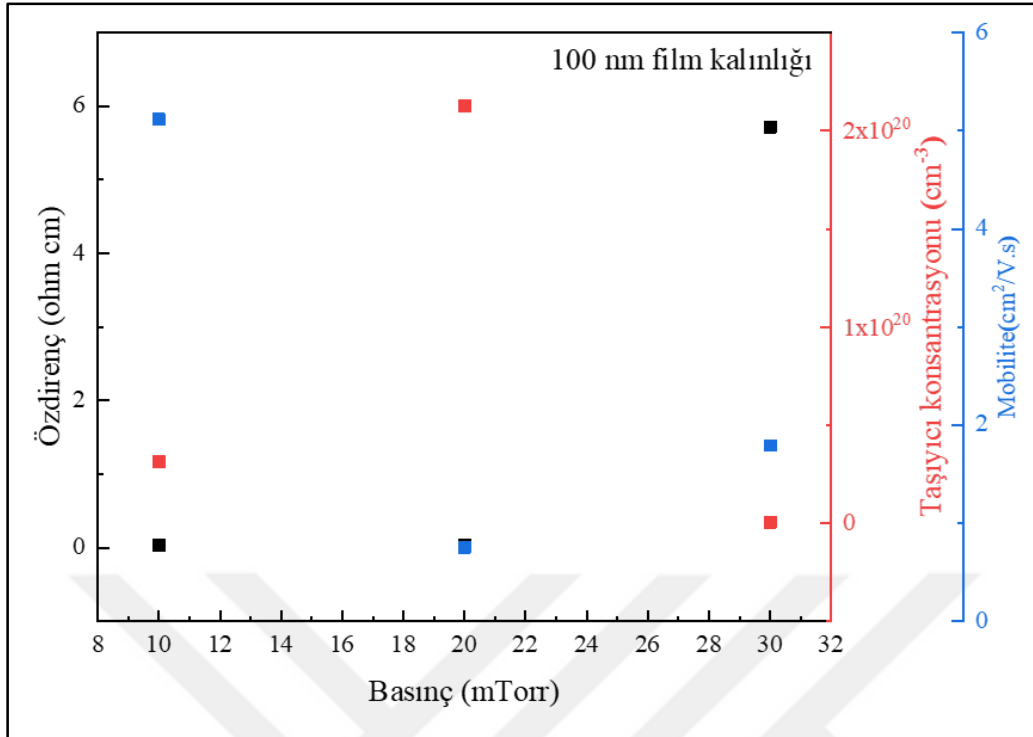
Şekil 8.29. 150 nm kalınlıklı VO<sub>2</sub> ince filmlerin FTIR spektrumları

### 8.3.4. Elektriksel analizler

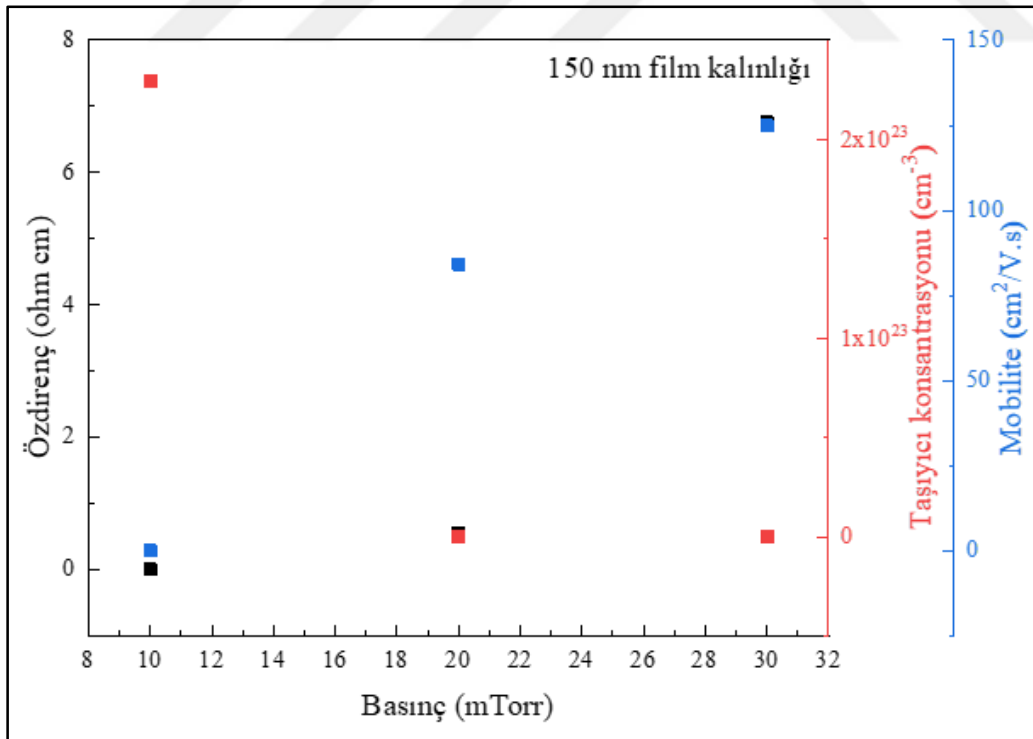
VO<sub>2</sub> ince filmlerin Hall etkisi ölçüm sistemi ile elde edilen özdirenci, taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilitesi Şekil 8.30 ve Şekil 8.31’de sunuldu. Ayrıca, bu parametrelerin daha detaylı bir şekilde listelenmiş hali Çizelge 8.8’de verildi. Film kalınlığındaki ve basınçtaki değişim, özdirencin, hareketliliğin ve taşıyıcı konsantrasyonunun değişmesine yol açabilir, çünkü ince filmlerin taşıma özellikleri, filmlerin kristalitelerinden ve tanecik boyutlarının artmasından veya azalmasından büyük ölçüde etkilenir. Farklı kalınlıklardaki (100 nm ve 150 nm) ve farklı basınçlardaki (10 mTorr, 20 mTorr, 30 mTorr) VO<sub>2</sub> filmlerde en yüksek özdirenç değeri 6,75 Ω cm olarak belirlendi.

Çizelge 8.8. VO<sub>2</sub> ince filmlerin kalınlık ve kaplama basıncına bağlı özdirenç, taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilite değerleri

Kalınlık (nm)	Basınç (mTorr)	Özdirenç (ohm cm)	Taşıyıcı yoğunluğu (cm <sup>-3</sup> )	Mobilite (cm <sup>2</sup> /V.s)
100	10	0,038	3,15x10 <sup>19</sup>	5,114
100	20	0,039	2,12x10 <sup>20</sup>	0,754
100	30	5,714	6,10x10 <sup>17</sup>	1,791
150	10	0,008	2,29x10 <sup>23</sup>	0,003
150	20	0,563	1,31x10 <sup>17</sup>	84,25
150	30	6,754	7,38x10 <sup>15</sup>	124,8



Şekil 8.30. 100 nm kalınlıklı  $\text{VO}_2$  ince filmlerin kaplama basıncına bağlı özdirenç, taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilite değerleri

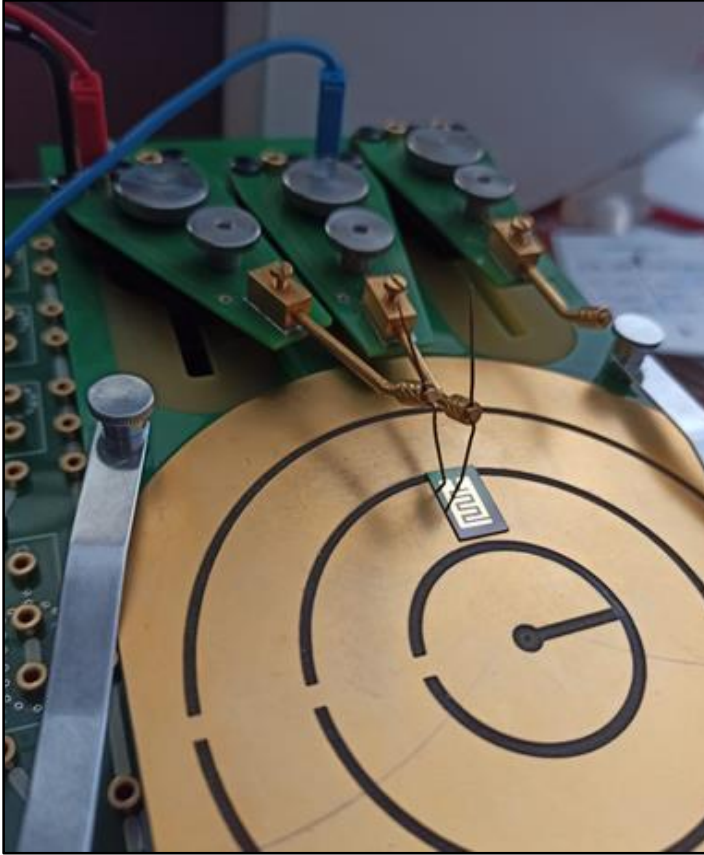


Şekil 8.31. 150 nm kalınlıklı  $\text{VO}_2$  ince filmlerin kaplama basıncına bağlı özdirenç, taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilite değerleri

### 8.3.5. Kızılötesi dedektör fabrikasyonu

Filmlerin tüm karakterizasyon sonuçları kapsamlı bir şekilde değerlendirildi ve üretilen VO<sub>2</sub> ince filmlerin oda sıcaklığında düşük dirence sahip olması ve filmlerin kızılötesi ışığı soğurma özelliklerinin iyi olması sebebiyle kızılötesi dedektör algılama malzemesi olarak kullanımına uygun olduğu belirlendi. Düşük direnç, küçük tanecik yapısı ve yüksek kızılötesi soğurma sağlayan en iyi filmin 150 nm kalınlıkta, 10 mTorr basınç altında biriktirilen VO<sub>2</sub> ince film olduğu gözlemlendi. Bu nedenle, bu VO<sub>2</sub> ince film üzerine kızılötesi dedektör uygulaması gerçekleştirildi. Şekil 8.31’de üretilen kızılötesi dedektörün görseli sunuldu.

Kızılötesi dedektör fabrikasyonunda, iki farklı metal maske kullanılarak, tarmal buharlaştırma tekniği ile 700 nm kalınlıklı Au inter dijital elektrotlar başarılı bir şekilde oluşturuldu. Daha sonra, omiklik sağlamak amacıyla RTA sisteminde 300 °C’de 1,5 dk tavlama işlemi uygulandı.



Resim 8.1. Üretilen VO<sub>2</sub> kızılötesi dedektör

### 8.3.6. Kızılötesi dedektör karakterizasyonları

Tezin bu kısmında, daha önceki bölümlerde biriktirme aşamaları ve karakterizasyonları sunulan VO<sub>2</sub> ince filmlerinden kızılötesi ışığa duyarlı olduğu belirlenen film ile üretilen kızılötesi dedektörlerin aygıt parametrelerinin incelenmesi hedeflendi.

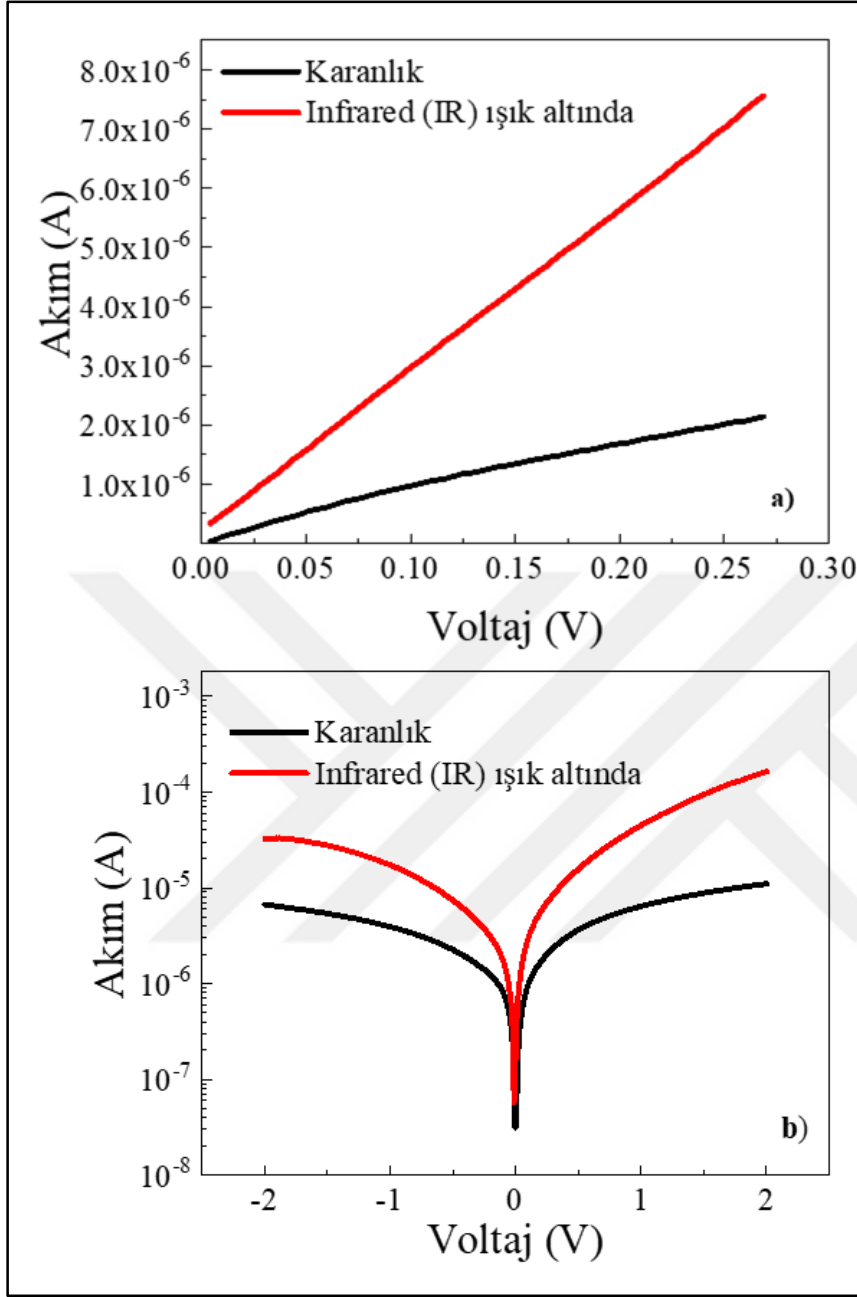
Bu amaçla, üretilen kızılötesi dedektörün oda sıcaklığında akım-gerilim ve sıcaklığa bağlı akım-gerilim ölçümleri analiz edildi. Ayrıca dedektörün voltaja bağlı TCR değerleri,

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \times 100 \quad (8.11)$$

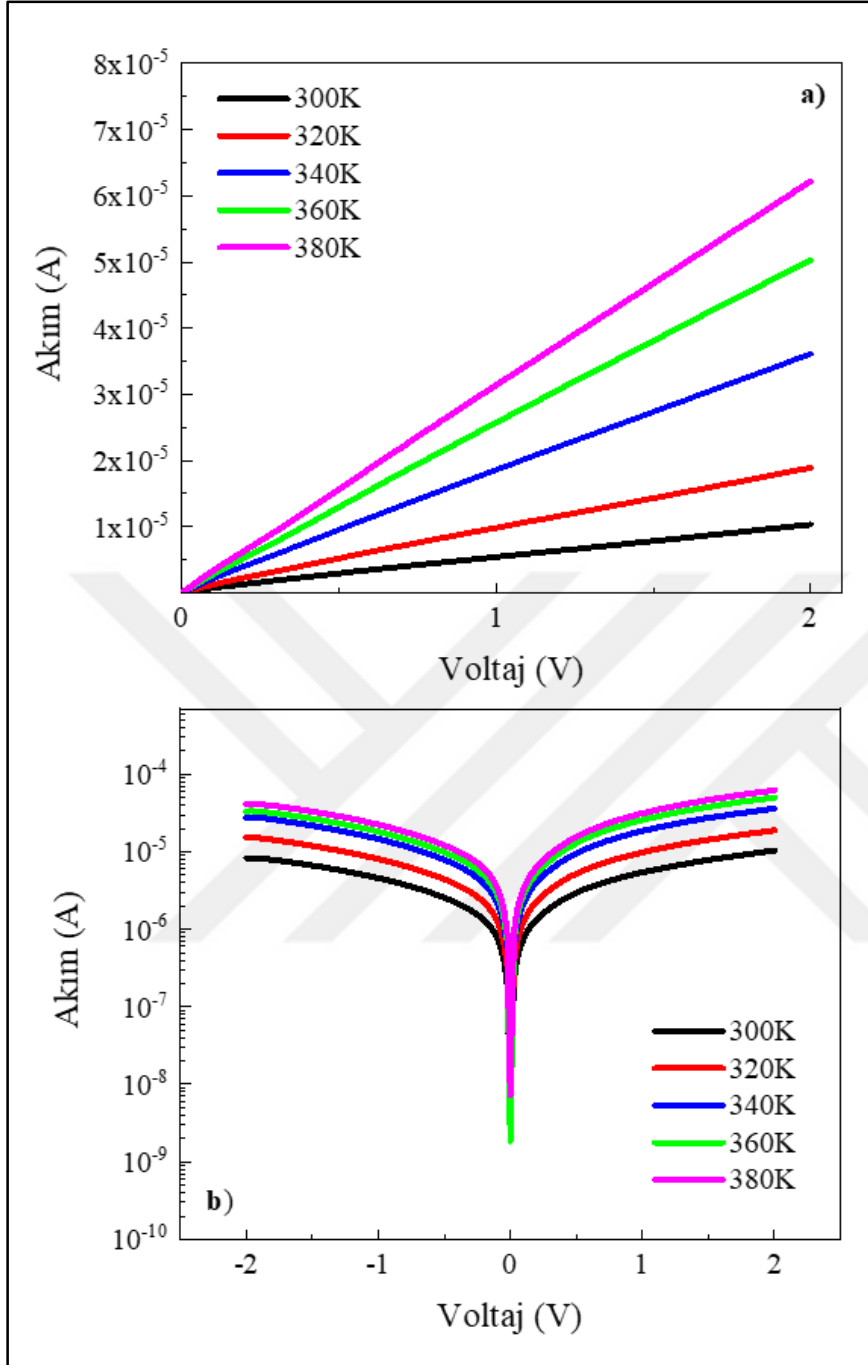
ifadesi yardımıyla hesaplandı. Geliştirilen kızılötesi dedektörün I-V ölçümleri karanlık ve IR-ışık altında Keithley 4200 sistemi ve prop istasyonu kullanılarak ölçüldü. Kızılötesi dedektörün oda sıcaklığında elde edilen I-V grafikleri Şekil 8.32’de ve sıcaklığa bağlı I-V grafikleri Şekil 8.33’te verildi.

n-Si altaş üzerine 150 nm kalınlıkta ve 10 mTorr basınç altında biriktirilen VO<sub>2</sub> ince film kullanılarak üretilen dedektörün oda sıcaklığında I-V grafiğinden, dedektörlerin IR ışığa duyarlı oldukları görüldü (Şekil 8.32).

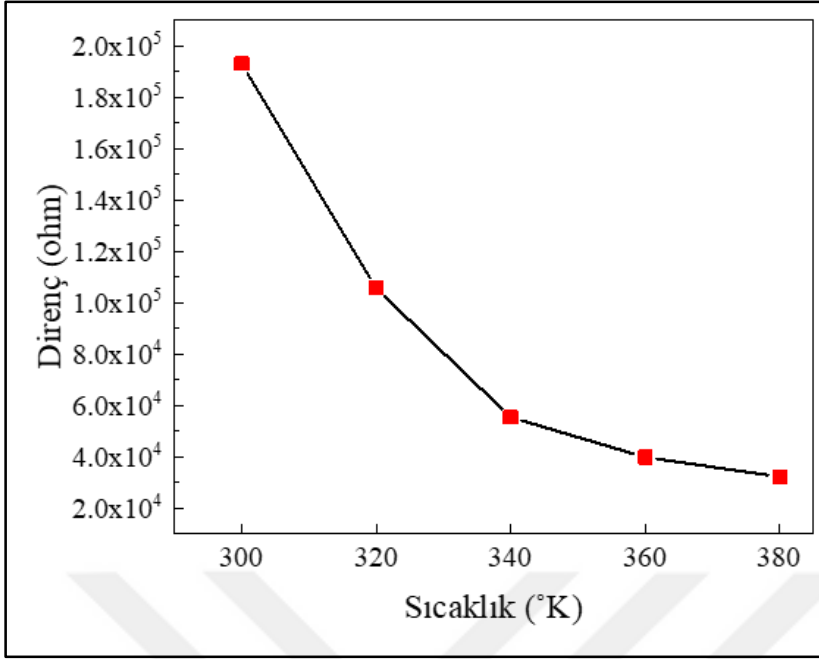
Şekil 8.33’te verilen sıcaklığa bağlı akım-gerilim eğrilerinden yola çıkarak üretilen kızılötesi dedektörün belirli sıcaklıklara karşılık gelen direnç değerleri elde edildi. Bu elde edilen direnç değerleri Şekil 8.34’te sunuldu. Şekilden gözlemlendiği gibi, dedektörün direnci artan sıcaklıkla birlikte üssel olarak azaldı.



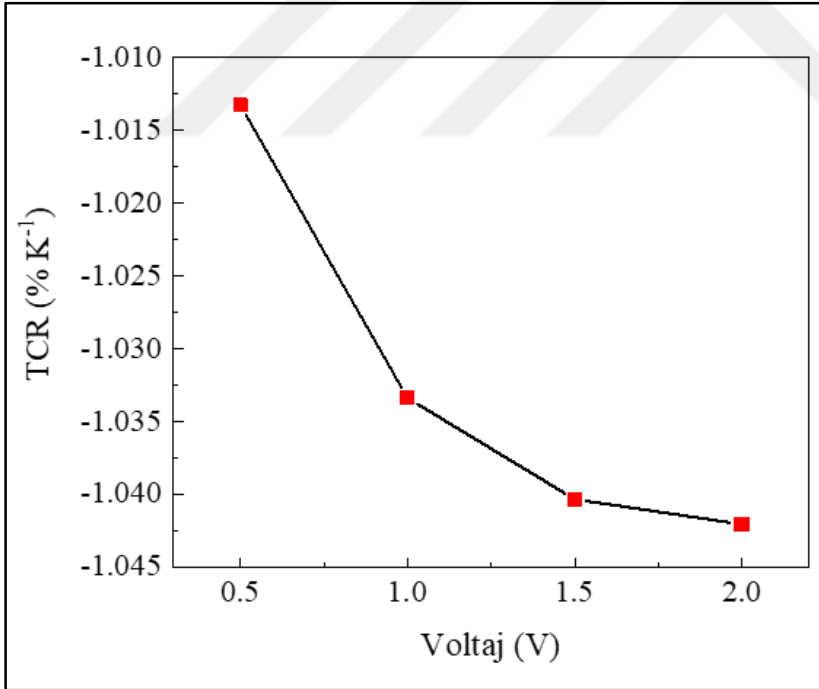
Şekil 8.32. Üretilen VO<sub>2</sub> kızılötesi dedektörün oda sıcaklığında a) doğrusal b) yarı-logaritmik I-V karakteristiği



Şekil 8.33. Üretilen VO<sub>2</sub> kızılötesi dedektörün 300 K-380 K sıcaklık aralığında a) doğrusal b) yarı-logaritmik I-V karakteristiği



Şekil 8.34. Üretilen VO<sub>2</sub> kızılötesi dedektörün direnç-sıcaklık eğrisi



Şekil 8.35. Üretilen VO<sub>2</sub> kızılötesi dedektörün voltaja bağlı TCR grafiği

Kızılötesi dedektörün algılama yeteneği, direnç sıcaklık katsayısı (TCR) ile değeriendirilebilir. Şekil 8.35'te VO<sub>2</sub> kızılötesi dedektörü için farklı voltaj değerlerine karşılık gelen TCR değerleri sunuldu. Ayrıca, Çizelge 8.9'da tüm elde edilen TCR değerleri listelendi. Elde edilen TCR değerleri yaklaşık -1 %K<sup>-1</sup> civarındadır. Elde edilen TCR değerinin yüksek olması geliştirilen kızılötesi dedektörün preformansı açısından oldukça önemlidir [104].

Çizelge 8.9. Üretilen VO<sub>2</sub> kızılötesi dedektörün TCR değerleri

Voltaj (V)	TCR (%K <sup>-1</sup> )
0.5	-1,013
1	-1,033
1.5	-1,040
2	-1,042

Tez kapsamında geliştirilen VO<sub>2</sub> kızılötesi dedektör teknolojisinin, endüstriyel ve dedektör uygulama alanlarında kullanılabilir aygıtlara dönüştürülebileceği düşünölmektedir.



## 9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında,  $V_2O_5$  ve  $VO_2$  ince filmlerin üretilmesi, fiziksel özelliklerinin belirlenmesi ve elektro-optik aygıt geliştirmede aktif malzeme olarak kullanılabilirliklerinin araştırılması hedeflendi. Bu filmlerin büyütülmesi RF magnetron tekniği ile başarıldı. Filmlerin yapısal, optik, morfolojik ve elektriksel karakteristikleri belirlendi. Farklı şartlar altında geliştirilen  $V_2O_5$  filmlerinden Schottky diyotlar üretilerek, filmlerin aygıt üretimine uygun olduğu belirlendi. Geliştirilen filmlerin kızılötesi algılamaya uygunluğunu gözlemlemek hedefiyle, bir örnek olarak, kristalinitesi yüksek, iyi optik ve elektriksel özelliklere sahip, düzgün morfolojide olan  $VO_2$  ince filmi inter dijital olarak geliştirilen Au elektrotlar üzerine kaplanarak kızılötesi dedektör prototipi üretildi.

İnce filmlerin oluşturulmasında basit ekipman, ucuz maliyet ve kolay operasyon olanakları tanıyan Püskürtme (Sputtering) Sistemi tercih edildi. Ayrıca, normal püskürtme tekniği ile benzer fiziksel ilkeyle çalışan bir malzeme üretim yöntemi olan Eş-Püskürtme Sistemi de kullanıldı. Diyot ve kızılötesi dedektörün algılayıcı katmanını oluşturacak filmlerin yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özellikleri detaylı bir şekilde araştırılarak en uygun yapı için optimizasyon çalışmaları yapıldı.

Bu tez çalışmasında ilk olarak, Eş Püskürtme tekniği kullanılarak oda sıcaklığında, n-Si ve korning cam alttaşlar üzerine 75 nm kalınlığa sahip  $V_2O_5$  ince filmlerin üretimi gerçekleştirildi ve üretilen filmler 300 °C ve 500 °C sıcaklıkta hava ortamında tavlandı.

Eş Püskürtme tekniği kullanılarak oda sıcaklığında üretilen ve daha sonra 300 °C ile 500 °C'de tavlanan, 75 nm kalınlığındaki  $V_2O_5$  ince filmlerin yapısal analizleri incelendiğinde  $V_2O_5$  ince filmlerin başarılı bir şekilde oluşturulduğu gözlemlendi. Ayrıca, filmlerin SIMS derinlik profillerine bakıldığında tavlama sıcaklığının artmasıyla birlikte film kalınlığı boyunca V ve O elementlerinin atomik dağılımları daha düzgün hale geldiği belirlendi. Yüzeysel analizi sonuçlarına göre tanecik boyutu değerinin artan tavlama sıcaklığı ile birlikte 11,6'dan 56,5 nm'ye arttığı görüldü. Filmlerin optik geçirgenliklerinden ve PL emisyon piklerinden faydalanılarak hesaplanan yasak enerji bant aralığı değerlerinin ise tavlama sıcaklığının artması ile 2,6 eV'den 2,2 eV'ye azaldığı belirlendi. Bu durum film iletkenliğinin tavlama sıcaklığının artması ile birlikte arttığını gösterdi. Elde edilen analiz

sonuçlarından, 500 °C’de tavlanan V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ince filminin en iyi özelliklere sahip olduğu belirlendi. Üretilen filmlerin elektro-optik uygulamalarda kullanımına yönelik Schottky diyot performansını gözlemlemek amacıyla 500 °C’de tavlama işlemi uygulanan V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ince film üzerine iş foksilyolarına göre üç farklı kontak alınarak MOS yapılı Schottky diyot uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Al/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/n-Si, Ti/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/n-Si ve Au/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/n-Si MOS yapılı Schottky diyotları için I-V ölçümleri yapılmıştır. I-V sonuçları,  $n = 1,65$ ,  $\Phi_B = 0,77$  eV ve  $R_s = 749 \Omega$  olarak bulunan Al/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Ti Schottky bariyer diyotunun daha iyi diyot performansı sergilediğini göstermiştir. Üretilen MOS yapılı Schottky bariyer diyotunun elektro-optik uygulamalarda kullanımı açısından oldukça uygun olduğu belirlenmiştir.

Oda sıcaklığında büyütülerek 500 °C’de tavlanan filmin diğerlerine göre daha iyi niteliklere sahip olmasından dolayı 500 °C alttaş sıcaklığında, n-Si ve korning cam alttaşlar üzerine farklı kalınlıklarda (100, 200, 300 ve 400 nm) V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ince filmler biriktirildi ve üretilen filmlerin karakterizasyonları gerçekleştirildi.

Üretilen bu V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ince filmlerin XRD analizleri incelendiğinde filmlerin (001) yöneliminde ortorombik yapıda büyüdüğü ve kalınlığın artmasıyla birlikte en iyi kristal kaliteye ulaştığı görüldü. Ayrıca, bu durum XPS ve Raman ölçümleri ile desteklendi. Yüzey morfolojisi sonuçlarına bakıldığında, XRD sonuçlarını destekler nitelikte, kalınlığın artmasıyla birlikte tanecik boyutu değerinin 25,6 nm’den 124,2 nm’ye arttığı görüldü. Filmlerin optik geçirgenliklerinden faydalanılarak hesaplanan yasak enerji bant aralığı değerlerinin ise kalınlığın artması ile 2,50 eV’den 2,23 eV’ye azaldığı belirlendi. Filmlerin elektriksel özellikleri incelendiğinde ise kalınlığın artması ile özdirenç değerinin 150  $\Omega\text{cm}$ ’den 42  $\Omega\text{cm}$ ’e düştüğü görüldü. Bu durum kalınlığın artması ile birlikte film iletkenliğinin arttığını gösterdi. Elde edilen analiz sonuçlarından, 400 nm kalınlıklı V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ince filminin en iyi özelliklere sahip olduğu belirlendi. Üretilen filmlerin elektro-optik uygulamalarda kullanımına yönelik, bir örnek olarak, Schottky diyot performansını araştırmak amacıyla 400 nm kalınlığa sahip V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> film üzerine Ti kontak alınarak MIS yapılı Schottky diyot uygulaması gerçekleştirildi. Ti/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/n-Si MIS yapılı Schottky diyot için I-V ölçümleri gerçekleştirildi. Bariyer yüksekliği, ideallik faktörü ve seri direnç değerleri, sırasıyla,  $\Phi_B = 0,76$  eV,  $n = 1,39$  ve  $R_s = 548 \Omega$  olarak bulundu. Ti/n-Si Schottky bağlantısında V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ince film kullanımının iyi bir doğrultma davranışı sergilediği sonucuna varıldı.

Bu filmin, yaklaşık 2,2 eV optik bant aralığına sahip olması sebebiyle kızılötesi bölge algılamaları için ilave bir soğurucu katman kullanılarak kızılötesi dedektör uygulamalarında kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

Tez kapsamında son çalışma olarak, Eş Püskürtme tekniği kullanılarak 350 °C alttaş sıcaklığında n-Si ve korning cam alttaşlar üzerine farklı kalınlıklarda (100 ve 150 nm) ve farklı basınçlarda (10, 20 ve 30 mTorr) VO<sub>2</sub> ince filmler üretildi ve karakterizasyonları yapıldı.

Eş Püskürtme tekniği ile 350 °C alttaş sıcaklığında, farklı kalınlıklarda (100, 150 nm) ve farklı kaplama basınçlarında (10, 20, 30 mTorr) üretilen VO<sub>2</sub> ince filmlerin yapısal analizleri filmlerin başarılı bir şekilde oluşturulduğunu gösterdi. Üretilen filmlerin yüzey analizlerine bakıldığında, 10, 20 ve 30 mTorr kaplama basınçlarında elde edilen 100 nm kalınlıklı filmlerin tanecik boyutları sırasıyla 10,6 nm, 18,2 nm ve 11,3 nm olarak belirlendi. 150 nm kalınlıklı filmler için ise 10, 20 ve 30 mTorr kaplama basınçlarında tanecik boyutları sırasıyla 11,7 nm, 13,5 nm ve 10,2 nm olarak belirlendi. Filmlerin soğurma spektrumları incelendiğinde 1-2 µm dalga boyu aralığında yaklaşık %40'lık en yüksek soğurma 10 mTorr kaplama basıncında geliştirilen 100 nm ve 150 nm kalınlıklı filmler için gözlemlendi. Filmlerin elektriksel özelliklerine bakıldığında 100 nm kalınlıklı filmler için 10, 20 ve 30 mTorr kaplama basınçlarında özdirenç değerleri, sırasıyla, 0,038 Ωcm, 0,039 Ωcm ve 5,714 Ωcm olarak belirlendi. 150 nm kalınlıklı filmler için 10, 20 ve 30 mTorr kaplama basınçlarında özdirenç değerleri ise sırasıyla 0,008 Ωcm, 0,563 Ωcm ve 6,754 Ωcm olarak belirlendi. Elde edilen analiz sonuçlarından, 150 nm kalınlığa sahip ve 10 mTorr kaplama basıncında biriktirilen VO<sub>2</sub> ince filminin en iyi özelliklere sahip olduğu gözlemlendi. Bu film için en önemli sonuçlar elektriksel analizlerden elde edilen düşük özdirenç değeri, küçük tanecik boyutlu yüzey durumu ve optik analizlerden elde edilen yaklaşık % 40 oranında kızılötesi bölgede soğurmasının olmasıdır. Üretilen bu filmler kızılötesi bölge algılamaları için ilave bir soğurucu katman gerektirmemektedir. Elde edilen bu sonuçlar doğrultusunda, Bu film üzerine, termal buharlaştırma sisteminde, iki farklı metal maske ile 700 nm kalınlıkta Au elektrotlar oluşturularak VO<sub>2</sub> kızılötesi dedektör fabrikasyonu yapıldı. Geliştirilen dedektörün I-V analizleri gerçekleştirilerek ve kızılötesi ışığa karşı yüksek duyarlılığa sahip olduğu görüldü. Ayrıca kızılötesi dedektörlerin çalışma performansı için en önemli parametre olan TCR değeri yaklaşık -1 %K<sup>-1</sup> olarak bulundu. Bu sonuç geliştirilen VO<sub>x</sub> tabanlı kızılötesi dedektörün performansının iyi olduğunu göstermektedir. Ayrıca,

piyasadaki kızılötesi dedektörler karşılaştırıldığında, üretimini yaptığımız prototip kızılötesi dedektörün çıktı parametrelerinin oldukça iyi olduğu görülmektedir. Bu tez kapsamında geliştirilen kızılötesi dedektör üretim teknolojisinin, uygulamada kullanılabilir aygıtlara dönüştürülebileceği değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, tez kapsamında  $VO_x$  tabanlı Schottky diyot ve kızılötesi dedektör geliştirilmesi ve prototip üretimi için yapılan Ar-Ge çalışmaları neticesinde çıkan sonuçlar,  $VO_x$  ince filmlerinin hem elektronik aygıt hem de kızılötesi dedektör uygulamalarında kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Gelecek çalışmalara ışık tutan bu tez çıktıları yangın uyarı sistemleri, savunma teknolojileri vb. birçok günümüz teknolojik uygulamalarında kullanılabilir olduğu değerlendirilmektedir. Bu tezin ince film teknolojisine dayalı kızılötesi dedektör geliştirilmesinde ülkemize önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Zhao, Y., Mao, M., Horowitz, R., Majumdar, A., Varesi, J., Norton, P. and Kitching, J. (2002). Optomechanical uncooled infrared imaging system: design, microfabrication, and performance. *Journal of microelectromechanical systems*, 11(2), 136-146.
2. Hardie, R.C., Barnard, K.J., Bogner, J.G., Armstrong, E.E. and Watson, E.A. (1998). High-resolution image reconstruction from a sequence of rotated and translated frames and its application to an infrared imaging system. *Optical Engineering*, 37(1).
3. Cole, B., Horning, R., Johnson, B., Nguyen, K., Kruse, P.W. and Foote, M.C. (1994). High performance infrared detector arrays using thin film microstructures. *In Proceedings of 1994 IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics*, 653-656.
4. Li, L., Liu, Y., Yang, Z., He, Y., Yang, P., Chen, D. and Zhao, M. (2018). Studies of BiCuSeO thin films for potential infrared detector application. *Materials Letters*, 233, 86-89.
5. Kumar, R.R., Karunagaran, B., Mangalaraj, D., Narayandass, S.K., Manoravi, P., Joseph, M. and Gopal, V. (2003). Pulsed laser deposited vanadium oxide thin films for uncooled infrared detectors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 107(1), 62-67.
6. Hashimoto, K., Xu, H., Mukaigawa, T., Kubo, R., Zhu, H., Noda, M. and Okuyama, M. (2001). Si monolithic microbolometers of ferroelectric BST thin film combined with readout FET for uncooled infrared image sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 88(1), 10-19.
7. Shan, P.C., Çelik-Butler, Z., Butler, D.P. and Jahanzeb, A. (1995). Semiconducting YBaCuO thin films for uncooled infrared bolometers. *Journal of applied physics*, 78(12), 7334-7339.
8. Dong, L., Yue, R. and Liu, L. (2005). Fabrication and characterization of integrated uncooled infrared sensor arrays using a-Si thin-film transistors as active elements. *Journal of microelectromechanical systems*, 14(5), 1167-1177.
9. Duan, Y., Li, X., Pang, W. and Zhang, M. Wireless uncooled infrared detectors based on thin-film piezoelectric MEMS resonators. *IEEE Sensors*, 1-3.
10. Wu, C., Zhou, W., Yin, Y., Ma, W., Jiang, L., Huang, Z. and Chu, J. (2019). Long wavelength infrared detection based on Mn-Co-Ni-O thin films with dielectric-metal-dielectric absorptive structures. *Infrared Physics & Technology*, 102, 102987.
11. Hai, M. L., Cheng, Q., Hesan, M., Qu, C., Kinzel, E.C. and Almasri, M. (2018). Amorphous SixGe<sub>1-x</sub>O<sub>1-y</sub> thin films for uncooled infrared microbolometers. *Infrared Physics & Technology*, 95, 227-235.

12. Deane, S., Avdelidis, N.P., Ibarra-Castanedo, C., Zhang, H., Yazdani Nezhad, H., Williamson, A.A. and Nooralishahi, P. (2020). Comparison of Cooled and Uncooled IR Sensors by Means of Signal-to-Noise Ratio for NDT Diagnostics of Aerospace Grade Composites. *Sensors*, 20(12), 3381.
13. Shin, C., Pham, D.P., Park, J., Lee, Y.J., Kim, S. and Yi, J. (2019). Investigation of boron-doped hydrogenated silicon films as a thermo-sensing layer for uncooled microbolometer. *Thin Solid Films*, 690, 137515.
14. Banerjee, A., Satoh, H., Elamaran, D., Sharma, Y., Hiromoto, N. and Inokawa, H. (2018). Optimization of narrow width effect on titanium thermistor in uncooled antenna-coupled terahertz microbolometer. *Japanese Journal of Applied Physics*, 57(4S), 04FC09.
15. Fukuhara, T., Kouyama, T., Kato, S., Nakamura, R., Takahashi, Y. and Akiyama, H. (2017). Detection of small wildfire by thermal infrared camera with the uncooled microbolometer array for 50-kg class satellite. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(8), 4314-4324.
16. Chen, S., Lust, M. and Ghalichechian, N. (2020). Multiphysics simulation of hypersensitive microbolometer sensor using vanadium dioxide and air suspension for millimeter wave imaging. *Microsystem Technologies*, 1-8.
17. Abdel-Rahman, M., Zia, M. and Alduraibi, M. (2019). Temperature-Dependent Resistive Properties of Vanadium Pentoxide/Vanadium Multi-Layer Thin Films for Microbolometer & Antenna-Coupled Microbolometer Applications. *Sensors*, 19(6), 1320.
18. Jimenez, R., Moreno, M., Torres, A., Morales, A., Ponce, A., Ferrusca, D. and Cano, E. (2020). Fabrication of Microbolometer Arrays Based on Polymorphous Silicon-Germanium. *Sensors*, 20(9), 2716.
19. Banerjee, A., Satoh, H., Tiwari, A., Apriono, C., Rahardjo, E.T., Hiromoto, N. and Inokawa, H. (2017). Width dependence of platinum and titanium thermistor characteristics for application in room-temperature antenna-coupled terahertz microbolometer. *Japanese Journal of Applied Physics*, 56(4S), 04CC07.
20. Renoux, P., Jo'nsson, S.E., Klein, L.J., Hamann, H.F. and Ingvarsson, S. (2011). Sub-wavelength bolometers: Uncooled platinum wires as infrared sensors. *Optics Express*, 19(9) 8721.
21. Shie, J., Chen, Y., Yang, Y. and Chou, B. (1996). Characterization and Modeling of Metal-Film Microbolometer. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 5(4).
22. Saxena, R.S., Bhan, R.K. Jalwania, C.R. and Khurana, K. (2008). Effect of excessive bias heating on titanium microbolometer IR detector. *IEEE Sensors Journal*, 8(11), 1801-1804.
23. Neuzil, P. and Mei, T. (2004). A method of suppressing self-heating signal of bolometers. *IEEE Sensors Journal*, 4(2), 207-210.

24. Bhosle, V. Tiwari, A. and Narayan, J. (2006). Metallic conductivity and metal-semiconductor transition in Ga-doped ZnO. *Applied Physics Letters*, 88(3), 032106.
25. İnternet: Uncooled detectors for thermal imaging cameras. URL: [http://www.flirmedia.com/MMC/CVS/Applications/Stories/AS\\_0015\\_EN.pdf](http://www.flirmedia.com/MMC/CVS/Applications/Stories/AS_0015_EN.pdf), Son Erişim Tarihi: 21.10.2020.
26. Liang, D., Rui-Feng, Y. and Li-Tian, L. (2003). Characterization of uncooled poly SiGe microbolometer for infrared detection. *Chinese physics letters*, 20(5), 770.
27. Tachiki, T. and Uchida, T. (2013). Fabrication and evaluation of thin-film spiral-antenna-coupled VO<sub>x</sub> microbolometer by metal-organic decomposition. *Japanese Journal of Applied Physics*, 52(4R), 046601.
28. Wang, S., Yu, S., Lu, M., Liu, M. and Zuo, L. (2017). Atomic layer-deposited titanium-doped vanadium oxide thin films and their thermistor applications. *Journal of Electronic Materials*, 46(4), 2153-2157.
29. Kaya, M.D., Sertel, B.C., Sonmez, N.A., Cakmak, M. and Ozcelik, S. (2020). Thickness-dependent physical properties of sputtered V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films and Ti/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/n-Si Schottky barrier diode. *Applied Physics A*, 126(11), 1-11.
30. Hadfield, R.H. (2009). Single-photon detectors for optical quantum information applications. *Nature photonics*, 3(12), 696-705.
31. Harathi, N., Anitha, V.R. and Meenakshi, V. (2017). Review on environmental pollution monitoring sensor using MEMS based non dispersive infrared spectroscopic technique. *In 2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, 1-6.
32. Shalu, C., Shukla, M., Tiwari, A., Agrawal, J., Bilgaiyan, A. and Singh, V. (2020). Role of solvent used to cast P3HT thin films on the performance of ZnO/P3HT hybrid photo detector. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 115, 113694.
33. Rogalski, A. (2004). Optical detectors for focal plane arrays. *Optoelectronics review*, 12(2), 221-246.
34. Piller, M., Luhmann, N., Chien, M.H. and Schmid, S. (2019). Nanoelectromechanical infrared detector. In *Optical Sensing, Imaging, and Photon Counting: From X-Rays to THz. International Society for Optics and Photonics*, 11088, 1108802.
35. İnternet: Detection of Light. URL: [https://home.strw.leidenuniv.nl/~brandl/DOL/DTL\\_06\\_2018\\_Bolometers.pdf](https://home.strw.leidenuniv.nl/~brandl/DOL/DTL_06_2018_Bolometers.pdf), Son Erişim Tarihi: 30.10.2020.
36. Kuhn, T.S. (1987). *Black-body theory and the quantum discontinuity*. University of Chicago Press, 1894-1912.
37. İnternet: Learn Blackbody Radiation in 4 minutes. URL: <https://www.toppr.com/content/story/amp/blackbody-radiation-28348/>, Son Erişim Tarihi: 30.10.2020.

38. Stewart, S.M. and Johnson, R.B. (2016). *Blackbody radiation: A history of thermal radiation computational aids and numerical methods* (First Edition). Newyork: CRC Press, 414.
39. Hsieh, M.L., Lin, S.Y., Bur, J.A. and Shenoi, R. (2015). Experimental observation of anomalous thermal radiation from a three-dimensional metallic photonic crystal. *Nanotechnology*, 26(23), 234002.
40. Giddings, S.B. (2016). Hawking radiation, the Stefan–Boltzmann law, and unitarization. *Physics Letters B*, 754, 39-42.
41. Baird, J.K. and King, T.R. (1999). A wien displacement law for impact radiation. *International journal of impact engineering*, 23(1), 39-49.
42. Tan, P.K., Yeo, G.H., Poh, H.S., Chan, A.H. and Kurtsiefer, C. (2014). Measuring temporal photon bunching in blackbody radiation. *The Astrophysical Journal Letters*, 789(1), L10.
43. İnternet: The surface temperature of stars is determined using which law?. URL: <https://www.quora.com/The-surface-temperature-of-stars-is-determined-using-which-law>, Son Erişim Tarihi: 30.10.2020.
44. Özküralpli, İ. (2006). *Trakya Meriç Havzasındaki Çeltik Ekili Alanlarda Ürün Gelişiminin Çok Zamanlı Radar Uydu Görüntü Verileri Yardımıyla İzlenmesi*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-85.
45. İnternet: Atmospheric Transmittance. URL: [https://www.usna.edu/Users/oceano/pguth/md\\_help/remote\\_sensing\\_course/atmos\\_transmit.htm](https://www.usna.edu/Users/oceano/pguth/md_help/remote_sensing_course/atmos_transmit.htm), Son Erişim Tarihi: 02.11.2020.
46. Kruse, P.W. (2001). *Uncooled Thermal Imaging* (First Edition). Bellingham: SPIE Press, 51.
47. Levine, B.F. (1993). Quantum-well infrared photodetectors. *Journal of applied physics*, 74(8), R1-R81.
48. Fang, H. and Hu, W. (2017). Photogating in low dimensional photodetectors. *Advanced science*, 4(12), 1700323.
49. Wang, H. and Kim, D.H. (2017). Perovskite-based photodetectors: materials and devices. *Chemical Society Reviews*, 46(17), 5204-5236.
50. Rogalski, A. (2011). *Infrared Detectors* (Second Edition). Boca Raton: CRC Press, 87-641.
51. Qian, Z., Rajaram, V., Kang, S. and Rinaldi, M. (2019). High figure-of-merit NEMS thermal detectors based on 50-nm thick AlN nano-plate resonators. *Applied Physics Letters*, 115(26), 261102.

52. Schoeman, J. and Du Plessis, M. (2016). An analytic model employing an elliptical surface area to determine the gaseous thermal conductance of uncooled VO<sub>x</sub> microbolometers. *Sensors and Actuators A: Physical*, 250, 229-236.
53. Yeh, T.H., Tsai, C.K., Chu, S.Y., Lee, H.Y. and Lee, C.T. (2020). Performance improvement of Y-doped VO<sub>x</sub> microbolometers with nanomesh antireflection layer. *Optics Express*, 28(5), 6433-6442.
54. Maeda, K., Hai, V.N., Nishioka, K., Matsutani, A., Tachiki, T. and Uchida, T. (2018). Characteristics of VO<sub>x</sub> Microbolometer on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> Membrane Fabricated by Deep-RIE and XeF<sub>2</sub> Vapor Etching for THz-detectors. *IEEE*, 1-2.
55. Hai, M.L., Cheng, Q., Hesan, M., Qu, C., Kinzel, E.C. And Almasri, M. (2018). Amorphous Si<sub>x</sub>GeyO<sub>1-x-y</sub> thin films for uncooled infrared microbolometers. *Infrared Physics & Technology*, 95, 227-235.
56. Maeda, K., Hai, V.N., Nishioka, K., Matsutani, A., Tachiki, T. and Uchida, T. (2019). Evaluation of characteristics in VO<sub>x</sub> microbolometer fabricated by MOD on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> membrane. *Electronics and Communications in Japan*, 102(3), 12-20.
57. Abdel-Rahman, M., Alduraibi, M., Hezam, M., and Ilahi, B. (2019). Sputter deposited GeSn alloy: A candidate material for temperature sensing layers in uncooled microbolometers. *Infrared Physics & Technology*, 97, 376-380.
58. Kil, T.H., Choi, H.J., Lee, G., Lee, B.H., Jung, S.Y., Ning, R. and Baek, S.H. (2020). Selective growth and texturing of VO<sub>2</sub> (B) thin films for high-temperature microbolometers. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(15), 5582-5588.
59. Yu, L., Guo, Y., Zhu, H., Luo, M., Han, P. and Ji, X. (2020). Low-Cost Microbolometer Type Infrared Detectors. *Micromachines*, 11(9), 800.
60. Bagherzadeh, H., Zhang, W. and Brown, E.R. (2016). Accurate MM-wave-to-THz power measurements with large-area pyroelectric detectors. *IEEE*, 437-440.
61. Heikkilä, T.T., Ojajärvi, R., Maasilta, I.J., Strambini, E., Giazotto, F. and Bergeret, F. S. (2018). Thermoelectric radiation detector based on superconductor-ferromagnet systems. *Physical Review Applied*, 10(3), 034053.
62. Ji, Y.D., Pan, T.S., Bi, Z., Liang, W.Z., Zhang, Y., Zeng, H.Z. and Lin, Y. (2012). Epitaxial growth and metal-insulator transition of vanadium oxide thin films with controllable phases. *Applied Physics Letters*, 101(7), 071902.
63. Sahana, M.B., Dharmaprakash, M.S. and Shivashankar, S.A. (2002). Microstructure and properties of VO<sub>2</sub> thin films deposited by MOCVD from vanadyl acetylacetonate. *Journal of Materials Chemistry*, 12(2), 333-338.
64. Ngom, B.D., Chaker, M., Diallo, A., Madiba, I.G., Khamlich, S., Manyala, N. and Maaza, M. (2014). Competitive growth texture of pulsed laser deposited vanadium dioxide nanostructures on a glass substrate. *Acta materialia*, 65, 32-41.

65. Voshell, A., Dhar, N. and Rana, M.M. (2017). Materials for microbolometers: vanadium oxide or silicon derivatives. *International Society for Optics and Photonics*, 10209, 102090M.
66. Lee, H.Y., Wu, C.L., Kao, C.H., Lee, C.T., Tang, S.F., Lin, W.J. and Lin, J.C. (2015). Investigated performance of uncooled tantalum-doped VO<sub>x</sub> floating-type microbolometers. *Applied Surface Science*, 354, 106-109.
67. Gao, C., Xie, X., He, R., Yu, B., Wu, B., Luo, Z. and Xie, W. (2018). Hydrothermal synthesis of high quality free-standing VO<sub>2</sub> (B) thin film and its thermal resistance characteristics. *Materials Letters*, 225, 29-32.
68. Wan, D., Xiong, P., Chen, L., Shi, S., Ishaq, A., Luo, H. and Gao, Y. (2017). High-performance thermal sensitive W-doped VO<sub>2</sub> (B) thin film and its identification by first-principles calculations. *Applied Surface Science*, 397, 30-39.
69. Ilahi, B., Abdel-Rahman, M., Zaaboub, Z., Zia, M.F., Alduraibi, M. and Maaref, H. (2016). Thermal annealing induced multiple phase in V/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> alternating multilayer structure. *International Journal of Modern Physics B*, 30(27), 1650210.
70. Bhandari, C., Lambrecht, W.R., and van Schilfgaarde, M. (2015). Quasiparticle self-consistent G W calculations of the electronic band structure of bulk and monolayer V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. *Physical Review B*, 91(12), 125116.
71. Santos, R., Loureiro, J., Nogueira, A., Elangovan, E., Pinto, J.V., Veiga, J.P. and Ferreira, I. (2013). Thermoelectric properties of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films deposited by thermal evaporation. *Applied surface science*, 282, 590-594.
72. Acosta, D., Pérez, A., Magaña, C. and Hernández, F. (2016). V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films deposited by RF magnetron sputtering: the influence of oxygen content in physical properties. *Journal of Materials Science and Engineering A*, 6(3-4), 81-87.
73. Schneider, K., Lubecka, M., and Czaplá, A. (2016). V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films for gas sensor applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 236, 970-977.
74. Hamdan, N.L., Atallah, F.S., Khalaf, M.K. and Salman, I.K. (2020). Investigate the Structural and Optical Properties of RF-Sputtered V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films deposited at different Power. *Tikrit Journal of Pure Science*, 25(1), 102-107.
75. Moore, E., Kurtz, N., Ollanik, A., Riggs, B. and Escarra, M. (2017). Growth and Characterization of Vanadium Dioxide Thin Films for Application in Tunable Metasurfaces. *APS*, X37-008.
76. Zhang, Z., Chen, J., Guo, Y. and Robertson, J. (2019). Band alignment calculation of dielectric films on VO<sub>2</sub>. *Microelectronic Engineering*, 216, 111057.
77. Asayesh-Ardakani, H., Yao, W., Nie, A., Marley, P.M., Braham, E., Klie, R.F. and Shahbazian-Yassar, R. (2017). Direct evidence of M<sub>2</sub> phase during the monoclinic-tetragonal (rutile) phase transition of W-doped VO<sub>2</sub> nanowires. *Applied Physics Letters*, 110(5), 053107.

78. Wu, Y., Fan, L., Huang, W., Chen, S., Chen, S., Chen, F. and Wu, Z. (2014). Depressed transition temperature of  $W_xV_{1-x}O_2$ : mechanistic insights from the X-ray absorption fine structure (XAFS) spectroscopy. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 16(33), 17705-17714.
79. Jones, A.C., Berweger, S., Wei, J., Cobden, D. and Raschke, M.B. (2010). Nano-optical investigations of the metal– insulator phase behavior of individual  $VO_2$  microcrystals. *Nano letters*, 10(5), 1574-1581.
80. Manca, N., Kanki, T., Endo, F., Marré, D. and Pellegrino, L. (2020). Planar Nanoactuators Based on  $VO_2$  Phase Transition. *Nano Letters*, 20(10), 7251-7256.
81. Zhang, C., Koughia, C., Güneş, O., Luo, J., Hossain, N., Li, Y. and Kasap, S. (2020). Synthesis, structure and optical properties of high-quality  $VO_2$  thin films grown on silicon, quartz and sapphire substrates by high temperature magnetron sputtering: Properties through the transition temperature. *Journal of Alloys and Compounds*, 848, 156323.
82. Elton, L.R.B. and Jackson, D.F. (1966). X-ray diffraction and the Bragg law. *American Journal of Physics*, 34(11), 1036-1038.
83. Briggs, D. (1998). *Surface analysis of polymers by XPS and static SIMS* (First Edition). Cambridge: Cambridge University Press, 212.
84. Ramdzan, N.S.M., Fen, Y.W., Omar, N.A.S., Anas, N.A.A., Daniyal, W.M.E.M.M., Saleviter, S. and Zainudin, A.A. (2019). Optical and surface plasmon resonance sensing properties for chitosan/carboxyl-functionalized graphene quantum dots thin film. *Optik*, 178, 802-812.
85. Viezbicke, B.D., Patel, S., Davis, B.E. and Birnie III, D.P. (2015). Evaluation of the Tauc method for optical absorption edge determination: ZnO thin films as a model system. *Physica status solidi (b)*, 252(8), 1700-1710.
86. Mane, A.A. and Moholkar, A.V. (2017). Effect of film thickness on  $NO_2$  gas sensing properties of sprayed orthorhombic nanocrystalline  $V_2O_5$  thin films. *Applied Surface Science*, 416, 511-520.
87. Balasubramani, V., Chandrasekaran, J., Marnadu, R., Vivek, P., Maruthamuthu, S. and Rajesh, S. (2019). Impact of Annealing Temperature on Spin Coated  $V_2O_5$  Thin Films as Interfacial Layer in Cu/ $V_2O_5$ /n-Si Structured Schottky Barrier Diodes. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 29(5), 1533-1547.
88. Mousavi, M., Kompany, A., Shahtahmasebi, N. and Bagheri-Mohagheghi, M.M. (2013). Study of structural, electrical and optical properties of vanadium oxide condensed films deposited by spray pyrolysis technique. *Advances in Manufacturing*, 1(4), 320-328.
89. Rachel, M.D., Sivakumar, R. and Sanjeeviraja, C. (2016). Annealing effects on  $V_2O_{5-x}$  thin films deposited by non reactive sputtering. *Наносистемы: физика, химия, математика*, 7(3), 547-552.

90. Chitra, M. and Mangamma, G. (2020). Local grain to grain conductivity in SnO<sub>2</sub>-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanocomposite ethanol sensor. *Nanotechnology*, 31, 344001.
91. Asar, T., Korkmaz, B. and Özçelik, S. (2016). Effect of platinum doping on the structural and electrical properties of SnO<sub>2</sub> thin films. *Journal of Experimental Nanoscience*, 11(16), 1285-1306.
92. Durmuş, H. and Karataş, Ş. (2019). The analysis of the electrical characteristics and interface state densities of Re/n-type Si Schottky barrier diodes at room temperature. *International Journal of Electronics*, 106(4), 507-520.
93. Harishsenthil, P., Chandrasekaran, J., Marnadu, R., Balraju, P. and Mahendarn, C. (2020). Influence of high dielectric HfO<sub>2</sub> thin films on the electrical properties of Al/HfO<sub>2</sub>/n-Si (MIS) structured Schottky barrier diodes. *Physica B: Condensed Matter*, 594, 412336.
94. Balaji, M., Chandrasekaran, J., Raja, M. and Marnadu, R. (2019). Impact of Cu concentration on the properties of spray coated Cu-MoO<sub>3</sub> thin films: evaluation of n-CuMoO<sub>3</sub>/p-Si junction diodes by JV, Norde and Cheung's methods. *Materials Research Express*, 6(10), 106404.
95. Tataroğlu, A., Altındal, Ş. and Azizian-Kalandaragh, Y. (2020). Comparison of electrical properties of MS and MPS type diode in respect of (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PVP) interlayer. *Physica B: Condensed Matter*, 576, 411733.
96. Yeriskin, S.A., Unal, H.I., Sari, B. (2011). Electrical and dielectric characteristics of Al/polyindole Schottky barrier diodes. II. Frequency dependence. *Journal of Applied Polymer Science*, 120(1), 390-396.
97. Beke, S., Giorgio, S., Körösi, L., Nanai, L. And Marine, W. (2008). Structural and optical properties of pulsed laser deposited V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films. *Thin Solid Films*, 516(15), 4659-4664.
98. Zhang, X., Wang, J. G., Liu, H., Liu, H. and Wei, B. (2017). Facile synthesis of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> hollow spheres as advanced cathodes for high-performance lithium-ion batteries. *Materials*, 10(1), 77.
99. Wang, X., Guo, Z., Gao, Y. and Wang, J. (2017). Atomic layer deposition of vanadium oxide thin films from tetrakis (dimethylamino) vanadium precursor. *Journal of Materials Research*, 32(1), 37-44.
100. Jarka, P., Tański, T., Matysiak, W., Krzemiński, Ł., Hajduk, B. and Bilewicz, M. (2017). Manufacturing and investigation of surface morphology and optical properties of composite thin films reinforced by TiO<sub>2</sub>, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Applied Surface Science*, 424, 206-212.
101. Gagaoudakis, E., Aperathitis, E., Michail, G., Panagopoulou, M., Katerinopoulou, D., Binas, V. and Kiriakidis, G. (2018). Low-temperature rf sputtered VO<sub>2</sub> thin films as thermochromic coatings for smart glazing systems. *Solar Energy*, 165, 115-121.

102. Fang, G.J., Liu, Z.L., Wang, Y., Liu, Y.H. and Yao, K.L. (2001). Synthesis and structural, electrochromic characterization of pulsed laser deposited vanadium oxide thin films. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 19(3), 887-892.
103. Sasikumar, K., Bharathikannan, R. and Raja, M. (2019). Effect of Annealing Temperature on Structural and Electrical Properties of Al/ZrO<sub>2</sub>/p-Si MIS Schottky Diodes. *Silicon*, 11(1), 137-143.
104. Chi-Anh, N., Shin, H.J., Kim, K., Han, Y.H. and Moon, S. (2005). Characterization of uncooled bolometer with vanadium tungsten oxide infrared active layer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 123, 87-91.







*GAZİ GELECEKTİR..*