
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

MgO ARA YÜZEY TABAKALI YARIİLETKEN AYGITLARIN ELEKTRONİK VE OPTOELEKTRONİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Başak Çağlayan TOPRAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FOTONİK BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAYIS 2024

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmasında 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.

Başak Çağlayan TOPRAK

14/05/2024

MgO ARA YÜZEY TABAKALI YARIİLETKEN AYGITLARIN ELEKTRONİK VE OPTOELEKTRONİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Başak Çağlayan TOPRAK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2024

ÖZET

Magnezyum oksit (MgO), yüksek optik şeffaflık, düşük ısı iletkenliği, kimyasal eylemsizlik, yüksek ısı direnci ve mekanik dayanıklılık gibi çeşitli nitelikleriyle bilinen bir malzemedir. Toksik olmaması, kimyasal ve fiziksel stabilitesi nedeniyle magnezyum oksit (MgO) malzemesi antibakteriyel, antimikrobiyal ve fotokatalitik gibi özellikler için kullanılabilir. Optik, elektriksel, manyetik, termal, mekanik ve kimyasal nitelikleri nedeniyle nano ölçekli magnezyum oksit geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. MgO ince filmleri düşük kırılma indisine, mükemmel şeffaflığa ve geniş bant aralığına sahip olması nedeni ile optoelektronik uygulamalarda kullanılır. Böylece optik ve elektriksel alanlarda önemli bir rol oynar. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde MgO ince filmleri ara yüzey tabakası olarak elektronik ve optoelektronik özellikleri üzerinde detaylı bir araştırma yapılmadığı görülmektedir. Bu tez çalışmasının amacı, MgO arayüzey tabakalı yarıiletken aygıtların elektronik ve optoelektronik özelliklerinin incelenmesidir. Bu çalışmada, eş-püskürtme tekniği ile oda sıcaklığında n-Si ve cam alttaşlar üzerine 100 nm kalınlığında MgO ince filmler biriktirildi. Üretilen MgO ince filmlerin X-ışını Kırınım (XRD), Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ve UV-Vis spektroskopisi sistemleri kullanılarak yapısal, morfolojik ve optik özellikleri belirlendi. MgO ince filmin XRD deseninde kırınım pikleri 36.29°'de (111) ve 43.55°'de (200) olarak bulundu ve bu XRD kırınım deseninden yapının kübik olduğu tespit edilmiştir. MgO ince filmin geçirgenlik değerinin görünür ışık bölgesinde %90 civarında olduğunu görüldü. MgO filmin maksimum optik absorbansının UV bölgesinde meydana geldiği, VIS/yakın kızılötesi (NIR) bölgesinde ise değerinin düşük ve nispeten sabit olduğu görüldü. MgO ince filmin direkt optik bant aralığının 3,98 eV olarak bulundu. Termal buharlaştırma sistemi kullanarak altın (Au) metal kontakların oluşturulması ile hazırlanan Au/MgO/n-Si Schottky diyotun akım-voltaj (I-V) ve kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri oda sıcaklığında gerçekleştirildi. I-V ölçümlerinin analizi sonucunda idealite faktörü η= 3,79, bariyer yüksekliği Φ_b= 0,76 eV ve seri direnç R_s= 5,36 x10^3 Ω olarak elde edildi.

Bilim Kodu : 20217
Anahtar Kelimeler : Magnezyum Oksit, püskürtme sistemi, ince film
Sayfa Adedi : 75
Danışman : Prof. Dr. Saime Şebnem AYDIN

INVESTIGATION OF ELECTRONIC AND OPTOELECTRONIC PROPERTIES OF MgO INTERFACE LAYER SEMICONDUCTOR DEVICES

(M. Sc. Thesis)

Başak Çağlayan TOPRAK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2024

ABSTRACT

Magnesium oxide (MgO) is a material known for its various qualities such as high optical transparency, low thermal conductivity, chemical inertness, superior heat resistance and mechanical strength. Due to its non-toxicity and chemical and physical stability, magnesium oxide (MgO) material can be used for properties such as antibacterial, antimicrobial and photocatalytic. Due to its optical, electrical, magnetic, thermal, mechanical and chemical qualities, nanoscale magnesium oxide is used in a wide range of applications. MgO thin films have low refractive index, excellent transparency and wide bandgap optical properties. Therefore, it is used in optoelectronic applications. Thus, it plays an important role in optical and electrical fields. When the studies in the literature are examined, it can be seen that no detailed research has been conducted on the electronic and optoelectronic properties of MgO thin films as the interface layer. The aim of this thesis is to examine the electronic and optoelectronic properties of semiconductor devices with MgO interface layers. In this study, 100 nm thick MgO thin films were deposited on n-Si and glass substrates at room temperature using the co-sputtering technique. Structural, morphological and optical properties of the produced MgO thin films were determined using X-ray diffraction system (XRD), Atomic Force Microscope (AFM), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and UV-Vis spectroscopy. In the XRD pattern of the MgO thin film, the diffraction peaks were found at 36.29° (111) and 43.55° (200), and it was determined from this XRD diffraction pattern that the structure was cubic. It was observed that the transmittance value of MgO thin film was around 90% in the visible light region. It was observed that the maximum optical absorbance of the MgO film occurred in the UV region, while its value was low and relatively constant in the VIS/near infrared (NIR) region. The direct optical band gap of the MgO thin film was found to be 3.98 eV. Current-voltage (I-V) and capacitance-voltage (C-V) measurements of the Au/MgO/n-Si Schottky diode, which was prepared by forming gold (Au) metal contacts using a thermal evaporation system, were carried out at room temperature. As a result of the analysis of I-V measurements, the ideality factor was obtained as $\eta = 3.79$, the barrier height as $\Phi_b = 0.76$ eV and the series resistance as $R_s = 5.36 \times 10^3\ \Omega$.

Science Code : 20217
Key Words : Magnesium Oxide, sputtering system, thin film
Page Number : 75
Supervisor : Prof. Dr. Saime Şebnem AYDIN

TEŞEKKÜR

En başta tez danışmanım değerli hocam Prof. Dr. Saime Şebnem AYDIN'a yüksek lisans tezim sırasında verdiği tavsiye ve desteklerden dolayı çok teşekkür ederim, sevgi ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmam boyunca bilimsel katkı ve yardımlarıyla beni yönlendirerek çalışmalarımda gerekli imkânı ve ortam sağladığı değerli hocam Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e çok teşekkür ederim. Kıymetli hocam Adem TATAROĞLU'unun tez çalışmam boyunca değerli katkıları ve desteklerinden dolayı çok teşekkür eder, saygılarımı sunarım. Tez çalışmam boyunca tecrübe ve deneyimlerini esirgemeyen, hoşgörülü, ilgi ve desteklerinden dolayı değerli hocam Prof. Dr. Mustafa Kemal ÖZTÜRK'e teşekkür ederim.

Hedeflerime ulaşmamda bana her zaman inanan, maddi ve manevi yardımda bulunan, büyük bir sabır gösteren, eğitimim boyunca yaşadığım tüm zorlu mücadelede her zaman yanımda olan, sevgilerini ve desteklerini esirgemeyen annem Beyhan TOPRAK, babam Hüseyin TOPRAK, yengem Yasemin TOPRAK ve canım aileme tüm kalbimle çok teşekkür eder, sevgi ve saygılarımı sunuyorum. Lisans eğitimimden itibaren her zaman yanımda olan, büyük bir sabır gösteren, eğitimim boyunca yaşadığım tüm zorlu mücadelede her zaman yanımda olan, sevgisini ve desteğini esirgemeyen yakın zamanda kaybetmiş olduğum meslektaşım, abim Burak Nazmi TOPRAK'a minnet duyuyor, saygı ve özlemle anıyorum. Yakın zamanda kaybetmiş olduğum büyük abim Serkan TOPRAK'a çok teşekkür ediyor, saygı ve özlemle anıyorum. Abilerime Allah'tan rahmet diliyorum ve sizleri hiç unutmayacağım.

Tez çalışmam boyunca desteklerini ve sevgilerini esirgemeyen değerli arkadaşlarım Özlem BAYAL, Bengisu SAYİN, Esra BALCI ve Nurhayat YILDIRIM'a çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca bana yardımcı olan ve cesaret veren Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki değerli hocalarıma ve araştırmacı arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma 2016K121220 ve 2019K12-149045 nolu projeler ile Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xiii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. MAGNEZYUM OKSİT 5

2.1. Magnezyum Oksit'in Yapısı ve Özellikleri 5

2.2. MgO'nun Kullanım Alanları 6

2.3. Magnezyum Oksit İnce Filmlerin Üretim Teknikleri 7

2.3.1. Fiziksel buhar biriktirme tekniği 7

2.3.2. Lazer buharlaştırma yöntemi 8

2.3.3. Elektron demeti ile buharlaştırma yöntemi 8

2.3.4. İyon ışın destekli biriktirme yöntemi 9

2.3.5. Ark yöntemi ile biriktirme 11

2.3.6. Kimyasal buhar biriktirme tekniği 11

2.3.7. Püskürtme tekniği 13

3. METAL-YARIİLETKEN KONTAKLAR 17

3.1. Metal ve n-tipi Yarıiletken Schottky Kontaklar 17

3.2. Metal ve n-Tipi Yarıiletken Omik Kontaklar 19

3.3. Metal ve p-Tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontak 20

Sayfa

3.4. Metal ve p-tipi Yarıiletken Omik Kontak 21

3.5. Termiyonik Emisyon Teorisi (TE) 21

3.6. Schottky Diyot Parametrelerinin Norde Fonksiyonları ile Hesaplanması 24

3.7. Schottky Diyotlarda Kapasitans- Gerilim Karakteristikleri 24

4. KULLANILAN YÖNTEMLER VE KARAKTERİZASYON SİSTEMLERİ 27

4.1. Eş-Püskürtme Sistemi 27

4.2. Karakterizasyon Sistemleri 29

4.2.1. X-ışını kırınımı (XRD) sistemi 29

4.2.2. UV-Vis spektrometresi 31

4.2.3. Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrometresi 33

4.2.3. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) 34

4.2.4. Profilometre 36

4.3. Fabrikasyon Sistemleri 38

4.3.1. Termal buharlaştırma sistemi 38

4.3.2. Hızlı tavlama sistemi (RTA) 39

4.4. Elektriksel Karakterizasyon Sistemleri 40

4.4.1. Akım-gerilim (I-V) ölçüm sistemi 40

4.4.2. Kapasitans-gerilim (C-V) ölçüm sistemi 41

5. YAPILARIN KAPLANMASI, KARAKTERİZASYONLARI: BULGULAR VE TARTIŞMA 43

5.1. MgO İnce Film Yapılarının Üretimi 43

5.1.1. Alttaş hazırlama ve temizleme işlemleri 43

5.1.2. MgO ince filmlerin eş-püskürtme sistemi ile üretimi 44

5.2. Kontak Oluşumu 45

5.3. Karakterizasyonlar 46

5.3.2. Optik karakterizasyon analizi 48

Sayfa

5.3.3. Morfolojik analiz 52

5.3.4. Elektriksel karakterizasyon analizi 54

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 63

KAYNAKLAR 65

ÖZGEÇMİŞ 75

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Magnezyum oksitin özellikleri 5

Çizelge 3.1. Metal ile yarıiletken malzemelerin kontak türleri 17

Çizelge 5.1. MgO ince filmlerin kaplama parametre değerleri 44

Çizelge 5.2. MgO XRD analizinde hesaplanan parametreleri 47

Çizelge 5.3. Au/MgO/n-Si diyotun oda sıcaklığında elde edilen I_0, η, Φ_b ve R_s değerleri..... 55

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Lazer buharlaştırma yöntemi şeması 8

Şekil 2.2. Elektron demeti ile buharlaştırma yöntemi 9

Şekil 2.3. İyon ışın destekli biriktirme..... 10

Şekil 2.4. İyon demeti ile biriktirtme yöntemi şeması 10

Şekil 2.5. Ark yöntemi ile biriktirme 11

Şekil 2.6. Kimyasal buhar biriktirme (CVD) tekniği 12

Şekil 2.7. Püskürtme tekniğin temel prensibi 14

Şekil 2.8. Püskürtme sisteminin temel bileşenlerini gösteren şematik 15

Şekil 2.9. DC püskürtme tekniği şeması 16

Şekil 4.1. Eş-püskürtme sistemi şeması 28

Şekil 4.2. Bragg kanunu şeması 29

Şekil 4.3. X-ışını kırınım şeması 30

Şekil 4.4. UV-Vis absorpsiyon spektroskopisi şeması 32

Şekil 4.5. AFM Çalışma prensibi 34

Şekil 4.6. AFM'nin çalışma prensibini gösteren şematik diyagram 35

Şekil 4.7. Profilometrenin çalışma prensibi 37

Şekil 4.8. Termal buharlaştırma sistemin çalışma prensibi 38

Şekil 5.1. MgO diyotların üretim ve karakterizasyon akış şeması 43

Şekil 5.2. MgO ince filmin XRD deseni..... 46

Şekil 5.3. Dalgaboyunun (λ) bir fonksiyonu olarak MgO ince filmin optik (a) iletim (b) absorbans (soğurma) spektrumu..... 49

Şekil 5.4. Absorpsiyon katsayısının (α) λ'nın bir fonksiyonu olarak değişimi 50

Şekil 5.5. $(\alpha h\nu)^{2'}$nin E(hν) ile değişimi 51

Şekil 5.6. Geçirgenlik-dalga sayısı grafiği..... 52

Şekil 5.7. Au/MgO/n-Si diyotun Ln(I)-V grafiği..... 55

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.8. Au/MgO/Si aygıtın F(V)-V grafiği 56

Şekil 5.9. Au/MgO/Si aygıtın R_j–V grafiği 57

Şekil 5.10. Nss'nin Ec-Ess'e karşı grafiği 58

Şekil 5.11. C-V grafiği 59

Şekil 5.12. G_d/w-V grafiği 59

Şekil 5.13. R_s-V grafiği 61

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 4.1. Nanovak NVTS-500 Eş-püskürtme sistemi (Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi) 28

Resim 4.2. XRD Cihazı (Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi) 31

Resim 4.3. UV-Vis spektrometresi 33

Resim 4.4. FTIR spektrometresi (VERTEX 80) 34

Resim 4.5. AFM sistemi (NanoMagnetics) 36

Resim 4.6. Profilometre sistemi 37

Resim 4.7. Termal buharlaştırma sistemi (Nanovak NVTH-350) 39

Resim 4.8. Hızlı tavlama sistemi (RTA) 40

Resim 4.9. Keithley 4200-SCS I-V sistemi 41

Resim 4.10. Kapasitans-gerilim (C-V) ölçüm sistemi (“1: Riyostat, 2: Monitör, 3: Empedans analizmetre, 4: Sıcaklık kontrol ünitesi, 5: Işık kaynağı kontrol ünitesi, 6: Halojen lambalı ışık kaynağı”) 42

Resim 5.1. Kaplanan MgO ince filmler 45

Resim 5.2. a) MgO ince film numunenin Schottky kontaklar alınmış görünümü b) Omik kontaklar alınmış görünümü 45

Resim 5.3. Cam alttaş üzerine büyütülen MgO ince filmin 2D ve 3D topografik görüntüleri 53

Resim 5.4. n-Si alttaş üzerine büyütülen MgO ince filmin 2D ve 3D topografik görüntüleri 53

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu tez çalışmasında kullanılan simgeler, kısaltmalar ve açıklamalar aşağıda gösterilmiştir.

Simgeler	Açıklamalar
I_0	Doyum akımı
V_d	Difüzyon potansiyeli
m_e^*	Elektronun etkin kütlesi
Å	Angström
Ar	Argon
Ar+	Argon iyonu
kV	Kilovolt
C	Kapasitans
$C-V$	Kapasitans-Gerilim
Eg	Yasak enerji aralığı
I	Akım
$I-V$	Akım-Gerilim
Mg	Magnezyum
MgO	Magnezyum oksit
O	Oksijen
Rs	Seri direnç
Si	Silisyum
V	Gerilim
Vb	Metal taraftaki potansiyel engel yüksekliği
W	Watt
d	Düzlemler arası uzaklık
eV	Elektron volt
hv	Foton enerjisi
$k.b.$	Keyfi birim
$mTorr$	Militorr
$mbar$	Milibar
nm	Nanometre

Simgeler	**Açıklamalar**
$\boldsymbol{\alpha}$	Soğurma katsayısı
$\boldsymbol{\eta}$	İdealite faktörü
$\boldsymbol{\theta}$	Bragg açısı
$\boldsymbol{\lambda}$	Dalga boyu
$\boldsymbol{\mu m}$	Mikrometre

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
CVD	Kimyasal buhar biriktirme
DC	Doğru akım
FTIR	Fourier dönüşümlü kızılötesi
FWHM	Pik yarı genişliği
MOS	Metal-oksit-yarıiletken
MS	Metal-yarıiletken
PVD	Kimyasal buhar biriktirme
RF	Radyo frekans
RTA	Hızlı ısıl tavlama
TVA	Termiyonik vakum ark
UV-Vis	Morötesi görünür
XRD	X-ışını kırınımı

1. GİRİŞ

Oksit malzemeler yıllardır uygulamalı ve temel araştırmaların odak noktası olmuştur. Oksitler, kimyasal inertlikleri, mükemmel sıcaklık stabiliteleri, yüksek elektriksel dirençleri ve mekanik sertlikleri nedeniyle güçlü ve dayanıklı malzemeler olarak yaygındır. Birçok metal yüzeyinde kendiliğinden gelişen doğal oksitlerin korozyona ve çevresel etkilere karşı etkili ve ucuz koruma katmanları olarak kullanıldığı malzeme bilimlerinde çok önemli bir rol oynarlar. Transistörün icadıyla oksitler mikro elektronik alanında devrim yarattı. Elektronik cihazların küçültülmesine yönelik devam eden çabalarda, üstün dielektrik özelliklere sahip yeni oksit malzemeler için yoğun bir araştırma yapılmaktadır. Ayrıca oksitler güneş hücrelerinin, süper iletken elemanların, kimyasal sensörlerin, veri depolama cihazlarının ve foto aktif malzemelerin temel parçalarıdır. Oksitlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri beklenmedik bir derinlik ve çeşitlilik gösterir. Bu nedenle temel bilimler bağlamında oldukça ilgi çekmektedir. Oksitlerin özelliklerini açıklığa kavuşturmak için bir dizi olağanüstü değerlendirme yapılmaktadır. Oksit numuneleri üzerinde yapılan araştırmalar, zengin faz diyagramlarını, karmaşık optik, elektriksel ve manyetik özellikleri ve farklı kristal oluşumlarını ortaya çıkarmıştır. Oksitler inorganik malzemeler alanında çok çeşitli işlevlere sahiptir. Oksitlerin epitaksiyel ince filmler olarak büyütülmesi, temel özellikleri ve belirgin pratik değerleri konusundaki meraktan dolayı büyük ilgi görmüştür [1, 2].

Metal oksitler iletken, yarıiletken ve yalıtkan nitelikler de dahil olmak üzere geniş bir elektriksel özellikler yelpazesi sergilemektedir. Stokiyometriyi, katkıyı, morfolojileri ve elektronik özellikleri özelleştirmek mümkündür. Metal oksitler elektriksel ve termal iletkenliklerinden dolayı çeşitli kullanımlara sahiptir. Metal oksit teknolojisinin yaygınlaşmasının bir diğer önemli faydası da doğadaki bolluğudur [3]. Nanoyapılı metal oksit filmlerin kullanılabileceği geniş uygulama yelpazesi, zaman içinde bunların imalatına ilgi uyandırmıştır. Termoelektrik cihazlarda, optoelektronik cihazlarda, lazer malzemelerinde, güneş hücrelerinde, yarıiletken kablolarda ve radyasyon dedektörlerinde kullanılırlar. Bu nedenle oksit malzemeler optoelektronik cihazlar için uygun bir alternatiftir [4].

Son zamanlarda en kapsamlı araştırılan güncel çalışma alanlarından biri, mikro ve nano yapılı optoelektronik malzeme sektörünün temelini oluşturan ve hem teknik hem de bilimsel

araştırmalarda önem taşıyan ince filmlerdir. İnce filmler, çeşitli üretim prosedürleri kullanılarak oluşturulan, genellikle kalınlığı 1 μm'den az olan malzemelerdir. Kaplanacak maddenin atomları veya molekülleri, filmin gelişimini destekleyen ve yardımcı olan bir alttaş üzerinde düzenlenir. İnce film formatındaki nanokristalin malzemeler sayesinde malzemelerin ve bu malzemelerden oluşan araçların temel mekanik, optik ve elektriksel özellikleri son derece yüksek oranlarda büyük ölçüde artırılabilir [5]. İletişim sistemleri, kişisel bilgisayarlar ve donanımlar da dahil olmak üzere insanlar tarafından kullanılan elektronik ekipmanların büyük bir kısmı, günümüz teknolojik gelişmelerin temel ve belirleyici bileşenlerinden biri olan ince film teknolojisini kullanmaktadır. Farklı nitelikleri nedeniyle ince filmler çeşitli teknolojik uygulamalarda farklı amaçlar için kullanılmaktadır. İnce filmlerin, elektriksel özellikleri nedeniyle yarıiletken/süper iletken cihazlarda, optik disklerde, sensörlerde, yalıtım ve iletken kaplamalarda, devre elemanı yapımında, yansıtıcı ve yansıtıcı olmayan kaplamalarda, girişim filtrelerinde ve diğer birçok alanda uygulama alanı bulunmaktadır [6].

Son zamanlarda ince film malzemelerinin hızlı gelişimi, yeni malzemelerin, süreçlerin ve teknolojilerin yapılması için yeni yollar açmaktadır. Sonuç olarak, bu disiplini ilerletmek ve ince film yapısı ve çeşitli uygulamalardaki performansla bağlantılı temel fiziksel ve kimyasal özelliklerin önceden anlaşılmış yönlerini geliştirmek amacıyla çok sayıda araştırma yapılmış ve model sistemler oluşturulmuştur [7]. Bu sistemlerde püskürtme tekniği ile uygulanan ince film kaplamalar önemli bir rol oynamaktadır. Geçtiğimiz on yılda magnetron püskürtmenin hızlı bir gelişimi görülmüştür ve bu da onu endüstri için çok çeşitli önemli kaplamaların biriktirilmesinde tercih edilen yöntem haline getirmiştir. Bu ilerleme, yüksek kaliteli fonksiyonel filmlere yönelik çok çeşitli sektörlerinde artan ihtiyaçtan kaynaklanmıştır. Günümüzde magnetron püskürtmeli filmler, diğer yüzey kaplama teknikleri ile yapılan oldukça kalın filmlerle aynı işlevselliği sağlayabilir ve sıklıkla diğer fiziksel buhar biriktirme (PVD) teknolojileri ile oluşturulan filmleri geride bırakabilir. Magnetron püskürtme bu nedenle artık dekoratif kaplamalar, düşük sürtünmeli kaplamalar, korozyona dayanıklı kaplamalar, sert, aşınmaya dirençli kaplamalar ve belirli optik veya elektriksel özelliklere sahip kaplamalar gibi çeşitli uygulama alanları üzerinde büyük bir etkiye sahiptir [8].

Periyodik cetvelde IIA grubundan magnezyum (Mg) ve VIA grubundan oksijen (O) elementleri birleşerek bir yüzey merkezli kübik kristal olan magnezyum oksit (MgO) oluşturur. Magnezyum oksitteki iyonlar güçlü elektrostatik kuvvetlere ve yüksek bağlanma

kuvvetlerine sahip olduğundan MgO kristali iyonik bir kristaldir. Bu metal oksit malzeme geniş bir bant aralığına olan, görünür spektrumda yaklaşık %90'lık güçlü optik geçirgenliğe, düşük elektrik iletkenliğine, yüksek erime noktasına ve sertliğe sahiptir [9-13]. Mükemmel elektriksel direnç, kimyasal inertlik, düşük elektron ilgisi, düşük ısı iletkenliği, mükemmel optik şeffaflık, güçlü ısı direnci ve mekanik dayanıklılık sayısız özelliklerinden sadece birkaçıdır [5, 7]. Magnezyum oksitin (MgO) antibakteriyel, antimikrobiyal ve fotokatalitik nitelikleri, toksik olmaması ve kimyasal ve fiziksel stabilitesi nedeniyle sıklıkla kullanılmaktadır. MgO, optik, elektronik özellikleri nedeniyle dayanıklı ve yüksek sıcaklığa dayanıklı yalıtım malzemeleri, elektrolüminesans, plazma ve floresan gösterge panelleri, ısıya dayanıklı cam kompozitler, fotovoltaik cihazlar, kapasitörler, gaz sensörü ve soğurucu malzeme uygulamalarında kullanılan iyi bilinen bir malzemedir [12, 14].

MgO ince film çalışmalarında sıralı iyonik katman absorpsiyon reaksiyonu (SILAR) yöntemi, lazer buharlaştırma yöntemi, elektron ışını buharlaştırma yöntemi, iyon ışını destekli biriktirme, ark biriktirme, püskürtme ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) gibi birçok teknik kullanılmıştır. Literatür araştırmalarında özellikle MgO ince film kaplama parametreleri, yapısal ve optik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir [9, 12]. MgO gibi dielektrik ince filmler kapasitörlerde, transistörlerde yalıtkan arayüzey tabaka olarak kullanılır. Bundan dolayı MgO ince film üretimi yaygınlaşmıştır.

Bu tez çalışmasında, MgO ince filmlerin yapısal, optik ve elektriksel özellikleri incelenmesi amaçlandı. Bu çalışmada RF magnetron püskürtme tekniği kullanarak 100 nm kalınlıkta MgO ince filmler büyütülerek yapısal, morfolojik ve optik özelliklerini incelendi. Yapılan çalışmalara ek olarak MOS yapıları da elde edildi. Bu yapıların dielektriksel özellikleri incelendi.

Bu tez çalışmasının MgO ince film numuneleri Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde Nanovak NVTS-500 eş-püskürtme sistemi kullanılarak yapılmıştır. XRD, FTIR, UV-Vis spektrometre, AFM, I-V ve C-V ölçüm sistemleri kullanılarak malzemelerin yapısal, optik, morfolojik ve elektriksel özellikleri araştırıldı.

Bu tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır ve şu düzende sunulmaktadır: Birinci bölümde, tez çalışmasına giriş yapılarak genel bilgiler verildi. İkinci bölümde MgO hakkında genel bilgiler ve kullanım alanlarından bahsedildi ve MgO ince filmlerin üretim teknikleri

hakkında bilgiler sunuldu. Üçüncü bölümde, elektriksel parametrelerinin belirlenmesi hakkında genel bilgiler anlatıldı, dördüncü bölümde, tez çalışmasında kullanılan yöntemler, karakterizasyon sistemleri ve fabrikasyon sistemleri tanıtıldı. Beşinci bölümde, XRD, optik, morfolojik analizi ve elektriksel karakterizasyonları sonuçları sunularak, altıncı bölümde, tez çalışmasında elde edilen sonuçlar değerlendirildi.

2. MAGNEZYUM OKSİT

Magnezyum oksit (MgO), doğal olarak oluşan minerallerin öğütülmesiyle oluşturulan kübik kristalli bir maddedir. Yüksek erime noktasına, zayıf elektrik iletkenliğine ve yüksek sertliğe sahiptir [9-11]. MgO, yüksek çalışma sıcaklıklarına dayanıklı, sürdürülebilir ve ekolojik açıdan olumlu niteliklere sahip bir malzeme olduğundan ince film teknolojisinde önemli bir rol oynamaktadır.

2.1. Magnezyum Oksit'in Yapısı ve Özellikleri

Magnezyum Oksit (MgO), IIA grubundaki magnezyum (Mg) elementi ve VIA grubundaki Oksijen (O) elementinden oluşmaktadır. Magnezyum oksit yapısında her bir O+ iyonu, altı Mg+ iyonu ile ve her bir Mg^{+} iyonu, altı O^{+} iyonu ile çevrilidir. Mg ve O iyonların iyonik bağlamasıyla oluşur. 0,41–0,73 Å aralığında yarıçap oranına sahiptir. Magnezyum oksitin fiziksel, optik ve dielektrik özellikleri Çizelge 2.1'de gösterilmektedir [9].

Çizelge 2.1. Magnezyum oksitin özellikleri [9]

Özellikler	Parametreler	Değerler
Fiziksel	Kristal sistemi	Kübik
	Örgü sabiti (Å)	4,213
	Yoğunluk (g/cm^3) (İnce film)	3,585
	Erime noktası (°C)	2800
	Kaynama noktası (°C)	3600
	Termal genleşme katsayısı (K^{-1})	$12,8 \times 10^{-6}$
	275 K'de termal iletkenlik ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)	42
Optik	Optik iletim (%)	>90, >98
	İletim aralığı (μm)	0,3–6
	Optik bant aralığı (eV)	~7,2
	Yansıma kaybı %	12,8
	Kırılma indisi (n_d)	1,739
Dielektrik	İkincil elektron emisyon katsayısı	0,16
	Dielektrik sabiti	9,8

Yüksek bağ kuvveti ve iyonlar arasındaki güçlü elektrostatik kuvvetlerden dolayı MgO iyonik kristaldir. Magnezyum oksit, sertlik, yüksek erime noktası ve düşük elektrik iletkenliğe sahiptir [9]. Magnezyum oksit (MgO), örgü sabiti a = b = c = 4.217 Å olan yüzey

merkezli kübik bir kristaldir. Görünür bölgede yaklaşık %90 yüksek iletim değerine sahiptir [10, 11].

Magnezyum oksit (MgO), yaklaşık 3,5-7 eV geniş bant aralığında, doğrudan geçiş bant aralığına sahip metal-oksit bir malzemedir [12, 13]. Magnezyum oksit (MgO), yüksek elektrik direnci, kimyasal inertlik, düşük elektron ilgisi, düşük termal iletkenlik, yüksek optik şeffaflığa, iyi ısı direnci ve mekanik dayanıklılık gibi birçok özelliğe sahip bir malzemedir [12, 14]. Magnezyum oksit NaCl'ün kristal yapısına sahip, yüksek yalıtıcı bir kristaldir. CaO ve ZnO gibi MgO, birçok toksik kimyasallar için oldukça verimli ve aktif emici özelliği göstermektedir [15]. MgO fiziksel ve kimyasal denge ile oluşan nemi soğurduğunda Mg(OH) oluşur. MgO su moleküllerinin yüzey ve hidrojen ile etkileşimlerini maksimum seviyeye getirecek kafes parametrelerine sahiptir. Böylece tek kristal MgO absorbe etmesi sonucu termodinamik açısından kararlılığa sahip olduğu göstermiştir. MgO'nun hidrasyonu, ikincil elektron yayılım katsayısını düşürerek deşarj voltajını arttırır [16].

MgO malzemesinin toksik olmaması, kimyasal ve fiziksel kararlılığından dolayı antibakteriyel, antimikrobiyal ve foto katalitik gibi özelliklerde kullanılabilmesine olanak sağlar. Magnezyum oksit optik, elektriksel, manyetik, termal, mekanik ve kimyasal özellikleri bulunur. Ek olarak, birçok uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Bunlar, gaz sensörleri, fotovoltaik cihazlar, ısıya dayanıklı cam kompozitler, elektrolüminesans, plazma ve floresans ekran panelleri ve ısıya dayanıklı ve yüksek sıcaklığa dayanıklı yalıtım malzemeleri gibi uygulamalar için tercih edilen malzemelerdir [10, 17]. MgO, boya ve ağır metaller için soğurucu malzeme olarak kullanılmaktadır [18].

2.2. MgO'nun Kullanım Alanları

MgO ince filmler elektronik alanında kullanılmaktadır. MgO ince filmleri, yüksek sıcaklıklı süper iletkenlerin ve peroksit tipi ferroelektrik filmlerin biriktirilmesi dolgu tabaka olarak kullanılmaktadır. Plazma gösterge panellerinde deşarj gerilimini azaltmak için ikincil elektron emisyon verimi yüksek olan MgO filmler tercih edilmektedir. Isıya dayanıklı olmasından dolayı, sıvı kristal ekranlar, elektron yayıcı, iyonize kütle spektrometreleri ve floresan ekran tüplerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [12]. Magnezyum oksit, kondansatör uygulamaları için mevcut dielektrik malzeme olarak kullanılmaktadır. MgO

ince filmler geniş bant aralığı, yüksek şeffaflık ve düşük kırılma indeksine sahip optik özelliklerine sahiptir. Bundan dolayı optoelektronik uygulamalarda kullanılmaktadır. Böylece optik ve elektronik alanlarda önemli yere sahiptir [14].

Oksitler genellikle, radyo frekansı aralığında uygulama alanlarında ilgi çekici olmuştur. Magnezyum oksit, yüksek dielektrik sabitine sahip olduğu için mikrodalga entegre devreler uygulamalarında ve alttaş olarak kullanılmaktadır [19].

2.3. Magnezyum Oksit İnce Filmlerin Üretim Teknikleri

Magnezyum oksit ince filmlerin üretim tekniklerinde buhar fazda büyütme tekniği olan kimyasal buhar biriktirme (CVD), fiziksel buhar biriktirme (PVD) tekniği, lazer buharlaştırma yöntemi, elektron demeti ile buharlaştırma yöntemi, iyon ışın destekli biriktirme yöntemi, ark yöntemi ile biriktirme ve püskürtme yöntemleri kullanılmaktadır.

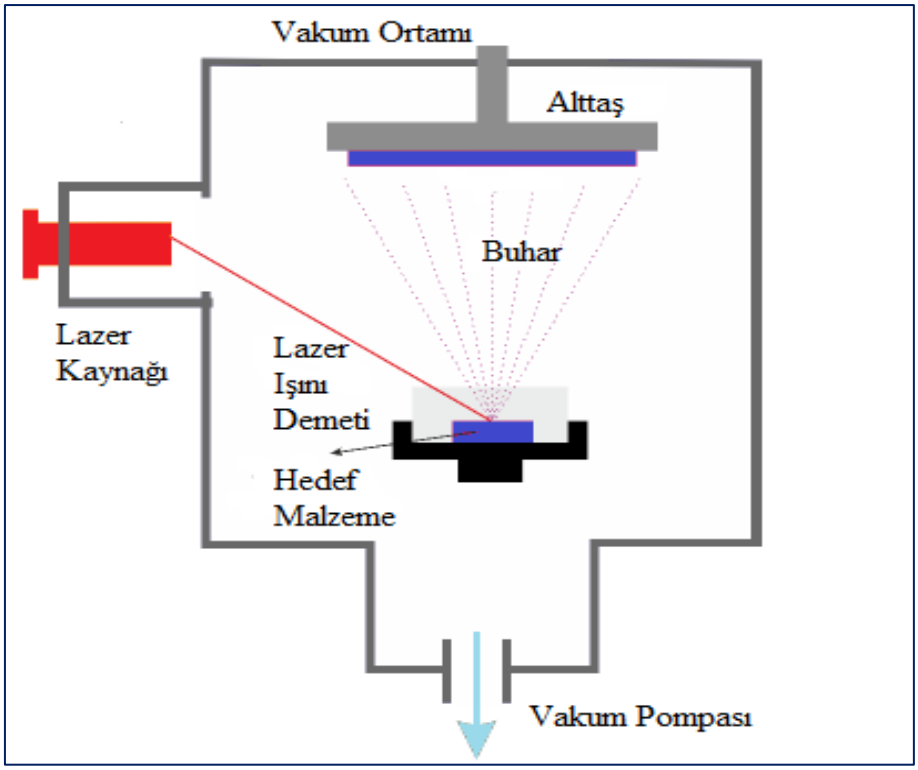
2.3.1. Fiziksel buhar biriktirme tekniği

Fiziksel buharlaştırma tekniğinde ortam vakum altında olmalıdır. Sistemde vakum sistemi, ısıtıcı, hedef malzeme, kaplanacak olan alttaş vardır. Vakum ortamında hedef malzeme buharlaşır ve yüksek enerji ile oluşan iyonlar ortamdaki reaktif gazlar ile plazma oluşturur. Bu hedef malzemeden buharlaşarak kopan atomlar kontrollü olarak kaplanacak alttaş üzerine birikme meydana getirir [20]. Fiziksel buhar biriktirme tekniğinde düşük sıcaklıkta taban malzeme ile yüksek oranda refrakter malzeme kaplama işlemi yapılmaktadır. Yüksek enerjili iyon bombardımanı sonucu iç gerilmede artış oluşmaktadır. Böylece refrakter malzemelerin kaplanmasında ideal bir tekniktir [21].

Bu sistemde yüksek ya da ultra yüksek vakum tercih edilmektedir. Buhar ile birikmede malzemelerin farklı şekillerde buharlaştırma işlemleri yapılır. Bu işlemde soygaz olan argon gazı kullanılır. Soygaz kullanılmasının nedeni oksidasyon, kirlenme ve diğer kimyasallar ile etkileşime girmemesi için soy gaz tercih edilmektedir [22].

2.3.2. Lazer buharlaştırma yöntemi

Bu yöntemde Nd: YAG lazer çeşiti kullanılmaktadır. Kaplama işlemi vakum ortamında olmaktadır. Buharlaştırılacak hedef malzemeni üzerine lazer yönlendirilir. Malzeme ile lazer etkileşirerek malzeme buharlaşır. Bu oluşan buhar kaplama yapılmak istenen alttaş üzerine gönderilir [22]. Kullanılan lazerin dalgaboyu malzemenin ışınım soğurma karakteristiğine göre belirlenir. Yüksek erime sıcaklığına sahip metaller lazer ışınını soğurarak buharlaşır [20]. Bu malzemeler hızlı ve verimli bir şekilde buharlaşarak düşük enerji de harcarlar. Şekil 2.1'de lazer buharlaştırma yöntemi şeması gösterilmektedir.

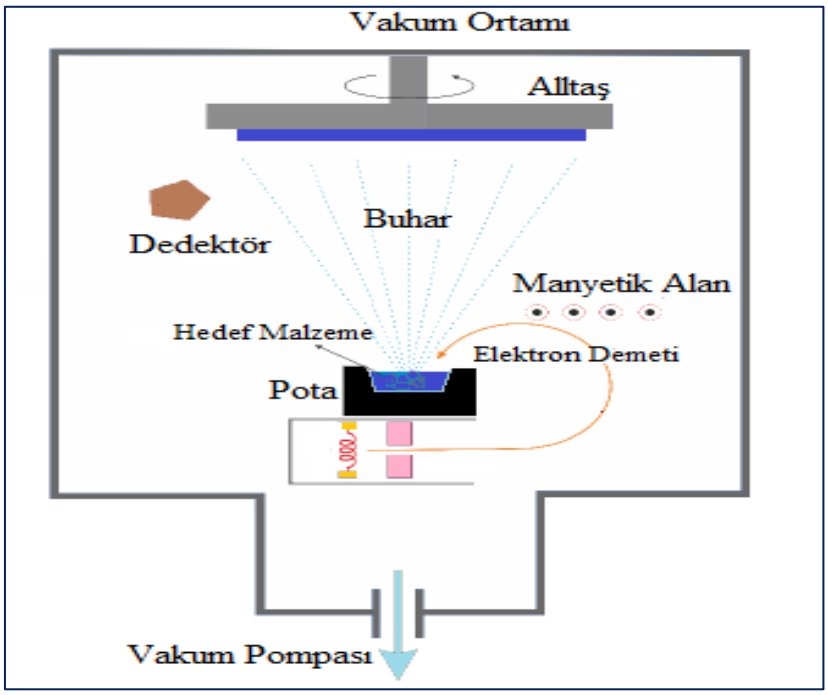


Şekil 2.1. Lazer buharlaştırma yöntemi şeması [22]

2.3.3. Elektron demeti ile buharlaştırma yöntemi

Hedef malzeme elektron ışınlarının etkisi altında buharlaştığında, elektron demeti buharlaştırma işleminde ince filmler oluşturulur. Yüksek vakum ya da ultra yüksek vakum ortamında gerçekleşir. Filaman ip elektron tabancası kullanılan elektron kaynağından çıkan elektronlar manyetik alan içerisinde yönlendirilerek hedef malzemenin yüzeyine gönderilir (Şekil 2.2). Yüzeye gönderilerilen elektronlar enerjilerini bu malzeme yüzeyine bırakır.

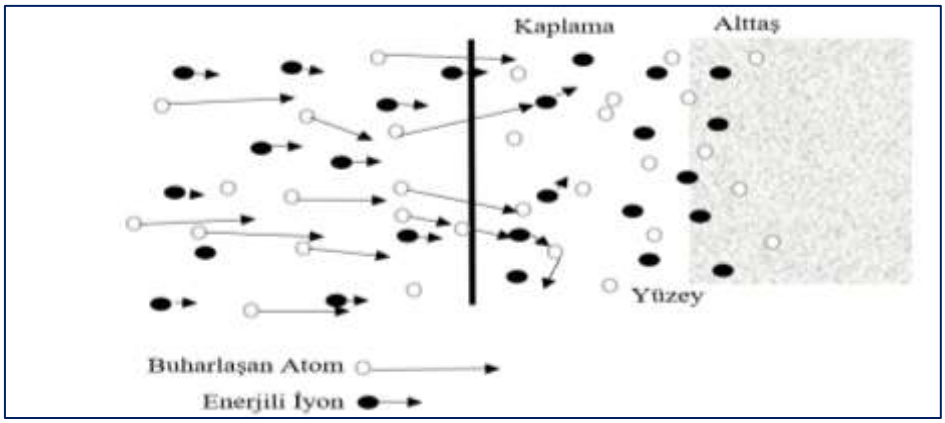
Bunun sonucunda hem yüzeyin sıcaklığını artar, hem de malzemenin yüzeyi aşınarak parçaçıklar oluşur. Bu işlemde yüzey sıcaklığı 3000-3500°C ye kadar çıkabilmektedir. Vakum ortamı ile malzemelerin reaksiyona girmeyecek soy gaz verilmektedir [22].



Şekil 2.2. Elektron demeti ile buharlaştırma yöntemi [23]

2.3.4. İyon ışın destekli biriktirme yöntemi

İyon ışın destekli biriktirme işleminde, vakum ortamında alttaş üzerinde bellirli bir enerjiye sahip iyonların yönlendirilmesiyle oluşan ışın ile bombardımanı sonucu ince film biriktirme meydana gelmektedir [22, 24]. Bu yöntemede iyon ışını arttıkça filmin dış katmanı ile etkileşir. Böylece Şekil 2.3'de gösterildiği gibi filme nufüz eder.



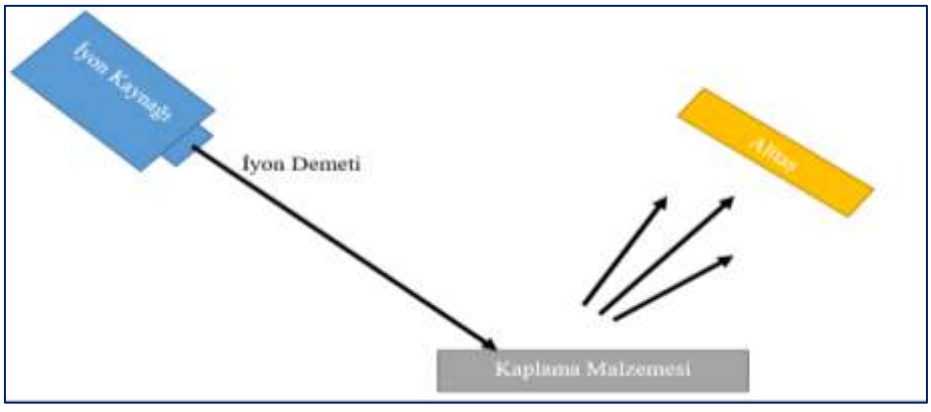
Şekil 2.3. İyon ışın destekli biriktirme

İyon ışını ile elde edilen filmler iki mekanizma yoluyla elde edilir.

1. Filmde enerji biriktirerek
2. Filmde oluşan buharın birirken atomlar ile reaksiyona girmesiyle

Buharlaşan atomlar ve 100 eV'den birkaç keV'ye kadar olan düşük enerjili iyonlar alttaş yüzeyine gelir. Düşük enerjili parçacıklar atomik katmana nufüz eder. İyon ışın destekli biriktirme ile elde edilen filmler birkaç mikron kalınlığa kadar büyütülebilmektedir.

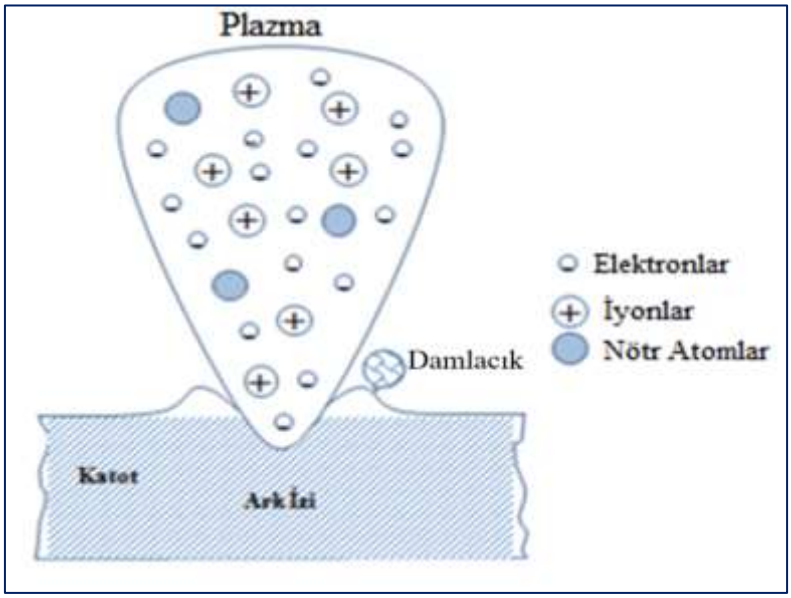
İyon ışın destekli biriktirme sistemdeki buhar, elektron ışınlı buharlaştırma sistemi tarafından oluşmaktadır (Şekil 2.4). Düşük enerjili, geniş ışınlı bir iyon kaynağı tarafından ise düşük enerjili iyon ışınını üretilmektedir. Bu sistemde geometrik düzenleme, dönme mekanizması, numune tutucu yer almaktadır. Üretim işleminde reaktif gaz kullanılmaktadır [24].



Şekil 2.4. İyon demeti ile biriktirtme yöntemi şeması [20]

2.3.5. Ark yöntemi ile biriktirme

Ark yöntemi ile biriktirme sistemi katod ve anottan oluşmaktadır. Üretimin başlangıcında düşük Ar basıncı uygulanmaktadır. Hedef malzeme ark tekniği kullanılarak buharlaştırılır ve iyonize edilir. Bir vakum odasındaki katot buharlaştırılacak hedef malzemedir, anot ise kaplanacak alt tabakadır. Bu prosedür sırasında katot üzerinde düşük voltaj (10–40 V) ve yüksek akım (30–300 A) "ark" oluşur. Katot yüzeyinde bir ark oluştuğunda sıcaklık son derece yüksek seviyelere (yaklaşık 2500°C) yükselir. Böylece erime ve buharlaşmalara meydana gelir. Yüksek iyonizasyon miktarları, kaplama biriktirme oranları ve düşük alt tabaka sıcaklıklarında bile güçlü yapışma, katodik ark biriktirme işleminin faydalarıdır. Şekil 2.5'de Ark yöntemi ile biriktirme işlemi gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Ark yöntemi ile biriktirme [20, 25]

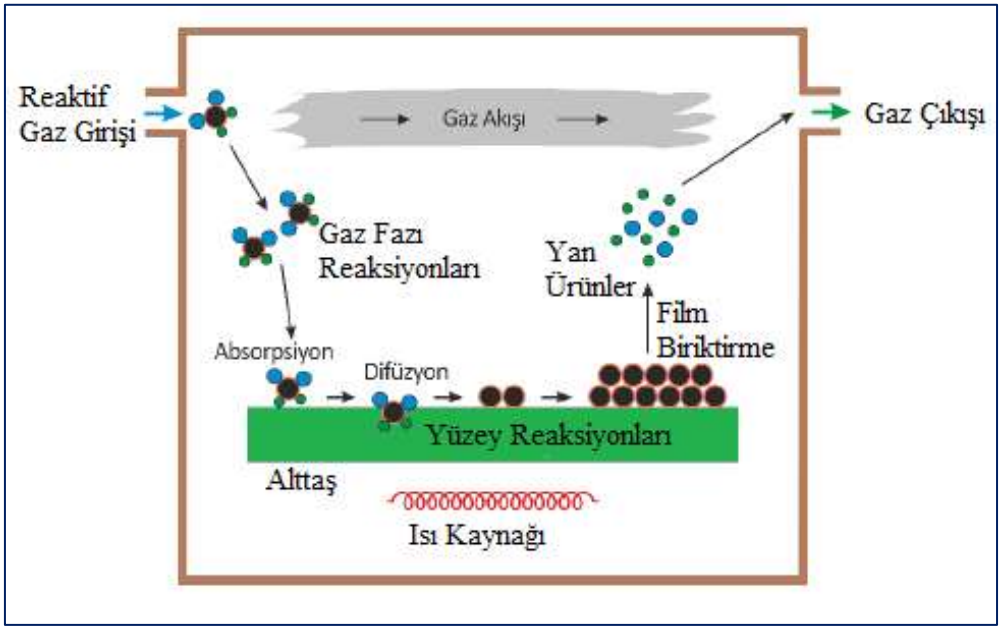
2.3.6. Kimyasal buhar biriktirme tekniği

Kimyasal buhar biriktirme (CVD) tekniği yaygın olarak kullanılmaktadır. İnce film kaplamalarında, dökme malzeme üretiminde, kompozit malzemelerin üretimi gibi birçok uygulama alanlarında kullanılmaktadır.

Kimyasal buhar biriktirmede, kaplanacak alttaşı içeren kapalı bir hazne ve bu haznenin içine gaz girişi sağlanır. Kaplanacak malzeme belirli sıcaklıklar verilerek malzemenin yüzeyinde

kimyasal reaksiyon meydana gelir. İşlem yüksek sıcaklıkta gerçekleşir. Böylece yüzeyde ince film birikmesi meydana gelir. Aynı zamanda reaksiyona girmemiş gazlarla birlikte ortamdan kimyasal yan ürünler dışarı atılır. Bu da ince film üretimine eşlik eder. Alt tabaka sıcaklığı, reaksiyon gazın bileşimi, toplam basınçlı gaz akışı ve deney koşulları gibi değişiklikler ile farklı özellikler gösteren birçok malzeme üretilebilir. CVD'nin birçok çeşidi vardır. Tipik olarak 200-1600°C arasındaki sıcaklıklarda biriktirme yapar. CVD biriktirme tekniği, Atmosferik Basınçlı Kimyasal Buhar Biriktirme (APCVD), Alçak Basınçlı Kimyasal Buhar Biriktirme (LPCVD), Metal-Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD), Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme (PECVD), Lazer Kimyasal Buhar Biriktirme (LCVD) türleri vardır. En yaygın olarak metal-organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) ve daha az yaygın olarak organo-metalik kimyasal buhar biriktirme (OMCVD) çeşiti kullanılmaktadır. CVD teknikle çeşitli malzemelerin ve çok yüksek saflıkta biriktirme işlemi yapılmaktadır [26, 27].

Kimyasal buhar biriktirme (CVD) işlemi, belli bir sıcaklıkta ısıtılmış bir alttaşın üzerine kimyasal bileşenlerin buhar fazında reaksiyona girmesiyle alttaşın yüzeyine biriktirme tekniğidir. Şekil 2.6'da Kimyasal buhar biriktirme (CVD) tekniği gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Kimyasal buhar biriktirme (CVD) tekniği [22]

Tek kristalli metal oksitlerin, özellikle ferritlerin, garnetlerin, safirin, MgO'nun gibi hazırlanmasında genellikle CVD tekniği uygulanmaktadır. Bir çalışmada, safir alttaş üzerine

metal-organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) yöntemi ile MgO kaplayarak ince filmler elde etmişlerdir [28]. Aynı yöntem ile GaAs alttaş üzerine MgO ince filmler elde etmişlerdir [29].

Plazma ile güçlendirilmiş metal-organik kimyasal buhar biriktirme (PEMOCVD) işlemi gazının elektron etkisiyle ayrışmasına dayanmaktadır. İki elektrot arasında düşük basınç oluşur. Pozitif iyonlar ve radikaller alt tabakaya sırasıyla yönelir ve difüzyon yoluyla ulaşır. Biriktirme sırasında yüzey reaksiyonları meydana gelir. Bazı çalışmalar, PEMOCVD yöntemi kullanarak epitaksiyel MgO katmanlarını büyütmek için kullanılmıştır [9, 30].

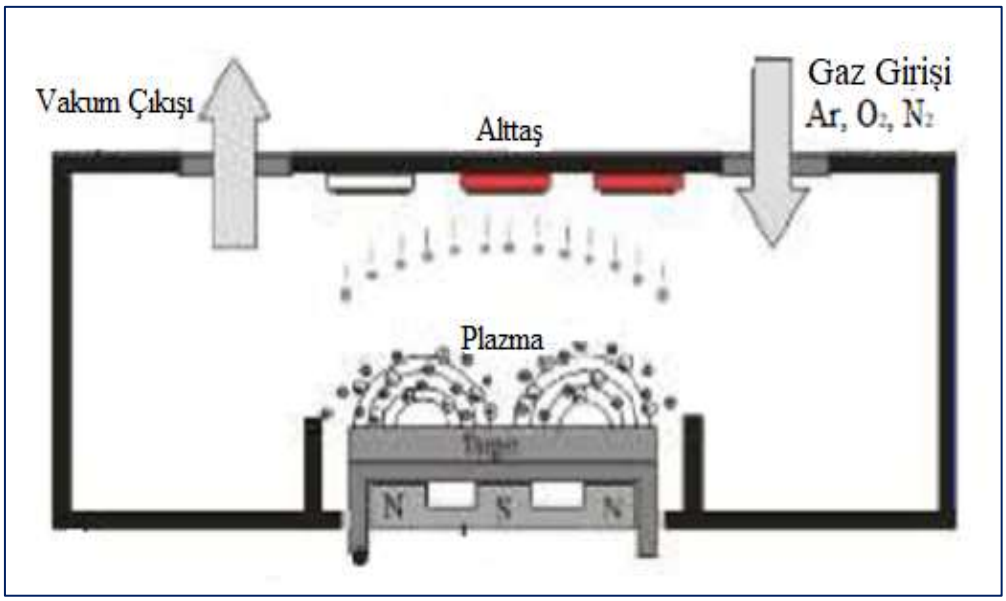
Atomik basınçlı metal-organik kimyasal buhar biriktirme (APMOCVD) yönteminde vakum sistemine ihtiyaç duymaz. Kaynak malzemenin gerekli ürün için belirtilen gazla reaksiyona girmesi sonucu büyütme gerçekleşir. Zeng ve vd. metal-organik kaynak olarak magnezyum asetilasetonat kullanarak APMOCVD ile Si alttaşlar üzerine magnezyum oksit ince filmler hazırladılar [31].

Sıvı darbeli enjeksiyon metal-organik kimyasal buhar biriktirme (LPIMOCVD) yönteminde ise ani buharlaşma meydana geldiği bir buharlaşma odasına mikro miktardaki öncül çözeltinin sıralı enjeksiyonuna dayanmaktadır. Buharlaştırma sistemi ve sıcak duvarlı reaktör atmosferik veya atmosfer altı basınçta çalışmalıdır. Manin ve vd. tek moleküler kaynaklı magnezyumdan LPIMOCVD yöntemini kullanarak MgO ince film üretti [9, 32].

2.3.7. Püskürtme tekniği

Püskürtme tekniği son yıllarda hızlıca gelişip ve birçok alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Püskürtme tekniği fiziksel buhar biriktirme tekniklerinden biridir. Püskürme tekniği, fiziksel buhar biriktirme teknikleri arasında kaplamalarda daha iyi performans gösteren ve üretilen filmlerde çok iyi işlev göstermeyi sağlayan kaplama tekniğidir. Püskürtme tekniği ile daha sert, dayanıklı kaplamalar ve optik veya elektriksel özelliklere sahip kaplamalar üretilir. Çok çeşitli malzemelerden yüksek kaliteli ve iyi yapışmış film elde edilir. Böylece birçok uygulama alanlarında önemli bir etki göstermektedir [33].

Püskürtme tekniği ile biriktirme işlemi, yüzeyden püskürtülen atomların bir numune üzerine birikmesidir. Püskürtme sisteminin hedef (katot) ve alttaş (anot) bulunmaktadır. Püskürtme işleminin temelinde biriktirme işlemi yapılmadan önce sistem vakum taban basıncına kadar pompalanır. 0,5-12 Pa arasında ortam argon gazı verilir. Ortamda $Ar^{\pm}$ iyonu bulunur. Böylece plazmanın ateşlenmesi sağlanır ve ortamda plazma meydana gelir. Bu plazmadan çıkan gaz iyonları, biriktirme yapmak istediğimiz hedef malzemeye doğru hızlandırılır. Hedef malzemeden püskürtülür. Kaplama yapmak istediğimiz alttaş üzerine biriktirme işlemi yapılır. Şekil 2.7'de püskürtme tekniğini temel prensibi gösterilmektedir.



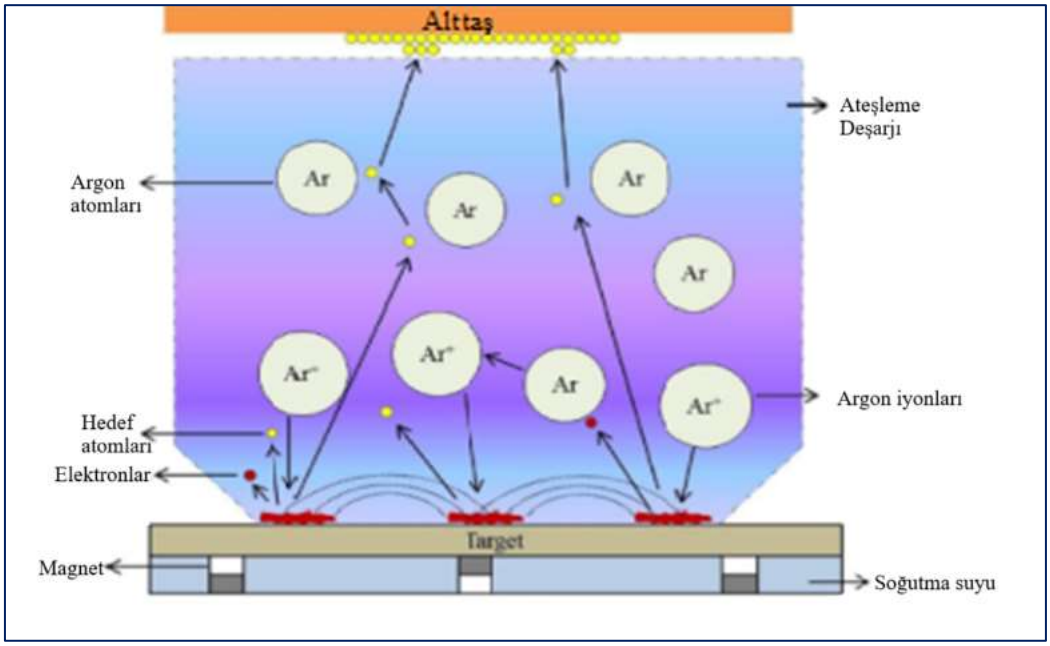
Şekil 2.7. Püskürtme tekniğin temel prensibi [34, 35]

RF püskürtme tekniği

Bu sisteme RF güç kaynağı kullanılmaktadır. RF püskürtme sürecinde enerjiye inert gaz iyonları (Ar+) hedef malzemeyi bombardıman eder (Şekil 2.8). Hedef malzeme ile vakum ortamında verilen gaz arasındaki kimyasal reaksiyonla oluşturulur. Bu Ar^{+} iyonları hedef malzeme çarpar ve hedef malzemeden sıçratma olarak uzaklaştırarak bir alttaş üzerine yönlendirilir. RF püskürtme sistemlerinde sürecin verimliliğini artıran stabil yüksek yoğunluklu plazma oluşmaktadır.

RF püskürtme sisteminde alternatif elektrik alanı (RF frekansı) kullanımından dolayı iletken olmayan hedeflerin kullanımı ve şarj etkileri gibi birçok avantajlara sahiptir [36]. Bazı

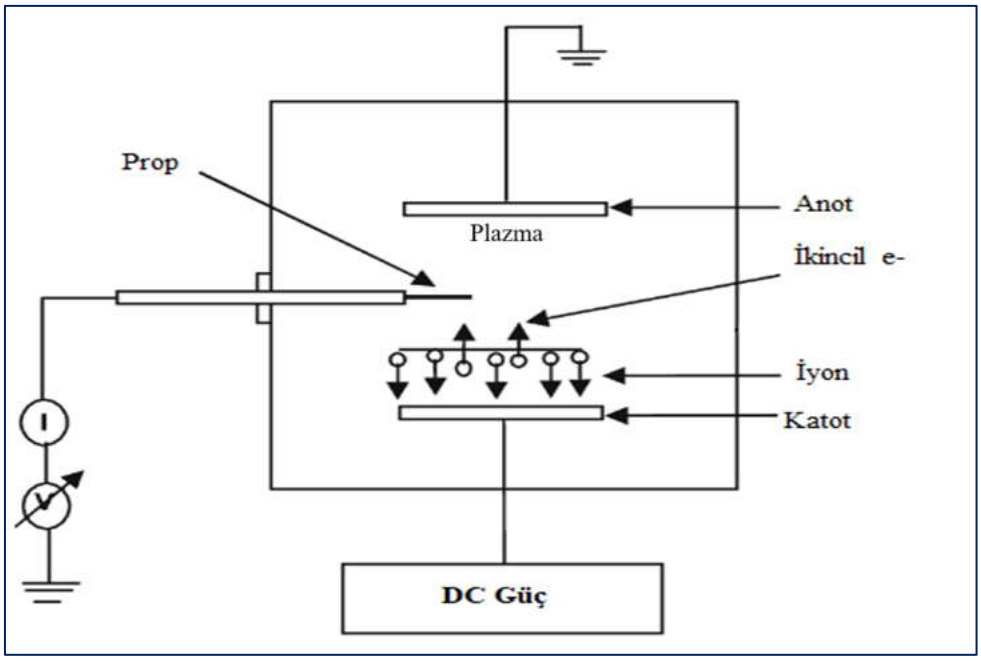
araştırmacılar RF püskürtme sistemini kullanarak farklı kaplama parametrelerde MgO ince filmler üretildiği belirtilmektedir. p-tipi Si alttaş üzerine MgO büyülterek ve filmin yoğunluğunun çeşitli parametreler üzerindeki etkisini incelediler [14, 16, 37]. RF püskürtme sistemi ile MgO ince filmlerini elde etmek önemli bir gelişme olduğu araştırma grupları tarafından rapor edilmiştir [9].



Şekil 2.8. Püskürtme sisteminin temel bileşenlerini gösteren şematik [36]

DC püskürtme tekniği

Doğru akım püskürtme tekniğinde Şekil 2.9'da gösterildiği gibi hedef ve alttaşların bulunduğu katot ve anot elektrot bulunmaktadır. Ortam vakum altına alınır. İlk önce sistemin taban basıncı 10^{-6} mTorr'a ayarlanır. Çalışma basıncı 10^{-3} ile 10^{-2} mbar ulaştırılır. Güç kaynağı olarak DC güç kaynağı kullanılmaktadır. Hedef ile alttaş arasına DC gerilim uygulayarak plazma ortamın oluşması sağlanır. Ortama argon gazı verilerek argon iyonları oluşur. Bu iyonlar hedef malzemeden atomların koparılır. Bu kopan parçalar kaplanacak alttaş üzerine yönlendirerek kaplama oluşturulur. DC püskürtme tekniği iletken hedef malzemeleri üzerinden malzeme kopartılarak alttaş üzerinde kaplamalar yapılmaktadır [38, 39].



Şekil 2.9. DC püskürtme tekniği şeması [40]

Bu püskürtme tekniğinde, püskürtme için iyon kaynağı, iki elektrot arasına uygulanan elektrik alanı nedeniyle akkor deşarj sağlanır. Minimum voltaja ulaşıldığında gaz elektriği iletmek üzere parçalanır. Böylece iyonlar ve elektronlar hızlanır. Enerjik iyonlar, püskürtmeyi oluşturmak ve ikincil elektronları yaymak için katoda çarpar. Darbeli DC magnetron püskürtme tekniği ile ark enerjisini azaltarak MgO biriktirme için daha uygun ve kararlı işlemlerin olduğu görünmektedir. Bu yöntem ile MgO ince filmler üretmişlerdir [9, 41, 42].

3. METAL-YARIİLETKEN KONTAKLAR

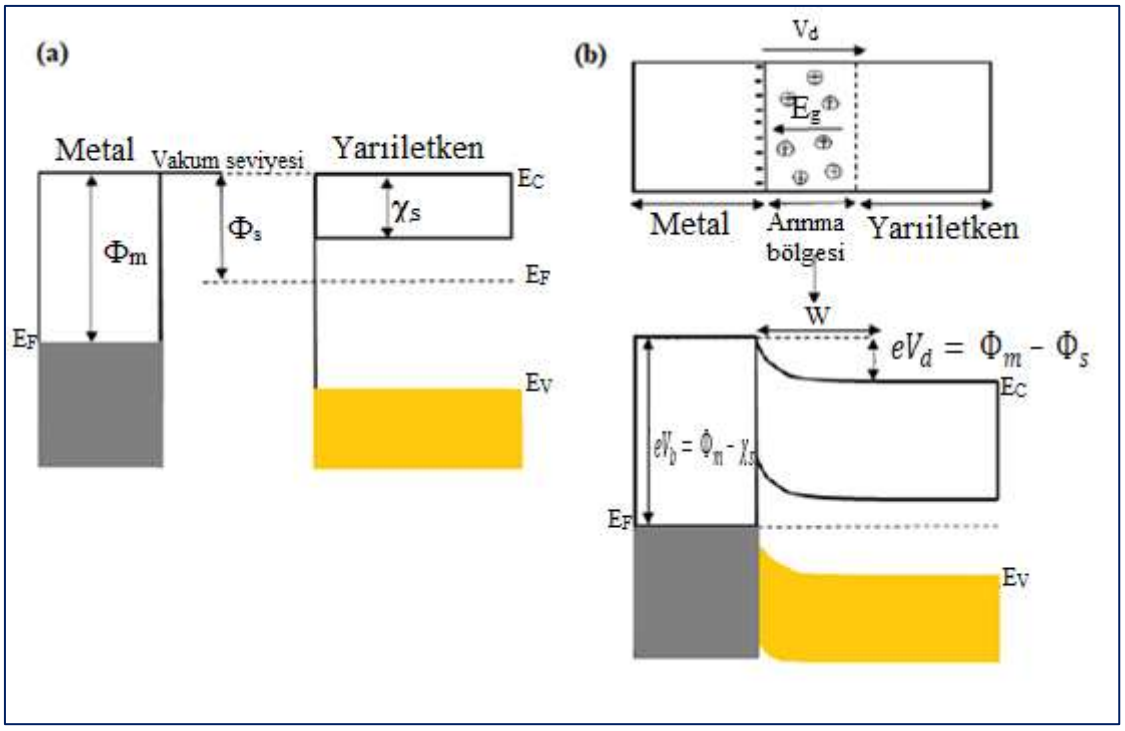
Metal-yarıiletken (MS) kontak, metal ve yarıiletkenlerin etkileşiminden kaynaklanan ikili yapıdır. İki tür metal-yarıiletken bağlantısı vardır: omik ve doğrultucu (Schottky kontakları olarak da bilinir). Oluşturulan kontaklar, metallerin ilgili iş fonksiyonlarına bağlı olarak değişen elektriksel özellikler sergiler. İş fonksiyonu (Φ), bir elektronun Fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkması için gereken enerji miktarıdır. Kullanılan metalin, yarıiletkenin ve yarıiletken tipinin (p veya n tipi) iş fonksiyonları, kontağın omik mi yoksa doğrultucu mu olduğunu belirler. Metalin iş fonksiyonu Φ_m ile gösterilirken, yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s ile temsil edilir. Schottky kontakları olarak bilinen bir kontak sınıfı, elektronlar ve deşikler gibi akım taşıyıcıları bir yönde (metalden yarıiletkene) diğerine göre daha fazla hareket ettiğinde ortaya çıkar. Omik kontakta, metal ile yarıiletken arasında potansiyel olmadığından taşıyıcı hareketi her iki yönde de kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Çizelge 3.1'de metal ile yarıiletken malzemelerin iş fonksiyonlarına göre kontak türleri yer almaktadır.

Çizelge 3.1. Metal ile yarıiletken malzemelerin kontak türleri [43-46]

Yarıiletken Tipi	Malzemelerin İş Fonksiyon Durumu	Kontak Türü
n-tipi metal-yarıiletken	$\Phi_m > \Phi_s$	Doğrultucu kontak
	$\Phi_s > \Phi_m$	Omik kontak
p-tipi metal-yarıiletken	$\Phi_s > \Phi_m$	Doğrultucu kontak
	$\Phi_m > \Phi_s$	Omik kontak

3.1. Metal ve n-tipi Yarıiletken Schottky Kontaklar

Schottky kontağı olarak da bilinen bir doğrultucu kontak, metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonları bir $\Phi_m > \Phi_s$ bağlantısına sahip olduğunda oluşturulur. Her iki iletkenin Fermi enerji seviyeleri eşit olduğunda metal ile temasa geçen yarıiletken arasındaki elektron akışı devam eder. Metalin ve yarıiletken Fermi enerji seviyeleri Φ_m-Φ_s kadardır (Şekil 3.1.). Kontak olduktan sonra enerji seviyeleri dengeye gelerek metal ve yarıiletkenin Fermi enerji (E_F) değerine gelir. Metal ve yarıiletken, bu denge durumuna ulaşana kadar yük alışverişinde bulunurlar. Dengeye ulaşmak için yarıiletkenin enerji seviyelerinin Φ_m- Φ_s kadar aşağıya kaydırılması gerekir.



Şekil 3.1. a) Kontakların yapılmadan önceki enerji bant diyagramı, b) kontakların yapıldıktan sonraki enerji bant diyagramı şeması [47]

Metal ve yarıiletkendeki elektron miktarı termal dengede eşit olduğundan aralarında net bir akım yoktur. Schottky bariyeri (engeli), temasta ortaya çıkabilecek varsayımsal bir engelin diğer adıdır. Yarıiletken tarafın difüzyon potansiyeli bariyerinin yüksekliği;

$$eV_d = \Phi_m - \Phi_s \tag{3.1}$$

olarak ifade edilir ve eşitlikte V_d difüzyon potansiyelini ifade etmektedir. Metal taraftaki potansiyel engel yüksekliği aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmelidir.

$$eV_b = \Phi_m - \chi_s \tag{3.2}$$

Eşitlikteki χ_s yarıiletkenin elektrona ilgisi olarak ifade belirtilmektedir. Metalden yarıiletkene geçmek isteyen elektronların bariyer yüksekliği, yarıiletkene negatif (–V) gerilim sağlandığında değişmemeli ve yarıiletkenden metale giden I_0 akımı sabit kalmalıdır. Yarıiletken bölgede iletim bandının enerjisi eV artarken, ters yöndeki bariyer yüksekliği eV kadar azalır. Bu $e^{eV/kT}$ faktörü metalden yarıiletkene akan akımın artmasına neden olur.

Böylece ($V \gg kT/e$)'nin sağlanan voltajının kontak için doğru beslem olduğunu gösterir. Akım eşitliği;

$$I = I_0[exp(eVkT) - 1] \quad (3.3)$$

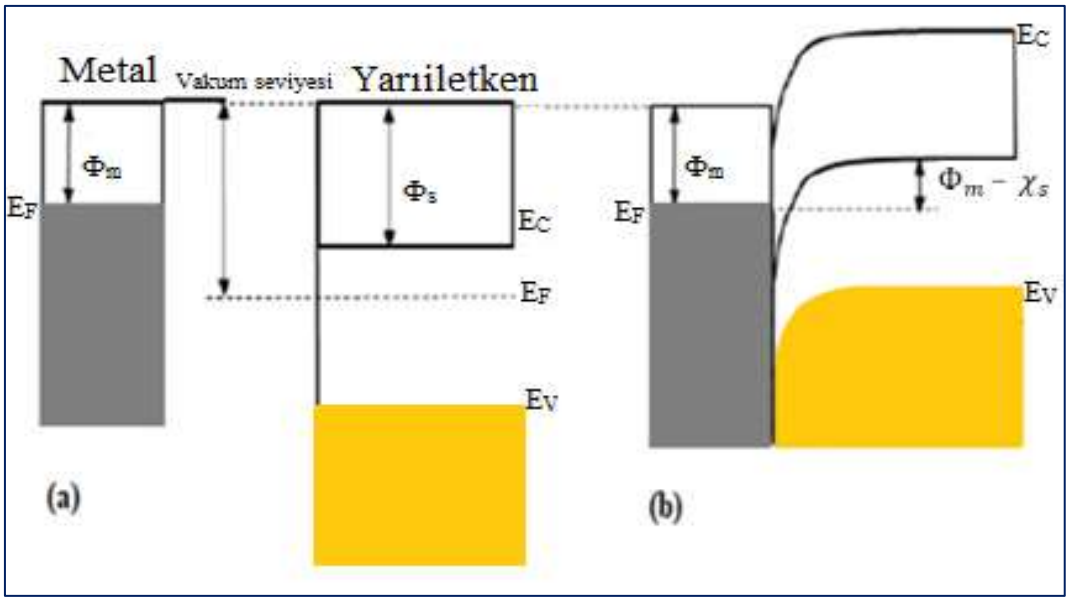
ifade edilmektedir ve I_0'a doyum akımı denilmektedir. Yarı iletkene +V voltajı verildiğinde elektronların yarıiletken taraftan metale doğru hareket edebilmesi için aşması gereken engel yüksekliği eV kadar artar ve iletim bandı eV kadar daralır. Sonuç olarak, elektronlar için daha büyük bir bariyer oluşur ve metal tarafın bariyer yüksekliği sabit kalır.

Gerilimin $V \ll -kT/e$ olması sonucunda, kontak ters besleme durumu gösterir. Sonuç olarak, metal tarafta bariyer yüksekliği uygulanan voltajdan bağımsızdır, yarıiletken tarafta ise buna bağlıdır [43, 44, 46-49].

3.2. Metal ve n-Tipi Yarıiletken Omik Kontaklar

Omik kontaklar Ohm kanununa uyar ve her iki yönde de akım geçirme özelliğine sahiptir. Omik kontaklar sistem üzerinde mümkün olduğu kadar az etki yaratacak şekilde tasarlanmıştır. Omik kontaklarda yarıiletkenden metale ve metalden yarıiletkene bir yük akışı vardır, dolayısıyla elektronlar her iki yönde de serbestçe hareket edebilir. Omik kontak, yarıiletkenin iş fonksiyonu ($\Phi_s > \Phi_m$) metalin iş fonksiyonundan büyük olduğunda meydana gelir. Yarıiletkenin fermi enerji seviyesi, iki malzeme temas etmeden önce metalin fermi enerji seviyesinin $\Phi_s - \Phi_m$ altındadır. Elektronların metalden yarıiletkene geçerken geride boşluk bırakması nedeniyle, kontak oluştuktan sonra yarıiletken yüzeyinde n-tipinde bir artış olur. Böylece kontağın metal bileşeninde pozitif bir yüzey yükü meydana gelir. Şekil 3.2'de metal/n-tipi yarıiletken kontak oluştuktan sonra enerji-bant diyagramını yer almaktadır.

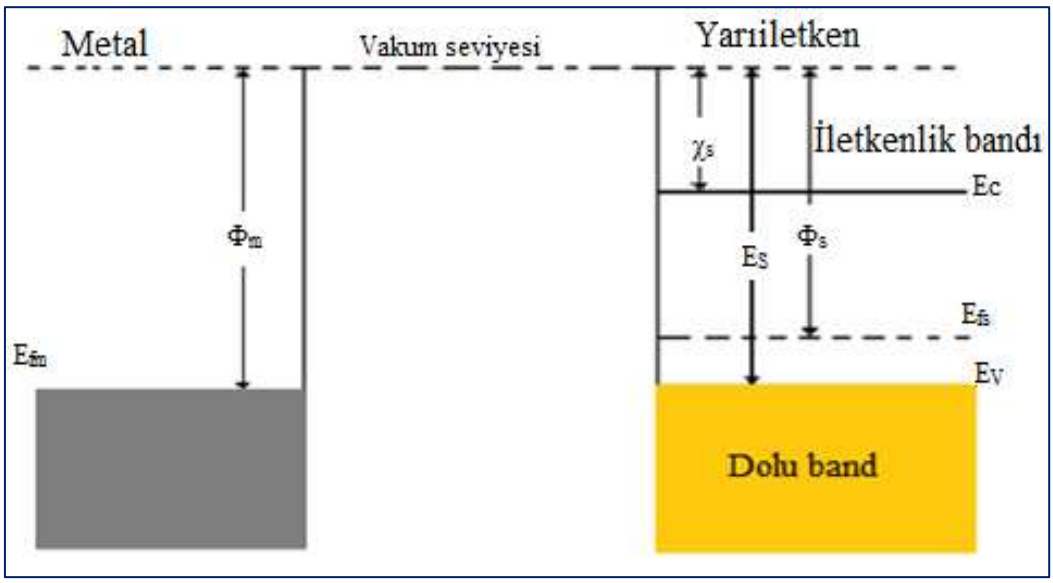
Oluşan yapının omik kontak olan metal yüzeye V potansiyel verilirse elektronlar herhangi bir engelle karşılaşmadan yarıiletkenden metale kolaylıkla akabilirler. Metal yüzeye -V potansiyel verilirse yarıiletkenin n-tipi özelliği sayesinde elektronlar, karşılaştıkları minimum engel yüksekliğini aşarak metalden yarıiletkene kolaylıkla geçiş sağlarlar [43, 46].



Şekil 3.2. a) Kontalar yapılmadan önceki enerji bant diyagramı, b) kontaklar yapıldıktan sonraki enerji bant diyagramı şeması [47]

3.3. Metal ve p-Tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontak

Metal/p-tipi yarıiletken kontaklarda yarıiletkende oluşan iş fonksiyonu ($\Phi_s<\Phi_m$) metalin iş fonksiyonundan küçük olduğunda bir doğrultucu kontak (Schottky kontak) meydana gelir. Akım taşıyıcıları (deşikler ve elektronlar) kontağın bir tarafından diğerine göre çok daha kolay aktığında, kontağın doğrultucu olduğu söylenir. Şekil 3.3'de metal ve p-tipi yarıiletkende oluşan enerji-bant diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Metal ve p-tipi yarıiletkende oluşan enerji-bant diyagramı şeması [47]

Metalin iş fonksiyonu, bir elektronu fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine taşımak için gereken minimum enerji olarak tanımlanır. İş fonksiyonu, yarıiletkenin vakum seviyesi ile fermi enerji seviyesi arasındaki enerji farkıdır.

Elektron ilgisi, bir elektronu iletim bandının tepesinden vakum seviyesine taşımak için gereken enerji miktarıdır. Vakum seviyesi veya bir elektronu yüzeyden uzaklaştırmak için gereken minimum enerji, bir metalin hemen dışında sıfır kinetik enerjiye sahip bir elektronun enerji seviyesidir. Yarıiletkenin fermi seviyesi, metal ve p tipi yarı iletken doğrultucu teması öncesinde metalin fermi seviyesinin Φ_s-Φ_m altındadır.

Elektronlar, metal/p-tipi yarı iletken doğrultucu kontak oluşturulduktan sonra Fermi seviyeleri birbirine paralel olana kadar metalden yarıiletkene doğru gider. Yarıiletkenin ön yüzeyi böylece negatif bir yük kazanır. Metalden yarıiletkene doğru hareket eden elektronların bıraktığı boşluklar sonucunda metalin ön yüzeyi pozitif yüklü hale gelir. Yarıiletkendeki iyonize alıcılar bu negatif yük katmanını üretir.

3.4. Metal ve p-tipi Yarıiletken Omik Kontak

Omik olan kontaklar, Ohm kanununa uygun ve çift yönlü akım geçirme özelliğine sahip kontaklardır. Yarıiletkenin fermi seviyesi, metal ile p-tipi yarı iletken arasındaki omik kontaktan önce metalin fermi seviyesinin Φ_m-Φ_s üzerindedir. Metal ile p-tipi yarıiletken arasındaki omik temasın ardından yarıiletkendeki elektronlar metal tarafına geçerek arkalarında pozitif yükler veya deşikler bırakır ve metalin ön yüzeyi negatif yük kazanır. Yarıiletkenin fermi enerji seviyesi, yarıiletken tarafının elektron konsantrasyonunun azalmasının bir sonucu olarak Φ_m-Φ_s kadar düşer. Yarıiletken içerisinde metal elektronları kolaylıkla izin verilen durumlara geçebilir. Deşiklerin yarıiletkenden metale geçişi bu yük hareketine yansır. Yüksek elektron konsantrasyonu nedeniyle metal tarafa giden deşikler burada nötralize edilir [50].

3.5. Termiyonik Emisyon Teorisi (TE)

Çoğunluk yük taşıyıcıları tipik olarak MS kontaklarında akım iletimini kolaylaştırır. Doğrudan güç uygulandığında n tipi bir yarıiletken ile yapılan kontakta akımın iletilmesinin bazı farklı yolları aşağıda verilmiştir:

- Uzay yükü alanındaki elektron-deşik (hole) birleşimi
- Yarıiletkendeki elektronlar nedeniyle bariyeri aşan termiyonik emisyon akımı
- Deşik enjeksiyonu veya nötr bölgedeki elektronların ve deşiklerin metalden yarıiletkene karıştırılması.
- Kuantum mekanik tünelleme, elektronların yarıiletken bariyeri geçip metale ulaşmasını sağlar.

Yüksek sıcaklıktaki bir yüzeyden termal enerji elde eden elektronların ve deşiklerin (yani yük taşıyıcıların çoğunluğunun) deşarjı, termodinamik emisyon teorisi olarak tanımlanır. TE teorisi taşıyıcıların yeterli termal enerji elde ettiklerinde Schottky kontaklarındaki potansiyel bariyer (Φ_B) üzerinden yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene hareketidir [43, 51]. Böylece metal/p-tipi doğrultucu bağlantılarındaki deşikler tarafından sağlanır ancak metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklarındaki elektronlar tarafından da oluşturulmaktadır. Metal-yarıiletken kontaklardaki yük taşıyıcıları öncelikle akımın iletilmesinden sorumludur.

Doğrudan besleme modunda yarıiletkenden metale olan akım yoğunluğu $J_{s\rightarrow m}$ ile temsil edilirken, metalden yarıiletkene olan akım yoğunluğu $J_{m\rightarrow s}$ ile temsil edilir. Bu, metalin +V voltajının MS Schottky kontağına uygulanmasıyla elde edilir. Yarıiletkenden metale doğru akım yoğunluğu aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$\mathrm{J_{m\rightarrow s}} = \int_{E_c}^{\infty} ev_x dn \tag{3.4}$$

E_C metal bölgeye termiyonik emisyon için gerekli olan enerji iken, v_x elektronların iletim mekanizması yoluyla kartezyen koordinat ekseninde +x yönünde sürüklenme hızıdır. Artan elektron yoğunluğu ise aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$dn = N(E)F(E)dE \tag{3.5}$$

Yükselen elektron yoğunluğu denkleminde Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu $F(E)$ ile ve iletim bandı durum yoğunluğu N(D) ile gösterilir.

$$\mathrm{J_{m\rightarrow s}} = \left(\frac{4\pi k^2 m^* e}{h^3}\right) T^2 exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \tag{3.6}$$

Yukarıdaki denklem yarıiletkenden metale hareket eden elektronların akım yoğunluğunu ifade etmektedir. Oluşan eklemdeki net akım yoğunluğunu, $J = J_{S\to m} - J_{m\to s}$ denklemi ile ifade edilirse aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$J = A^* exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right)\left[exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1\right] \quad (3.7)$$

Denklemde ki A^* Richardson sabiti;

$$A^* = \left(\frac{4\pi k^2 m^* e}{h^3}\right) \quad (3.8)$$

olarak ifade edilir. Doyum akım yoğunluğu ifadesi;

$$J_0 = A^* T^2 exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \quad (3.9)$$

denklemi ile belirtilmektedir. Akım yoğunluğu ise;

$$J = J_0\left[exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1\right] \quad (3.10)$$

ifade edilmektedir [46,52].

Denklemi genişletilerek Schottky diyotlardaki doğrudan besleme gerilimi için akım yoğunluk-gerilim (J-V) ifadesi TE teorisinde denklem 3.11'de gösterilmiştir.

$$J = J_0\left[exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{kT}\right) - 1\right] \quad (3.11)$$

Gerçekte, bu cihazların uygun besleme I-V özellikleri mükemmel durumdan (n=1) birkaç sapma (n>1) sergileyebilir. Bu, saf termiyonik emisyon teorisinde boyutsuz ideallik faktörünün (n) 1'den büyük olabileceği anlamına gelir. Böylece akım yoğunluğu ifadesi denklem 3.11'e dönüşmektedir [53].

3.6. Schottky Diyot Parametrelerinin Norde Fonksiyonları ile Hesaplanması

I-V eğrisinin değer aralığı, doğrusal olduğu bölgelerle sınırlı olacaktır. Böylece seri direnç mevcut olduğunda pek çok sorun ortaya çıkacaktı. Seri direnç değerinin çok yüksek olması durumunda I_0 doyum akımının güvenilirliği düşecek ve bu aralık, I_0 değeri için doğru değeri sağlayamayacak noktaya kadar daralacaktır. Norde, bu tür senaryolarda engel yüksekliğini (Φ_b) ve seri direnci (R_s) programlamak için alternatif bir yöntem önerdi [43, 54].

Norde fonksiyonu aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right) \tag{3.12}$$

Burada I(V) değerleri akım-gerilim grafiğindeki akım değerleridir, γ idealite faktöründen büyük olan en küçük tam sayıdır. Engel yüksekliği (Φ_b) ise;

$$\Phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \tag{3.13}$$

ifade edilmektedir. Norde fonksiyonunda bulunan minimum gerilim noktası $F(V_0)$'dır. Seri direnç (R_s) değeri aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$R_s = \frac{kT(\gamma - \eta)}{I} \tag{3.14}$$

Bu denklemdeki (I) akım, F(V) fonksiyonundaki minimum gerilim değerine gelmektedir [43,55].

3.7. Schottky Diyotlarda Kapasitans- Gerilim Karakteristikleri

Metal/p-tipi doğrultucu kontakda ($\Phi_m < \Phi_s$) ve metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağı ($\Phi_m > \Phi_s$), yüksek dirençli bir katman ve yarıiletkenin sınır bölgesindeki elektronlar (n-tipi yarıiletkenler için) veya deşik açıklığı (p tipi yarıiletkenler için), metal ve yarıiletken arasındaki yük taşıyıcı konsantrasyonlarının yeniden dağıtılması nedeniyle oluşur. Bu tükenme bölgesinin (W_D) kalınlığı, sağlanan harici gerilime göre değişir. Schottky diyot

olarak da bilinen bu tür metal-yarıiletken kontak, kapasitörünkine benzer bir yapıya sahiptir. Metali tükenmiş alan yarıiletken sisteminde iki iyi iletken (metal ve yarıiletken) arasında yüksek dirençli bir katman bulunur. Bu katmanın direnci, yarı iletkenin yığın bölgesinin direncinden önemli ölçüde daha yüksektir. Başka bir deyişle bu katman, herhangi bir hareketli yük içermeyen ve yüksek dirence sahip bir yalıtım katmanına benzer şekilde çalışır.

Metal-yarıiletken Schottky kontaklardaki (ters beslem altında) diferansiyel kapasitans ifadesi şu şekildedir:

$$C = \left[{(\varepsilon_S \varepsilon_o q N_d} \Big/ {2(V_d + V)} \right]^{0.5} \tag{3.15}$$

Sığanın karesinin tersi;

$$C^{-2} = \left(\frac{2}{A^2 q N_d \varepsilon_s}\right)\left(\Phi_B - \xi + V_r - \frac{kT}{q}\right)^{0.5} \tag{3.16}$$

Temas alanı (A), ters voltaj (V_r) ve Fermi enerji seviyesi (E_f) denklemde temsil edilir.

Φ_B, V_r'den bağımsız olduğunda veya ara yüzey katmanı olmadığında, C^{-2}, V_r'ye karşı çizildiğinde, düz bir çizgi -V_i'de buluşur. (Φ_B-ξ-kT/q) bu doğrunun yatay eksenle kesiştiği yerdir. Arayüz durumlarını C-V ölçüm bulgularının dışında tutmak için yüksek frekanslı ölçümler yapılmalıdır. Arayüzey durumunda C^{-2}-V doğru eğimi

$$\frac{dC^{-2}}{dV} = \frac{2}{q\varepsilon_S A^2 N_A} \frac{1}{(1+\alpha)} \tag{3.17}$$

denklemi ile hesaplanır. Bu denklemdeki $\alpha = qN_{ss}\delta/\varepsilon_i$'dir. δ yalıtım katmanının kalınlığıdır ve N_{ss} arayüz durum yoğunluğudur. $1/(1+\delta) = c_2$ olarak düzenlenirse denklemdeki c_2 değeri;

$$c_2 = \frac{2}{q\varepsilon_S N\prime_A \left(\frac{dC^{-2}}{dV}\right)} \cong \frac{N_A}{N'_A} = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_i + qN_{ss}\delta} \tag{3.18}$$

olarak ifade edilir. Tüketim tabakasının kalınlığı ise;

$$W_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_0 V_d}{qN_A}} \tag{3.19}$$

olarak düzenlenir. Fermi enerji seviyeleri ise aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$E_F = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_c}{N_D}\right) \tag{3.20}$$

Denklemdeki N_c, valans bandındaki etkin durumların yoğunluğunu ifade etmektedir. N_c değeri;

$$N_C = 4{,}82 \times 10^{15} T^{3/2}\left(\frac{m_e^*}{m_0}\right)^{3/2} \tag{3.21}$$

olarak hesaplanır.

$$\Phi_B(C-V) = V_i + E_F + {kT}/{q} - \Delta\Phi_B \tag{3.22}$$

Bu denklem, Φ_B(C-V)'nin potansiyel bariyer yüksekliği değerlerini difüzyon potansiyeli, Fermi enerjisi ve Schottky bariyer inişi ($\Delta\Phi_B$) cinsinden temsil etmek için kullanılabilir [53, 56].

4. KULLANILAN YÖNTEMLER VE KARAKTERİZASYON SİSTEMLERİ

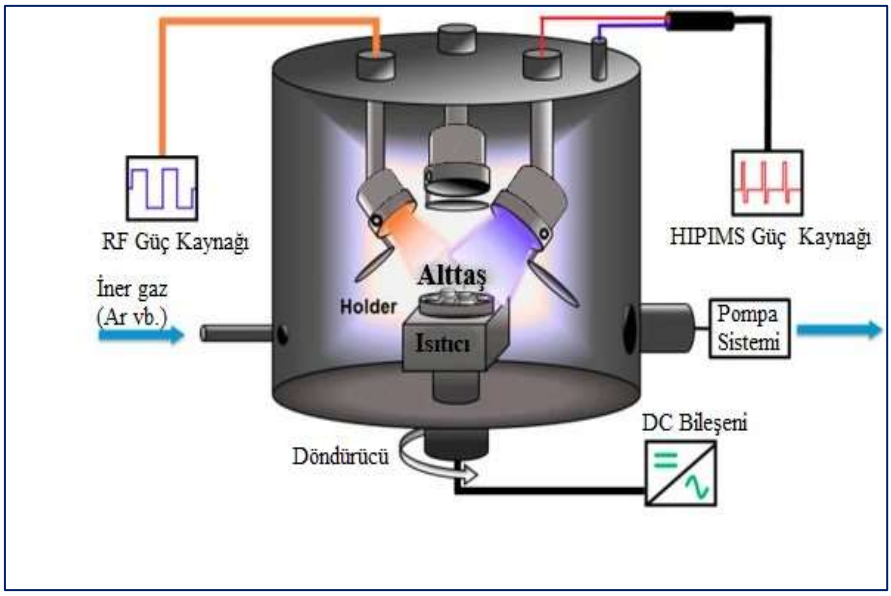
Bu tez çalışmasında n-Si ve cam alttaş eş-püskürtme sistemi kullanılarak MgO ince film üretildi. Bu çalışma için en iyi sonucu eş-püskürtme (co-sputtering) yöntemi ile elde edildiği belirlendi. MgO ince filmlerin yapısal, optik ve dielektriksel özelliklerinin analizi için X-ışını kırınımı (XRD), Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), UV-Vis spektrometresi, akım-gerilim (I-V) ölçüm sistemi ve kapasitans-gerilim (I-V) ölçüm sistemi kullanıldı. Termal buharlaştırma sistemi ve hızlı tavlama sistemi fabrikasyon işlemlerinde kullanıldı.

4.1. Eş-Püskürtme Sistemi

Eş-püskürtme sistemi (co-sputter), ardışık kaplama yaparak ince film katmanları oluşturan aynı anda birden çok hedef malzeme kullanarak ince film kaplama yapan püskürtme tekniğidir. Bu sistemde Şekil 4.1'de gösterildiği gibi bir adedi DC, iki adedi RF kaynağına, vakum odasına ve iki gaz girişine sahiptir. Numunenin ve hedefin açılarını ve alttaşa olan uzaklığı ayarlayan dönebilen alttaş tutucusuna sahiptir. Kaplama işlemine başlamadan önce başlangıç basıncı 10^{-7} mbar'a kadar çıkabilir [57].

Kaplama işlemimine başlarken sistem taban basıncına getirilir. Daha sonra ortama oldukça saf (%99,9999) argon gazı verilir. Alttaş dönme hızı ve alttaş hedef arasındaki mesafe ayarlanır. Hedefin RF gücü ayarlanıp sabitlenir [58].

Hedef ile alttaş arasına yüksek gerilim uygulanır. Gerilim ile hedeften yakınında serbest elektronlar oluşur ve bu elektronlar hızlanarak argon atomları ile çarpışır. Çarpışma sonucu Argon iyonları (Ar^+) meydana gelir. İyonlaşmış Ar^+ ile serbest elektronlar ile plazma ortamı meydana gelir. İyonlaşmış Ar^+ atomları katot olarak belirlenen hedefin yüzeyine çarpar. Hedeften atomlar kopartılır. Hedeften kopan atomlar anot olan alttaşın yüzeyine birikir. Böylece ince film katmanı oluşur [38, 59, 60].



Şekil 4.1. Eş-püskürtme sistemi şeması [61]

Bu tez çalışmasında Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Nanovak NVTS-500 eş-püskürtme cihazı (Resim 4.1) kullanılarak MgO ince filmler üretilmiştir. Bu sistemde 1 adet DC ve 2 adet RF saçtırma kaynağı vardır ve bu kaynaklar 2 inç çapa sahiptir. Sistemde dönme motoru 2-30 rpm arasında ayarlanabilmektedir. Alttaşı 600 ^{o}C'ye kadar ısıtılabilen rezistif ısıtıcısı vardır. Sistemin temel basıncı 10^{-8} Torr mertebesine kadar çıkabilmektedir.



Resim 4.1. Nanovak NVTS-500 Eş-püskürtme sistemi (Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi)

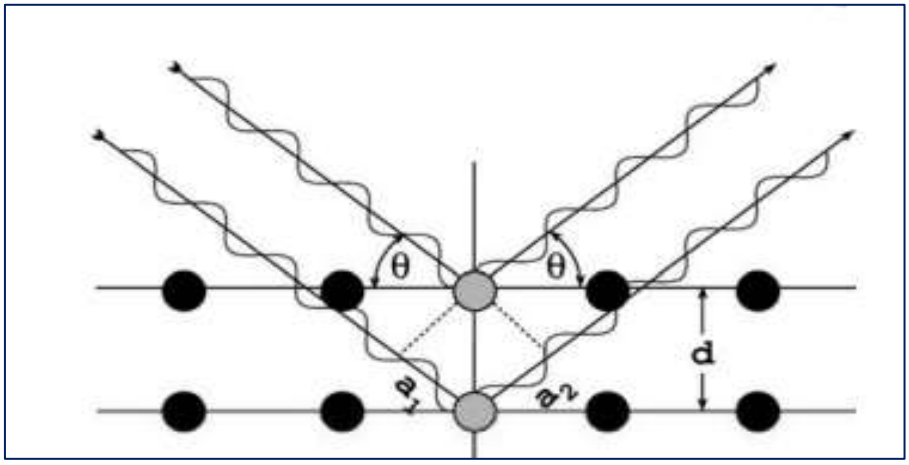
4.2. Karakterizasyon Sistemleri

Bu çalışmada X-ışını kırınımı (XRD), UV-Vis spektrometresi ve Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) karekterizasyon sistemleri kullanıldı.

4.2.1. X-ışını kırınımı (XRD) sistemi

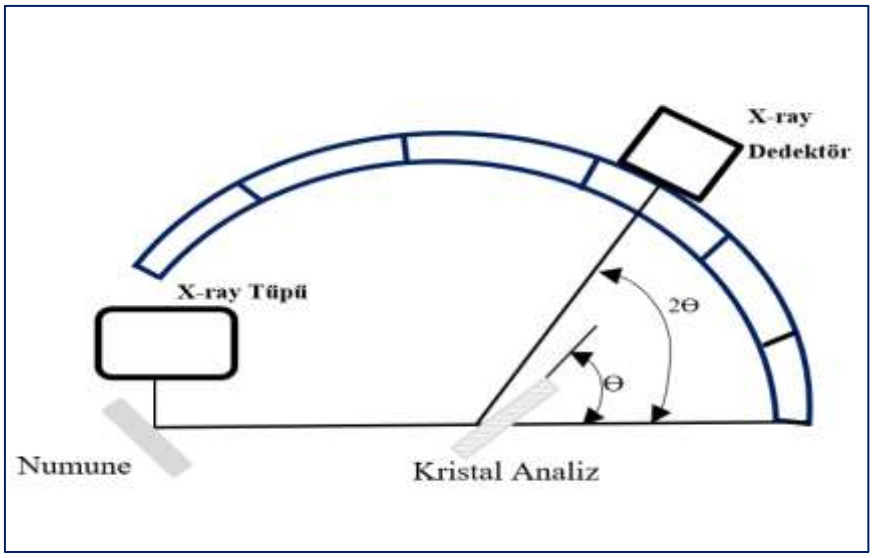
Atomların yörüngeleri arasındaki elektron geçişleri, X-ışınları olarak bilinen elektromanyetik dalgalar üretir. Fizik profesörü Wilhelm Conrad Röntgen, 1895 yılında X-ışınlarını keşfetti. X-ışınının dalga boyunun, onun katı nesnelerden geçmesine izin veren enerji aralığında olduğu anlaşıldı.

X-ışını kırınımı sistemi malzemelerin kristal yapılarını ve atomik özelliklerini incelemeyi sağlayan yaygın yapısal analiz tekniğidir. X-ışını katot ışık tüpü tarafından üretilir. X-ışını kırınımı, fotonların malzemede bulunan kristal örgüdeki atomlar tarafından saçılmasıdır. Bu saçılmış aynı fazda olan monokromatik ışınlar ile yapıcı girişim oluşur. Böylece X-ışını kırınımı analizi yapılır [62, 63].



Şekil 4.2. Bragg kanunu şeması [62]

X-ışını kırınım sistemi Bragg kanununa (Şekil 4.2) dayanır. Gelen X-ışınları numune ile etkileşir ve yapıcı girişim yani kırılan ışın üretilir. Şekil 4.3'de X-ışını kırınım şeması gösterilmektedir.



Şekil 4.3. X-ışını kırınım şeması [64]

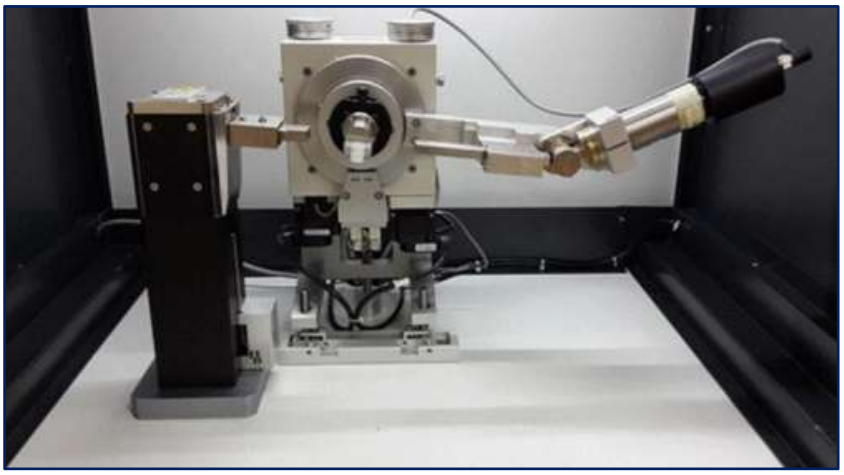
Bragg yasası;

$$n\lambda = 2\mathrm{d}\sin\theta \tag{4.1}$$

ile verilir. Burada d numunenin kristal düzlemleri arasındaki mesafedir, λ x-ışınının dalga boyudur, θ gelen x-ışını ile yansıtıldığı paralel düzlem arasındaki açıdır ve n yansıma katsayısıdır [62-64].

Kaynak olan katot ışın tüpüne voltaj uygulanarak elektron üretilir. Bu elektronlar hedefe doğru hızlandırılır. Hedef ile elektronlar çarpışır. Yeterli enerjiye sahip olduğunda X-ışını spektrumları üretilir. Oluşan spektrumdan K_α ve K_β bileşenleri oluşur. X-ışının kırınımında folyolar veya kristal monokromlayıcılarla filtrelemeler kullanarak monokromatik X-ışınlarını üretildiği belirtilmektedir. Numuneye çarpan X-ışınları geometrisi Bragg yasasını uyduğunda, yapıcı girişim oluşur. Böylece yansıyan X-ışınlarının yoğunluğu bir tepe noktası meydana gelir. Bir dedektör bu X-ışını sinyalini kaydeder. Aynı zamanda dedektör sinyalleri işler ve sinyali bir sayım oranına dönüştürdüğü ifade edilir. Elde edilen veriler bilgisayar monitörü gibi bir cihaza gönderilerek sonuçlara ulaşılır. XRD analizi ile toz, katı ve ince film şeklindeki numunelerin yapısal analiz yapabilir. Bu numunelerin kristal boyutu, kristal yönlenmesini, faz diyagramı, Örgü parametrelerini, numunenin yapısındaki değişimleri ve atom pozisyonlarını belirler [64].

Bu tez çalışmasında üretilen MgO ince film yapılarının ölçümleri Resim 4.2'de gösterilen Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yer alan $CuK_{\alpha 1}$ (1,54178 Å) kaynaklı APD 2000 PRO XRD cihazı (Resim 4.2) ile yapıldı.



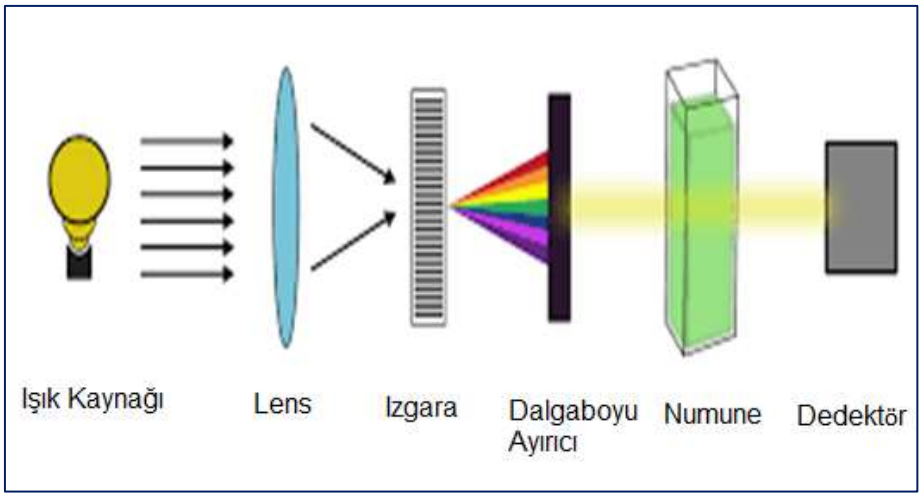
Resim 4.2. XRD Cihazı (Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi)

4.2.2. UV-Vis spektrometresi

UV ışının dalgaboyu 10-400 nm aralığındadır. Uzak UV bölgesi 10-200 nm aralığında ve yakın UV veya UV bölgesi dalga boylu ise 200-400 nm dalga boyunda iken görünür bölge 400-800 nm dalga boyu aralığına sahiptir. Spektroskopi, elektromanyetik dalga (ışık) ile madde arasındaki etkileşmeyi inceleyen bilim dalıdır. Işığın özelliklerini belirlemek için analiz yapan cihaza spektrometre denilir. Bir numunenin moleküllerinin, atomlarının veya iyonlarının farklı enerji durumları arasında geçiş yaparken emdiği ve saldığı elektromanyetik dalgaların ölçülmesini mümkün kılar. UV-VIS Spektroskopisi, farklı türdeki çözücü ve maddelerin optik analiz yaparak ışık emilimi, malzemede meydana gelen elektronik geçişler ile ilgili bilgi verir [65, 66].

Ultraviyole (UV) spektroskopisi, görünür, yakın kızılötesi (NIR), morötesi (UV), görünür (Vis) aralıklardaki (200-800 nm) ışığı kullanır [66, 67].

UV-Vis absorpsiyon spektroskopisi, ışık ışınının numuneden geçirilir. Bu geçmeden sonrasını veya numune yüzeyinden yansıdıktan sonra oluşan zayıflamayı ölçebilen cihazdır. Soğurma ışının zayıflaması arttıkça artmaktadır. Soğurma spektrumu, soğurma bandını gösterir.



Şekil 4.4. UV-Vis absorpsiyon spektroskopisi şeması [65, 66]

UV-Vis spektrometresinde Şekil 4.4'de gösterildiği gibi ışık kaynağı, kırınım ızgarası, dalgaboyu ayırıcı, numune kabı veya küvet ve dedektör bileşenlerinden oluşur. Spektrometredeki ışık kaynağı tek dalga boyu olması için filtre ve monokromatör kullanılır. UV-Vis spektrometresinde sabit bir yol uzunluğu ve bir çözeltideki soğurucunun konsantrasyonunu belirlemek için Beer-Lambert yasasına kullanılmaktadır.

Beer-Lambert yasası gelen monokromatik ışının absorbansının 'A', çözeltinin konsantrasyonu 'c' ve yol uzunluğu 'ℓ' ile doğru orantılı olduğunu ifade eder.

$$A \propto c \,.\, \ell \tag{4.2}$$

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

Bu denklemde d kalınlık T ise optik geçirgenliği ve α optik soğurma katsayısını ifade eder. Tauc denklemi ile yarıiletken malzemelerin enerji bant aralığı E_g belirlenir.

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^n \tag{4.4}$$

Bu denklemde fotondan gelen enerji hν. A sabit Eg yasak enerji ifade etmektedir. n ise malzemeye göre değişen "1/2, 2, 3/2 *ve* 3" değerlerini alır. Yarıiletken malzemenin $n = 1/2$ olduğunda direkt izinli geçiş, $n = 2$ olduğunda indirekt izinli geçiş, $n = 3/2$ olduğunda direkt yasaklı geçiş ve $n = 3$ olduğunda indirekt yasaklı geçişe sahip bant aralığı olduğunu ifade eder [68].

Bu tez çalışmasında MgO ince film yapılarının optik analizinde Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki Perkin Elmer Lambda 2S model UV-Vis spektrometresi kullanıldı. Resim 4.3'de kullanılan UV-Vis spektrometresi yer almaktadır.

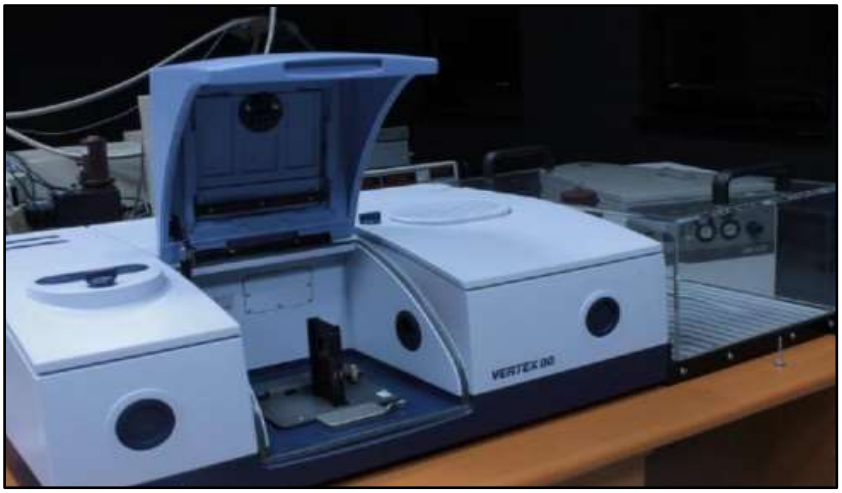


Resim 4.3. UV-Vis spektrometresi

4.2.3. Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrometresi

Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi titreşim spektrometresi de denilmektedir. FTIR genellikle bir malzemenin yüzeyinde bulunan moleküler yapıyı ve kimyasal bağları tanımlamak için kullanılır. FTIR spektrometresi, bir numune yüzeyine 2500 ila 25000 nm dalgaboyu aralığında kızılötesi ışık uygulayarak geçirgenliği ve soğurmayı ölçer. Ölçüm, numunede mevcut bağların enerji seviyelerini dikkate alır.

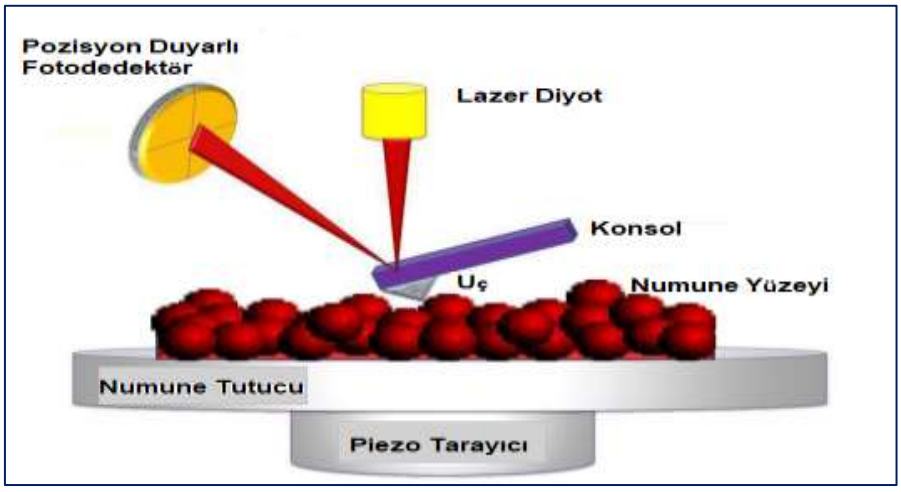
Bu tez çalışmasında MgO ince film yapılarının optik analizi için Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan VERTEX 80 FTIR spektrometresi (Resim 4.4) kullanıldı. FTIR spektrometresi NIR ile çalışan bir InGaAs diyot detektörü, bir geniş bant MCT detektörü, bir hava soğutmalı DLTGS detektörü ve bir HeNe lazer kaynağından oluşmaktadır.



Resim 4.4. FTIR spektrometresi (VERTEX 80)

4.2.3. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM)

Gerd Binning ortaklarıyla birlikte atomik kuvvet mikroskobunu icat etti. Atomik Kuvvet Mikroskobu, bir uç ile numune yüzeyi arasındaki etkileşimler yaparak numunenin yüzey morfolojisini atomik çözünürlükte ölçerek görüntüsünü ortaya çıkaran yöntemdir. Aynı zamanda bir tür taramalı prob mikroskobu olarak bilinmektedir. Malzemenin küçük bir ölçekte incelenmesini sağlar. 10 nm'den daha iyi seviyeye kadar bir çözünürlükte tahribatsız ölçüm yaparak yüzey profilometrisini gösteren yöntemdir [69]. Şekil 4.5'de AFM Çalışma prensibi yer almaktadır.

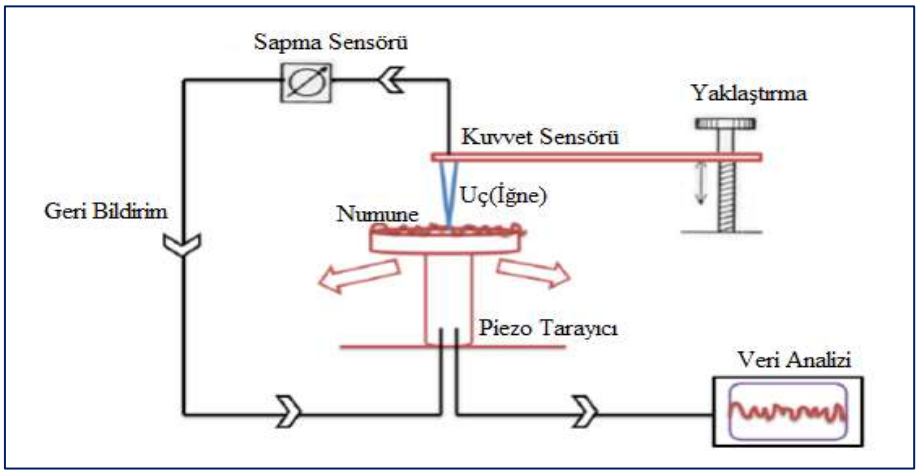


Şekil 4.5. AFM Çalışma prensibi [70]

AFM cihazında, serbest uçta küçük bir uç (iğne), kantilever, bir lazer, 4 çeyreklik bir fotodiyot ve bir tarayıcıdan oluşmaktadır. Numunelerin yüzey özellikleri, 100 µm ila 1 µm'nin altında doğru çözünürlükte incelemeler yapılabilir.

Numune ile iğne (uç) arasındaki etkileşme kuvveti Hook kanuna dayalı esnek yay ile algılanır. Numunenin yüzeyi ile iğne arasında oluşan atomik kuvvet (nano-Newton) ile mekanik olarak değişim x-, y- ve z-doğrultusunda çok hassas duyarlılıkta tarama yapar. Atomik ölçekte ölçülen numunenin yüzey özelliklerini haritalama oluşturur [57].

Şekil 4.6'da AFM'nin çalışma prensibini gösteren şematik diyagramı belirtilmektedir. AFM'deki sivri iğne ucu numune yüzeyine yaklaştırılır. İğne ile numunenin yüzeyi arasında atomik kuvvet oluşur. Kantilever (esnek yay) ile iğne numunenin yüzeyinde tepe-çukurlar boyunca hareket sağlar. Oluşan bu hareketi ile kantileverden yansıyan lazer ışınının yer değiştirmesi oluşur. Bu yer değiştirmeyi fotodiyot algılar ve lazer ışınının fotodiyota gelen pozisyonunu kaydeder. Böylece numunenin yüzey topoğrafisi elde edilir [38].



Şekil 4.6. AFM'nin çalışma prensibini gösteren şematik diyagram [70]

AFM'de üç modda görüntülemeye sahiptir. Bu üç mod temassız, yarı temaslı ve temastır. Temas modunda iki tür tarama sunar: sabit yükseklik ve sabit kuvvet ve uç yüzeyiyle fiziksel temas kurar. Konsol yarı temas modundayken, rezonans frekansında veya ona yakın bir frekansta titreşir. Kuvvet hassasiyeti konsolun kalite seviyesine göre değişmektedir. Bu mod, yumuşak malzemelere veya zayıf tutunmuş alttaşlarda daha az zarar verdiği için tercih edilir. Temassız modda ise tarama işleminde numune yüzeyinin üzerinde salınım yapar fakat uç numuneye dokunmadan tarama gerçekleştirir [43].

Bu tez çalışmasında üretilen MgO ince filmlerin yüzey morfolojileri incelemesi Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yer alan NanoMagnetics marka Pro-AFM sistemi (Resim 4.5) ile incelendi.



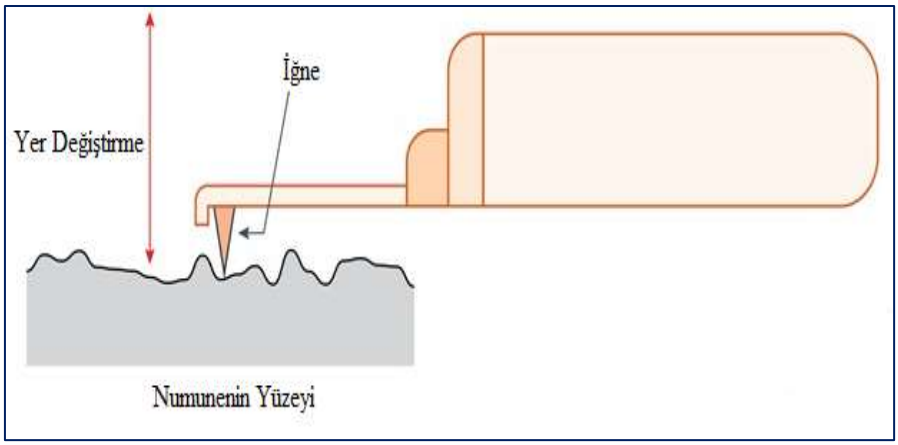
Resim 4.5. AFM sistemi (NanoMagnetics)

4.2.4. Profilometre

Profilometre, bir malzemenin yüzey profilini ve yüzey kaplamasını ölçmek için kullanılır. Profilometre, bir yüzeyden topografik elde etmek için kullanılan tekniktir. Bu teknik tek bir nokta, çizgi taraması veya tam üç boyutlu tarama yapılabilir. Tarama işleminde prob veya ışık kullanılabilir. Profilometre taramasıyla malzemenin 3 boyutlu dalgalılık, pürüzlülük, adım yüksekliği ve film kalınlığı gibi analiz ve karekterizasyonu ölçümler yapılır.

Ölçülecek numune, yatay doğrultuda iki eksende boyunca hareket eden bir tablanın üzerine konulur. İlgili parametreler programa girilir. Tarayıcının iğnesi, numunenin yüzeyinde gezer. Bu iğne alttaşın ince film kaplanmamış yüzeyi ile kaplanmış yüzeyi arasındaki farkı ölçerek ince film kalınlığı belirlenmesini sağlamaktadır. Çalışma prensibi şematik olarak

Şekil 4.7'da sunulan profilometre, 3 boyutlu yüzey topografyası ile numunenin yüzey morfolojisi hakkında bilgi sunmaktadır [38].



Şekil 4.7. Profilometrenin çalışma prensibi [38]

Bu tez çalışmasında MgO ince filmlerin kalınlık analizlerinin ölçümünde Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan Veeco Dektak-150 prob ucu tipi profilometre cihazı kullanılmıştır. Resim 4.6'da kullanılan profilometre sistemi gösterilmiştir.



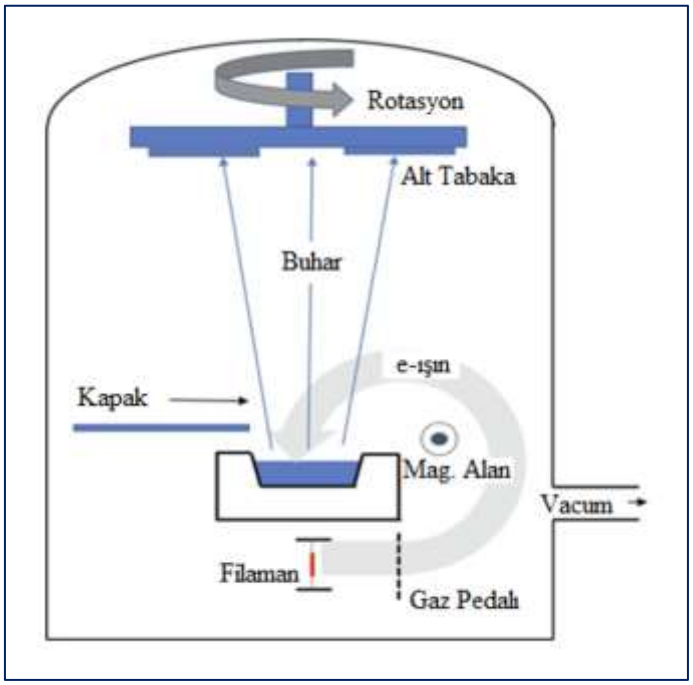
Resim 4.6. Profilometre sistemi

4.3. Fabrikasyon Sistemleri

4.3.1. Termal buharlaştırma sistemi

Termal buharlaştırma tekniği, hedef malzemenin yüksek sıcaklıkta ısıtılmasıla vakum ortamında buharlaştırma yaparak alttaş üzerine ince bir tabakanın kaplanmasıdır. Bu yöntem ile düşük erime noktasına sahip malzemelerede kullanılabilir [71].

Bu sistemde buharlaştırılacak hedef malzemeyi içeren bir pota, vakum odası, pompalama sistemi, alttaş tutucusu (holder) ve tungsten veya molibden ısıtma kaynağı bulunmaktadır. Termal buharlaşma işlemi en fazla ~10^{-7} Torr'luk bir vakumda gerçekleştirilir. Şekil 4.8'de termal buharlaştırma sistemin çalışma prensibi yer almaktadır.



Şekil 4.8. Termal buharlaştırma sistemin çalışma prensibi [72]

Bu buharlaştırma tekniği ince filmlerde metalizasyon işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Metaller, vakum ortamında pota içerisinde, uygulanan yüksek akım sayesinde buharlaşır ve bu oluşan buharlar alttaş üzerine birikerek ince film meydana gelir.

Bu tez çalışmasında, MgO ince film üzerine yapılan metalizasyon işlemleri Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki Nanovak marka NVTH-350 model termal buharlaştırma sistemi (Resim 4.7) ile gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.7. Termal buharlaştırma sistemi (Nanovak NVTH-350)

Termal buharlaştırma sisteminde dört adet bağımsız sıralı ya da eş-buharlaştırmaya sağlayan buharlaştırma potası yer almaktadır. Böylece farklı metal veya alaşımlar eş zamanı olarak buharlaştırma işlemi yapılabilmektedir. Bu buharlaştırma sistemde Ag, Al, Au metalleri ve AuGeNi metalik alaşımın buharlaştırma işlemleri yapılabilmektedir. Sisteme en fazla 4 inç'lik numune konulabilir ve homojen bir kaplama olması için alttaş tutucusu 3-30 rpm'e kadar dönebilmektedir. Kaplama sırasında numune tutucusu 400 ^{o}C'ye kadar ısıtma işlemi yapılabilir [38, 43].

4.3.2. Hızlı tavlama sistemi (RTA)

Hızlı tavlama sisteminde (RTA) yüksek ısınma (50 K/s) ve soğuma oranına sahiptir. Çok kısa sürede tavlama işlemi yapabilmektedir. RTA tungsten halojenür lamba kullanılmaktadır. Hızlı tavlama sistemi ile ince film ile alttaş arasındaki etkileşimin azaltılmasını sağlar. Böylece RTA numune yüzeyindeki oksijen adsorpsiyonunu azaltabilir. RTA endüstriyel üretimlerde kullanıma uygunluk sağlamaktadır. Sonuç olarak, hızlı tavlama sistemi (RTA) son yıllarda işleme yöntemi olarak popüler kullanım olmuştur [73].

Özellikle hızlı (sıcaklık) tavlama sistemi (RTA), yarıiletken malzemelerin hızlı termal ısıtma veya ultra yüksek vakum ortamında farklı atmosfer ortam basıncı koşullarında tavlama işlemleri için kullanılmaktadır.

Hızlı tavlama sistemi (RTA) 10^{-6} mbar vakum ortamında Ar (Argon) ve N (Azot) gibi farklı gaz kullanılabilir. Halojen lambalı ısıtıcının sayesinde daha kısa sürede çok yüksek sıcaklıklara hızlı bir şekilde çıkmaktadır. Aynı zamanda hızlı bir şekilde soğumaktadır. RTA sistemi saniyede 200ºC ısıtma ve soğutma yapabilmektedir.

Bu tez çalışmasında omik kontaklar için Resim 4.8'de gösterilmiş olan Gazi Üniversitesi, Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki hızlı tavlama sistemi (RTA) kullanılmıştır.



Resim 4.8. Hızlı tavlama sistemi (RTA)

4.4. Elektriksel Karakterizasyon Sistemleri

4.4.1. Akım-gerilim (I-V) ölçüm sistemi

Elektrik özelliğini incelenecek numuneye belirli bir aralıkta voltaj veya akım uygulanarak bu akım veya voltaj değerlerine karşılık gelen I-V değerlerinin ölçülmesini sağlayan sistemdir.

Akım-gerilim (I-V) sisteminde, numune tutucusu ve akım-gerilim kaynakları yer almaktadır. I-V ölçüm sistemi maksimum 1 A-20 W ve minimum 100 mA – 2 W güçlere ayarlanarak çalışmaktadır. Bu ölçüm sistemi elektriksel değerleri belirleyecek ve I-V eğrisini sağlayacak bilgisayar uygulaması kullanılmaktadır. I-V ölçümü olacak numunenin yerleştirileceği tabla ve altın iğne uçları olan yaylı kontak pimler kullanarak kontak alınır. Böylece numunenin 4 adet bağlantısı olmaktadır. Sistemdeki ölçüm istasyonunda hem karanlıkta hem de aydınlıkta ölçümler yapılabilmektedir. Ölçülecek numuneye farklı gerilimler uygulanarak akım gibi birçok elektriksel parametreler hesaplanabilir.

Bu tez çalışmasında üretilen MgO ince filmlerin elektriksel karakterizasyon ölçümleri için Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'inde yer alan 4200-SCS model Keithley marka akım-gerilim (I-V) ölçüm sisteminde (Resim 4.9) yapılmıştır.



Resim 4.9. Keithley 4200-SCS I-V sistemi

4.4.2. Kapasitans-gerilim (C-V) ölçüm sistemi

İncelenecek numuneye belirli bir aralıkta voltaj uygulanarak bu değerlere karşılık gelen C-V değerlerinin ölçülmesini sağlar. Bu ölçüm sistemi elektriksel değerleri belirleyerek C-V eğrisini sağlayacak bilgisayar uygulaması kullanılmaktadır. Böylece ölçülecek numuneye farklı gerilimler uygulanarak kapasitans ve kondüktans gibi birçok elektriksel parametreler hesaplanabilir.

Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde, bu tez çalışmasında oluşturulan MgO ince filmlerin, kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri için Hawlett Packard 4192A LF Empedans Analiz cihazı kullanılarak elektriksel analizi yapılmıştır. Bu cihaz, 5

mV ila 1 V AC voltaj aralıklarında, 5 Hz ila 13 MHz frekans aralıklarında ve -35 + 35 V DC'de salınım yapabilir. Bilgisayardaki IEEE-488 AC/DC dönüştürücü kartı kullanılarak bu ölçümler gerçekleştirilir. Ölçümler için 77 K (196 °C) ila 400 K arasındaki sıcaklıklar kullanılır. Sıcaklıklar VPF-475 Cryostat içinde Lakeshore-321 sıcaklık kontrol ünitesinde ile kontrol edilmektedir. Resim 4.10'da Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki Kapasitans-gerilim (C-V) ölçüm sistemi yer almaktadır.

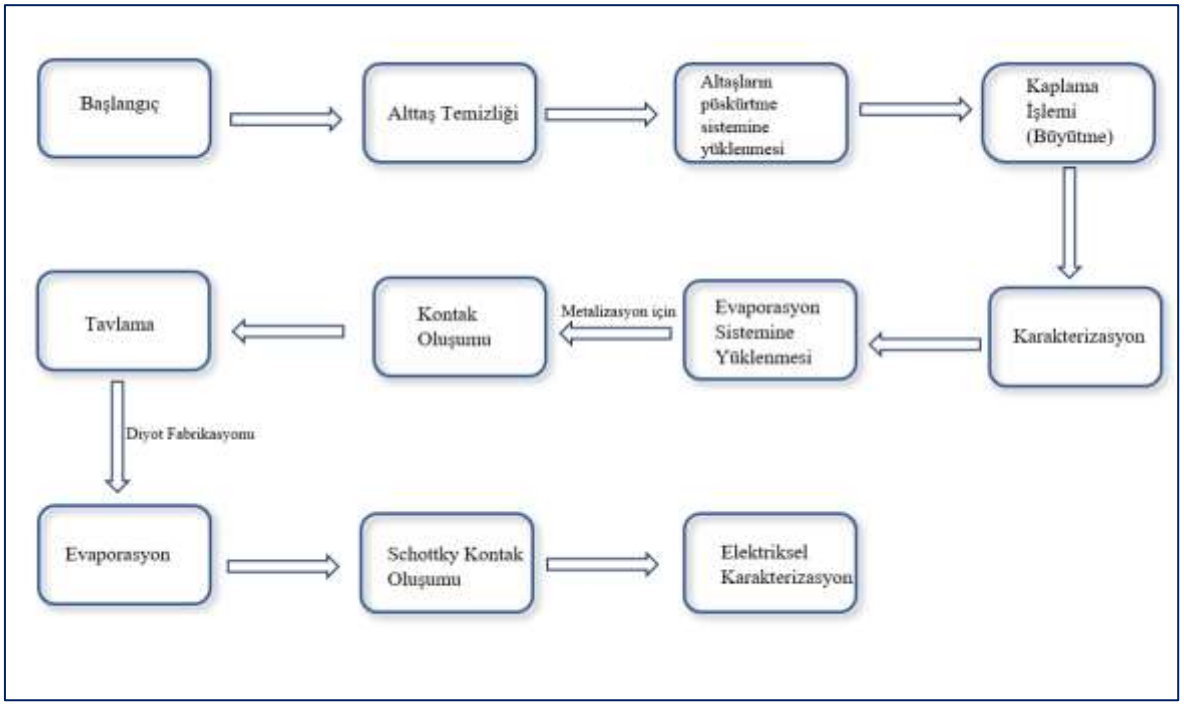


Resim 4.10. Kapasitans-gerilim (C-V) ölçüm sistemi ("1: Riyostat, 2: Monitör, 3: Empedans analizmetre, 4: Sıcaklık kontrol ünitesi, 5: Işık kaynağı kontrol ünitesi, 6: Halojen lambalı ışık kaynağı")

5. YAPILARIN KAPLANMASI, KARAKTERİZASYONLARI: BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. MgO İnce Film Yapılarının Üretimi

Bu tez çalışmasında, 100 nm kalınlıklarda MgO ince filmleri oda sıcaklığında püskürtme sistemi ile üretildi. Üretilen MgO ince filmlerin X-ışını kırınım sisteminde (XRD) yapısal, Atomik Kuvvet Mikroskobu ile morfolojik, Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve UV-Vis spektroskopisiyle optik analizleri yapıldı. Bu analizlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri incelendi. Daha sonra MgO ince filmlere evaporasyon sistemini kullanarak Schottky diyot için fabrikasyon işlemi yapıldı. Fabrikasyonu yapılmış diyotların elektriksel analizleri gerçekleştirildi. Üretilen diyotların tüm yapım aşamaları Şekil 5.1'de sunuldu.



Şekil 5.1. MgO diyotların üretim ve karakterizasyon akış şeması

5.1.1. Alttaş hazırlama ve temizleme işlemleri

İnce filmlerin üretilmesinde alttaşlardaki yüzey kirililiğinin oluşması olumsuz etkilemektedir. Üretilecek olan ince filmlerin alttaş yüzeyine homojen olarak dağılması için

alttaş temizliliğinin yapılması önemlidir. Bu tez çalışmasında n-Si ve cam alttaşları ayrı alttaş temizleme işlemleri yapıldı.

n-Si alttaş temizleme işleminde, ilk önce aseton ve sonra izopropanol alkol içerisinde ultrasonik banyoda yaklaşık 10 dakika boyunca bekletildi. Yapılan her temizleme işleminden sonra saf su ile durulandı. Si alttaşlarını kurutmak için en yüksek kalitede azot (N) gazı kullanıldı. Cam alttaşların temizleme işleminde sabunlu sünger yardımıyla su altında dikkatli bir şekilde temizlendi ve deiyonize su ile durulandı. Daha sonra izopropanol alkol içerisinde ultrasonik banyoda yaklaşık 10 dakika boyunca bekletildi ve temizleme işleminden sonra saf su ile durulandı. Azot (N) gazı ile cam alttaşlar kurutuldu. Alttaş temizleme işlemleri yapıldıktan sonra alttaşlar eş-püskürtme sistemine kaplam işlemi için yüklendi.

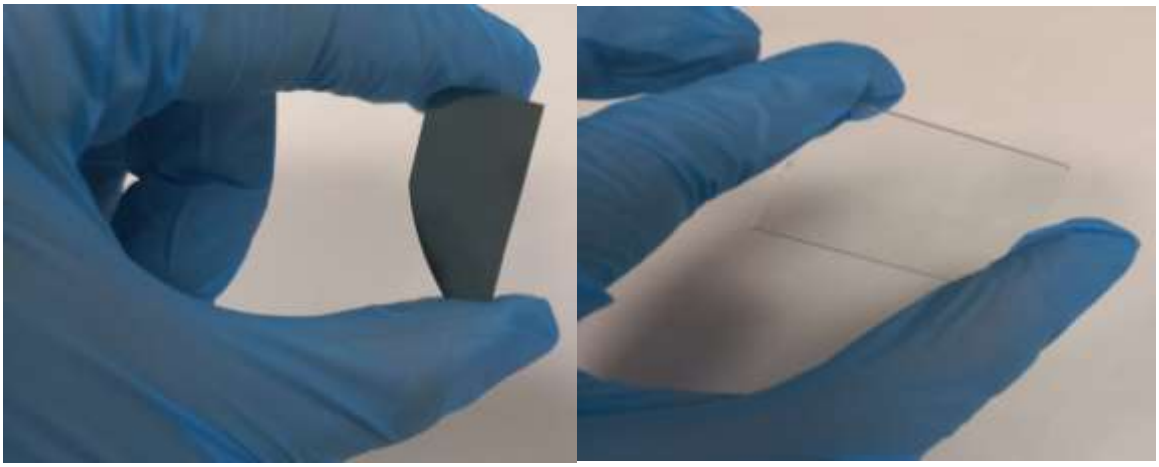
5.1.2. MgO ince filmlerin eş-püskürtme sistemi ile üretimi

Bu tez çalışmasındaki MgO ince film kaplamaları için RF magnetron eş-püskürtme sistemi kullanılarak oda sıcaklığında kaplama işlemi gerçekleştirildi. Kaplama prosedürü sırasında %99,99 saf yığın MgO hedefi kullanıldı. Cam ve n-Si alttaşlar, ortam sıcaklığında 100 nm kalınlığında bir MgO tabakası ile kaplandı. MgO ince filmlerin kaplama parametre değerleri Çizelge 5.1'de verildi.

Çizelge 5.1. MgO ince filmlerin kaplama parametre değerleri

Numune Kodu	Film Kalınlığı (nm)	Temel Basınç (Torr)	Kaplama Basıncı (mTorr)	RF Gücü (W)	Alttaş Sıcaklığı (°C)
CTS 1748	100	$2{,}84 \times 10^{-6}$	5	100	Oda sıcaklılığı

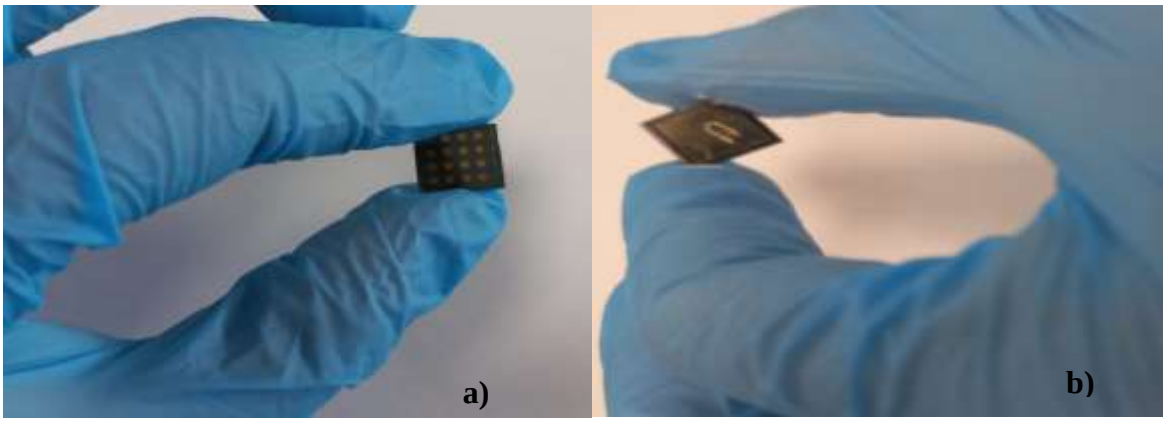
Eş-püskürtme sistemi 10^{-6} Torr basınç değerine ulaşır. Kaplama işleminin yapılması için argon gazı basıncı 5 mTorr, dönüş hızı 5 rpm ve RF gücü 100 W'a ayarlandı. İnce film kaplama işlemi boyunca kaplama basıncı, dönüş hızı, RF gücü ve hedef ile alttaş arası mesafeler sabit kaldı. Üretilen MgO ince filmleri Veeco-Dektak 150 Yüzey Profilometresi ile kalınlıkları ölçüldü ve hedef kalınlık olan 100 nm kalınlığa ulaşıldığı görüldü. Üretilen MgO ince filmlerin fotoğrafı Resim 5.1'de verildi.



Resim 5.1. Kaplanan MgO ince filmler

5.2. Kontak Oluşumu

Üretilen MgO ince filmleri eşit 1x1 cm yüzey alanına sahip olacak şekilde bölündü. Kesilen numuneleri izopropanol alkol ile temizlenerek azot (N) gazı ile kurutuldu. İlk önce ince filmlere arka kontak almak için termal buharlaştırma sistemine yüklendi. İnce filmlerin arkasına $3{,}20\times10^{-6}$ Torr basınçta, oda sıcaklığında, %99,999 saflıktaki altın (Au) metali biriktirildi. İnce filmin arka yüzeyinde oluşan katman 200 nm kalınlığındadır. Kontağın yüzeye iyice tutunması için hızlı tavlama sisteminde (RTA) 300 $^{\circ}$C'de 1 dakika tavlandı. Daha sonra ön kontak için ince filmlerin yüzeyine 2 mm çapa sahip gölge maskesi yerleştirilerek termal buharlaştırma sistemine yüklendi. İnce filmlerin ön tarafına $7{,}89\times10^{-6}$ Torr basınçta, oda sıcaklığında, 200 nm kalınlıkta altın (Au) metaliyle Schottky kontaklar alındı. Böylece diyot fabrikasyon işlemleri tamamlanmış oldu (Resim 5.2).



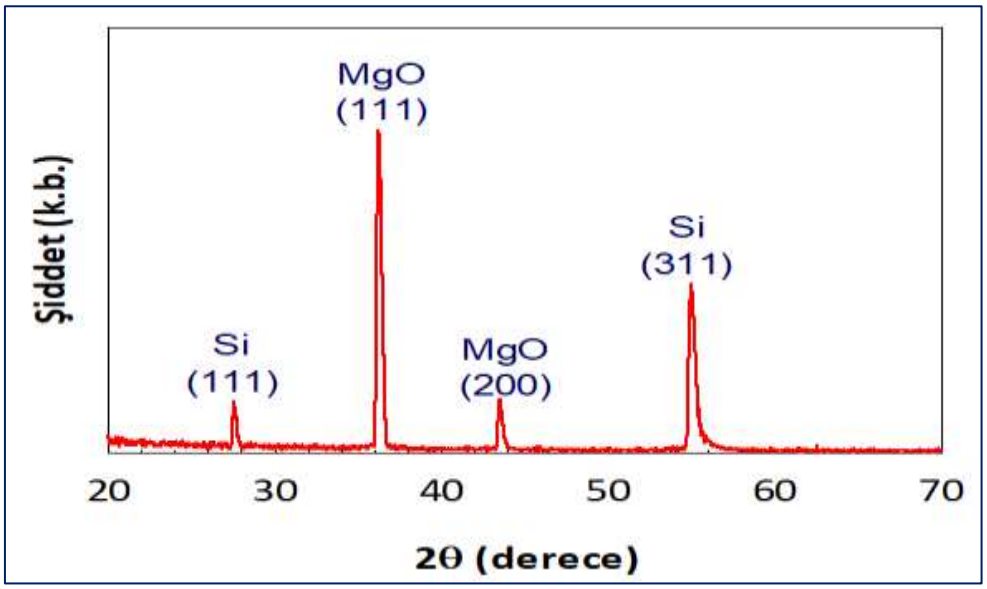
Resim 5.2. a) MgO ince film numunenin Schottky kontaklar alınmış görünümü b) Omik kontaklar alınmış görünümü

5.3. Karakterizasyonlar

Bu tez çalışmasında cam ve n-Si alttaş üzerinde MgO ince filmler üretmek için eş püskürtme tekniği kullanıldı. Üretilen MgO ince filmler, bir X-ışını kırınım cihazı (XRD) kullanılarak yapısal olarak analiz edildi. Yüzey morfolojisini analiz etmek için atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanıldı. MgO ince filmlerin optik incelemesi için Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve UV-Vis spektrometresi kullanıldı. Elektriksel analiz için I-V ve C-V sistemleri ile elektriksel özellikleri incelendi.

5.3.1. XRD analizi

100 nm kalınlığında kaplanan MgO ince filmleri Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki XRD laboratuvarında yer alan 1,54178 Å dalga boyuna sahip $CuK_{\alpha 1}$ kaynaklı XRD cihazı ile 20-70° dereceleri (2θ) arasında ve 0,05 derecelik adımlı tarama yaparak yapısal analizleri gerçekleştirildi. X-ışını kırınımı sistemi malzemelerin kristal yapılarını ve atomik özelliklerini incelemeyi sağlayan yaygın yapısal analiz tekniğidir. Şekil 5.2'de sunulan MgO ince filmin XRD deseninde kırınım pikleri 36,29°'de (111) ve 43,55°'de (200) olarak bulundu. Numunenin kübik kristal yapıya sahip olduğu tespit edildi (JPDS Card No.00-045-0946). Şekil 5.2'de görüldüğü gibi (111) miller indisli düzlemine karşılık gelen pik daha keskin, dar ve şiddetlidir.



Şekil 5.2. MgO ince filmin XRD deseni

MgO ince filmin yapısal özelliklerini belirlemek için filmlerin tane boyutu, pik yarı genişliği (FWHM) ve dislokasyon yoğunluğu değerlerinden belirlendi. Tane boyutu

$$D = \frac{k\lambda}{B\cos\theta} \tag{5.1}$$

eşitliği ile hesaplandı. Burada λ X-ışınının dalgaboyunu ve B tam pik yarı genişliği ifade etmektedir. k değeri 0.9 olarak alınan sabit ve θ Bragg kırınım açısıdır.

Parçacık boyutu (D) tarafından verilen filmdeki dislokasyon yoğunluğu (δ),

$$\delta = \frac{n}{D^2} \tag{5.2}$$

ifade edilmektedir. MgO ince filmlerindeki mikrogerilim (ε)

$$\varepsilon = \left(\frac{\lambda}{D\cos\theta} - B\right)\frac{1}{\tan\theta} \tag{5.3}$$

ile verilir.

Film için kırınım desenindeki belirlenen pik konumları (2θ), FWHM değerleri (B), hesaplanan tane boyutu (D) değerleri, dislokasyon yoğunluğu, mikrogerilim ve gerilme parametreleri Çizelge 5.2'de sunulmaktadır.

Çizelge 5.2. MgO XRD analizinde hesaplanan parametreleri

hkl	2θ (˚)	FWHM (˚)	Tanecik Boyutu (nm)	Örgü sabiti "α" (Å)	Dislokasyon Yoğunluğu (10^{11} cm^{-2})	Mikro-gerilim (ε) (10^{-3})	Gerilme (**σ**)
[111]	36,29	0,3478	24,03	4,28	1,731	2,059	80,29
[200]	43,55	0,3198	26,75	4,15	1,398	1,552	91,75

Şenaslan ve diğerleri, MgO ince filmin XRD deseninde kırınım pikleri 37,40° ve 43,55°'de gözlemlenmiştir [14]. Böylece XRD analiz sonuçları literatür ile doğrulanmıştır.

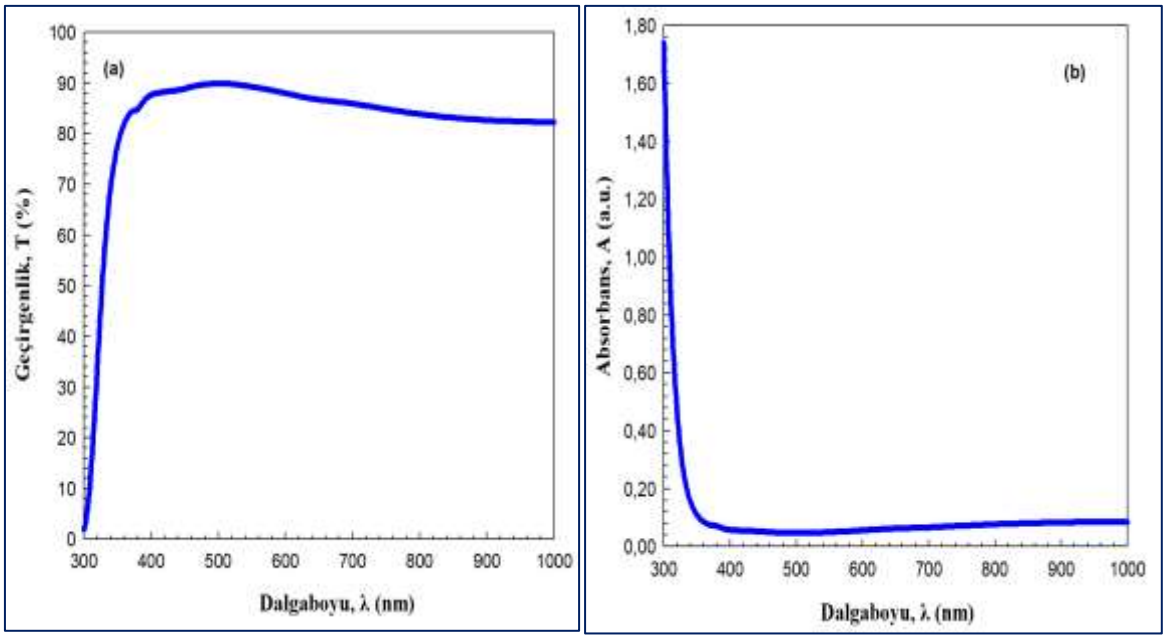
5.3.2. Optik karakterizasyon analizi

UV/VIS analiz

Malzemelerin opto-elektronik özelliklerini karakterize etmek için ultraviyole görünür (UV-VIS) ve kızılötesi (IR) gibi optik spektroskopi teknikleri kullanılır. UV-VIS ve kızılötesi spektroskopi, elektromanyetik spektrumun 100 nm (vakum UV) ile 20000 nm (IR) arasındaki kısmını tanımlar. UV-VIS spektrofotometresi, elektromanyetik radyasyonun dalga boyuna bağlı olarak malzeme tarafından iletilen, emilen ve yansıtılan ışığı ölçmek için kullanılır [74].

Bu çalışmada MgO ince filmin optik bant aralığı, soğurma katsayısı, kırılma indisi ve optik iletkenliği gibi optik parametreler iletim ve soğurma verilerinden belirlendi.

Şekil 5.3 (a) ve (b)'de, MgO filminin sırasıyla 300-1000 nm spektral aralığında optik geçirgenliğini (T) ve absorbans (A) spektrumunu gösterir. Şekil 5.3 (a)'da görüldüğü gibi, dalga boyu arttıkça geçirgenlik artar ve ~500 nm'de maksimum değere ulaşır. Daha sonra dalga boyunun artmasıyla geçirgenlik değeri azalmaktadır. Ayrıca bu spektrum, MgO filmin geçirgenlik değerinin görünür ışık bölgesinde %90 civarında olduğunu göstermiştir. Bu sonuç MgO filminin oldukça şeffaf olduğunu göstermektedir. Şekil 5.3 (b)'den filmin maksimum optik absorbansının UV bölgesinde meydana geldiği, VIS/yakın kızılötesi (NIR) bölgesinde ise değerinin düşük ve nispeten sabit olduğu görülmektedir. Ayrıca dalga boyunun artmasıyla absorbans değeri azalır. Daha yüksek bir foton enerjisinde, daha düşük dalga boyuna sahip ışık emilir. MgO ince filmi için elde edilen benzer sonuçlar daha önce yayınlanmış makalelerde rapor edilmiştir [75-79].

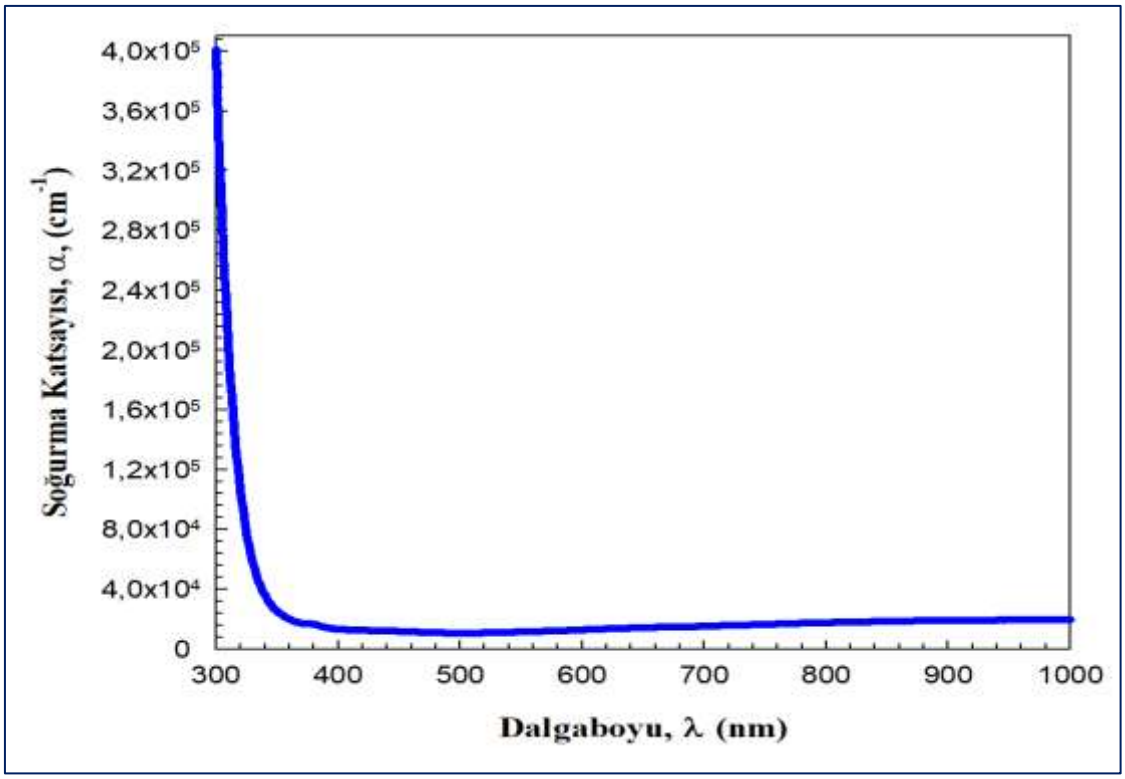


Şekil 5.3. Dalgaboyunun (λ) bir fonksiyonu olarak MgO ince filmin optik (a) iletim (b) absorbans (soğurma) spektrumu

Soğurma katsayısı (α), elektromanyetik radyasyonun bir malzemeden geçerken yoğunluğundaki azalmayı ifade eder. İletim (T) veya absorbans (A) verilerinden, soğurma katsayısı (α), sırasıyla aşağıda [80-84] verilen ilişkiler kullanılarak hesaplanır:

$$\alpha = \frac{1}{d}\ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad \text{or} \quad \alpha = \frac{2.303*A}{d} \tag{5.4}$$

Burada d, MgO film kalınlığıdır (~100 nm). Dalga boyunun (λ) bir fonksiyonu olarak absorpsiyon katsayısının (α) grafiği Şekil 5.4'de gösterilmektedir. Absorpsiyon katsayısının absorbansa benzer davranış sergilediği ve dalgaboyu arttıkça değerinin azaldığı görülmektedir. UV bölgesindeki α değeri ~10^5 cm^{-1} olarak bulunmuştur. Bu yüksek absorpsiyon katsayısı, MgO filminin yüksek UV absorpsiyonuna sahip olduğunu gösterir. Ayrıca soğurma katsayısının değeri malzemenin valans bandı ile iletim bandı arasındaki doğrudan ve dolaylı geçişler hakkında bilgi verir. $\alpha>10^4$ cm^{-1} için bu, malzemede doğrudan geçişin gerçekleştiği anlamına gelir. Ancak dolaylı geçiş $\alpha<10^4$ cm^{-1} için gerçekleşir [85-89]. Elde edilen α değerleri 10^4 cm^{-1}'den büyüktür. Bu durum hazırlanan MgO filminin direkt elektronik geçiş sergilediğini yani direkt bant aralığına sahip olduğunu göstermektedir [77, 90-93].

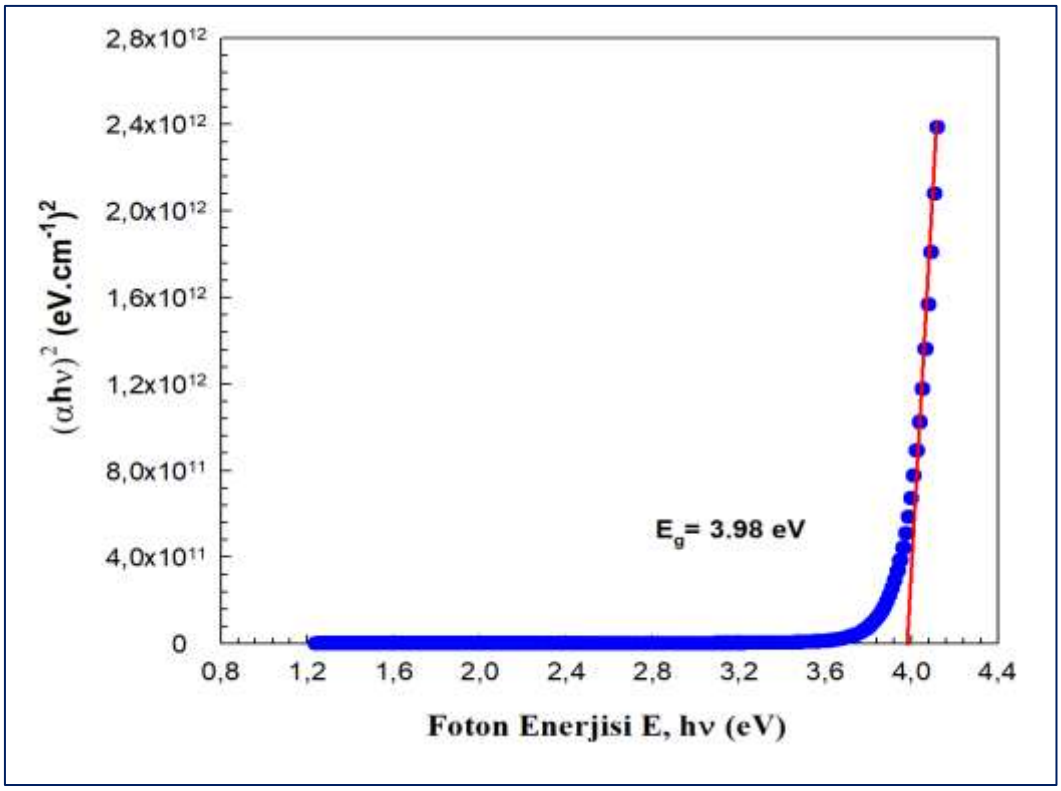


Şekil 5.4. Absorpsiyon katsayısının (α) λ'nın bir fonksiyonu olarak değişimi

Aynı zamanda optik bant aralığını (E_g) belirlemek için absorpsiyon katsayısı kullanılır. Böylece hazırlanan filmin E_g değeri Tauc [94] tarafından sunulan

$$\alpha h\nu = \alpha_0 \left(h\nu - E_g\right)^m \tag{5.5}$$

eşitliği kullanılarak tahmin edilmiştir. Burada α_0 bir sabittir ve hν gelen fotonun enerjisidir. m, malzemenin elektronik geçiş türüne bağlı olarak sabit bir parametredir ve 1/2, 3/2, 2 ve 3 gibi değerler alır. m=1/2 ve m=3/2 ise izin verilen ve yasaklananları ifade eder. Doğrudan geçiş, sırasıyla m=2 ve m=3, sırasıyla izin verilen ve yasaklanmış dolaylı geçişi ifade eder. İzin verilen doğrudan geçişe (m=1/2) sahip MgO filmi için $(\alpha h\nu)^2$, foton enerjisine (hν) karşı çizilir. Film için $(\alpha h\nu)^2$'ye karşı hν'nın Tauc grafiği Şekil 5.5'te gösterilmektedir. Bu grafiğin doğrusal kısmının hν ekseni üzerindeki kesişme E_g'nin büyüklüğünü verir. Filmin hesaplanan direkt (doğrudan) optik bant aralığı 3,98 eV olarak bulunmuştur. Bu sonuç literatürde bildirilen sonuçlarla tutarlıdır [77, 90-93].

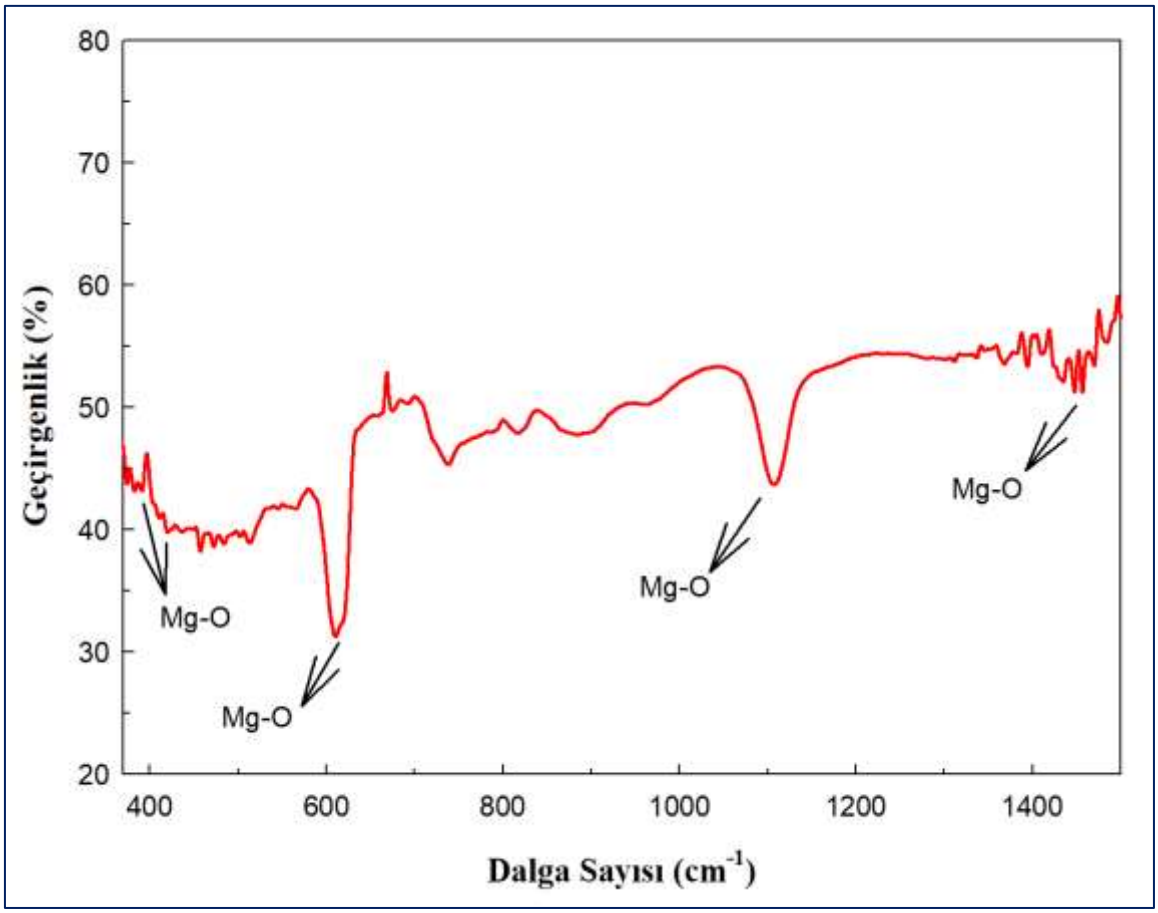


Şekil 5.5. $(\alpha h\nu)^{2'}$nin E(hν) ile değişimi

Şenaslan ve diğerleri, MgO ince filmlerin band aralığını 4,07-4,14 eV olarak bulmuştur. Taşer ve diğerleri, ince filmin band aralığı 4 eV olarak bildirmiştir. Böylece bu sonucun literatürde bildirilen sonuçlarla tutarlıdır [77, 90-93].

FTIR analizi

Yarıiletken malzemelerdeki kimyasal bağları ve fonksiyonel grupları incelemek için FTIR cihazında analiz yapılmaktadır. n-Si alttaş üzerine üretilen MgO ince filmlerinin kimyasal bağ yapısını incelemek için FTIR spektrometrede ölçümleri yapıldı. Üretilen ince filmin 370-1500 cm^{-1} dalga sayısı aralığında geçirgenlik ölçümü alındı. MgO ince filmin FTIR spektrumları Şekil 5.6'da verildi.

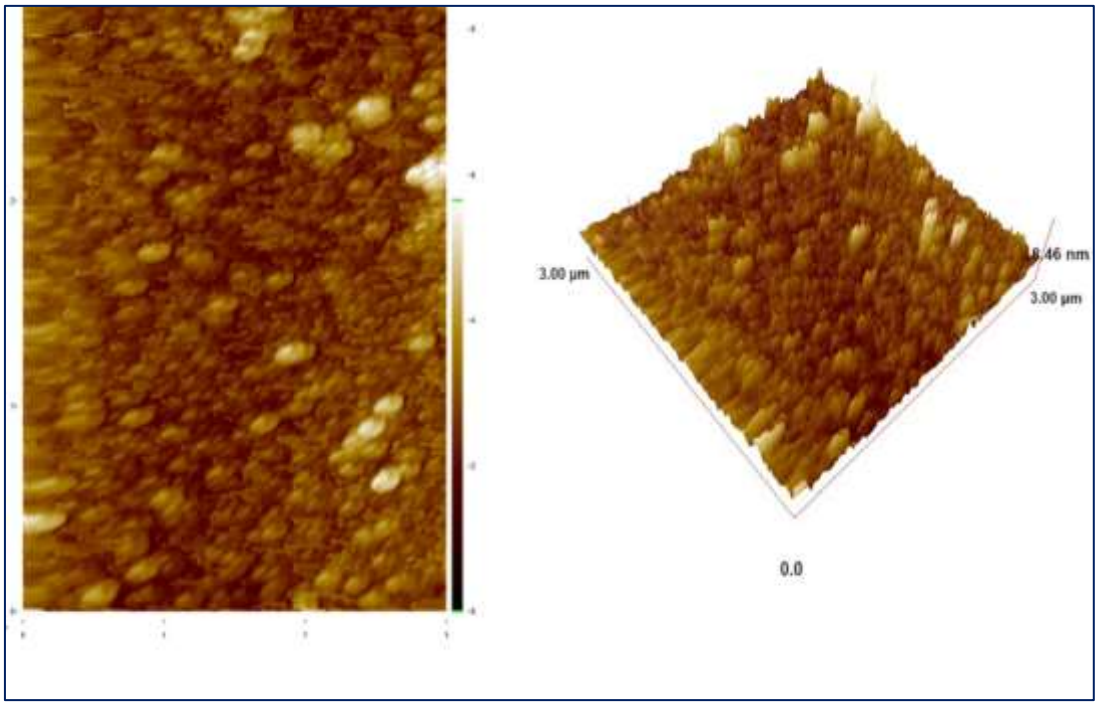


Şekil 5.6. Geçirgenlik-dalga sayısı grafiği

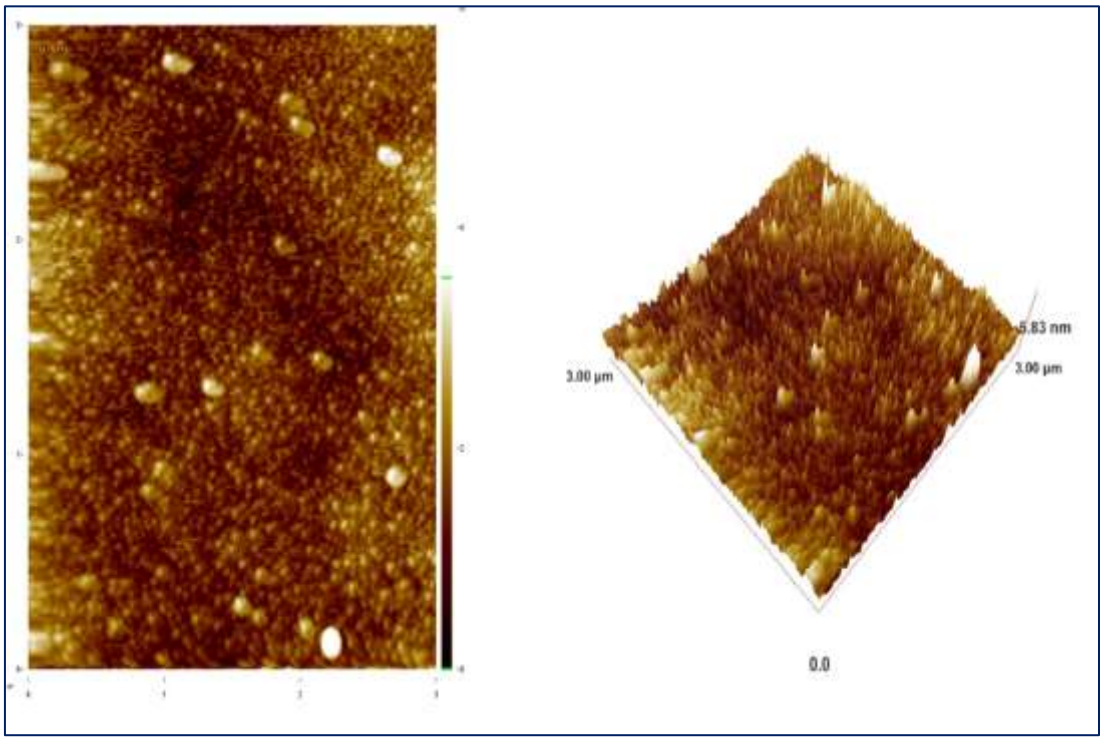
FTIR geçirgenlik spektrumu incelendiğinde, titreşim bantları 391, 610, 1105 ve 1445 cm^{-1} değerlerinde görünür ve Mg-O bağının esneme (germe, stretch) özelliğinden kaynaklanır. Bu aralıklarda Mg-O etkileşimlerinden dolayı güçlü absorpsiyon gösterir [95-98].

5.3.3. Morfolojik analiz

100 nm kalınlığında olan ve n-Si ve cam alttaşları üzerine kaplanan ince filmlerin AFM sistemi ile yüzey morfolojisi analiz yapıldı. MgO ince filmler 3x3 μm^2 tarama alanında ve oda sıcaklığında morfolojik analizi yapıldı. MgO ince filmlerin iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) topografik görüntüleri Resim 5.3'de gösterildi.



Resim 5.3. Cam alttaş üzerine büyütülen MgO ince filmin 2D ve 3D topografik görüntüleri



Resim 5.4. n-Si alttaş üzerine büyütülen MgO ince filmin 2D ve 3D topografik görüntüleri

n-Si ve cam alttaşlar üzerinde üretilen MgO ince filmlerin yüzey pürüzlülüğü sırasıyla 0,51 ve 0,58 nm'lik ortalama karekök değerlerine (RMS) sahiptir.

5.3.4. Elektriksel karakterizasyon analizi

Akım- gerilim (I-V) analizi

Hazırlanan Au/MgO/n-Si'nin ters doyum akımı (I_0), idealite faktörü (n), sıfır öngerilim bariyer yüksekliği (Φ_b), seri direnci (R_s) ve arayüzey durumu yoğunluğu (N_{ss}) gibi diyot parametreleri belirlendi. Si diyotta standart termiyonik emisyon (TE) yöntemi kullanıldı. TE teorisinin temeli akım-gerilim (I-V) ölçümlerine dayanmaktadır. Bu yöntemde, $V-IR_s \geq 3kT/q$ koşulu için, bir diyottan ileri polarizasyonda akan akım

$$I = I_0 \left[\left(\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right) \right] \tag{5.6}$$

eşitliği ile verilebilir [99, 100].

$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{kT} \right) \tag{5.7}$$

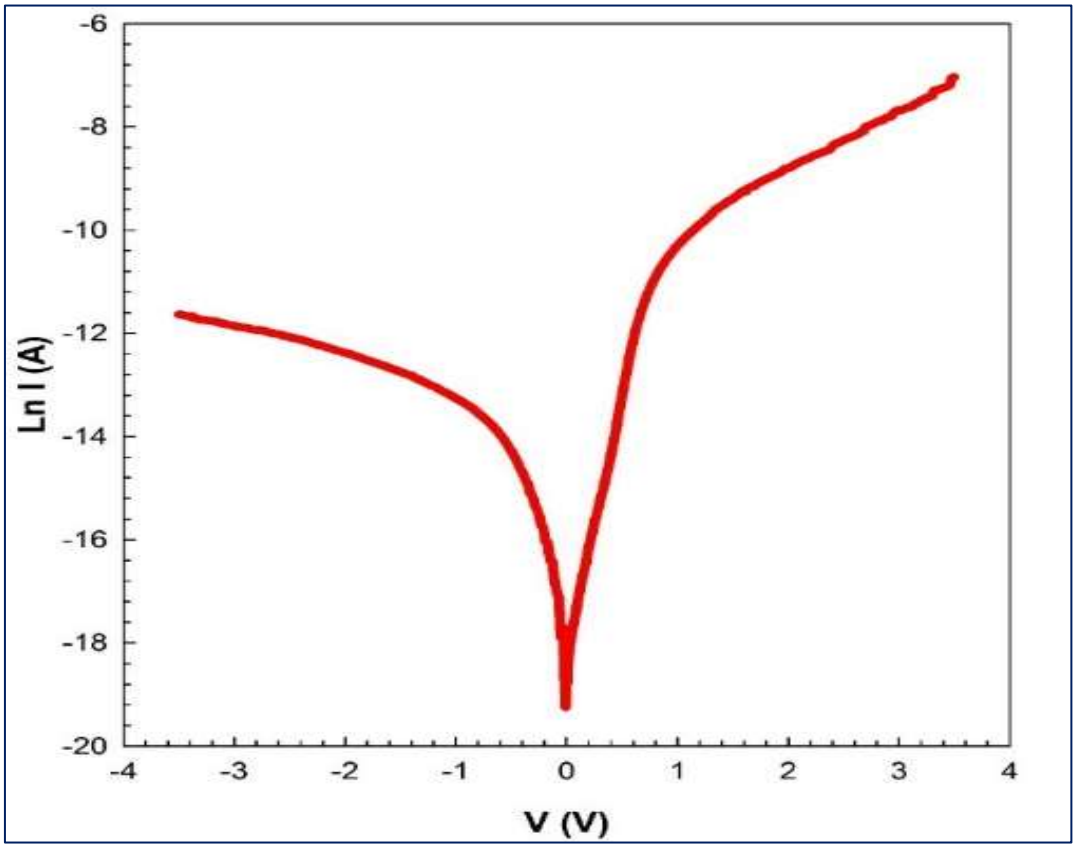
denklemi ile tanımlanan I_0, Ln(I) eğrisinin V=0'daki düz çizgi kesişme noktasından çıkarılır.

Burada n-Si için 112 $A/cm^2.K^2$'ye eşit olan A*, etkin Richardson sabitidir ve Φ_b sıfır öngerilimli bariyer yüksekliğidir.

$$\eta = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d(\mathrm{Ln}\, I)} \right) \tag{5.8}$$

eşitliği ile verilen η, Ln(I)-V eğrisinin eğiminden elde edilir. Au/MgO/n-Si diyotun oda sıcaklığında ileri ve geri polarizasyon Ln(I)-V grafiği Şekil 5.7'de gösterilmektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi diyotun I-V karakteristik eğrisi doğrusal olmayan bir davranış sergilemektedir. Bu, arayüz durumlarından ve seri dirençten kaynaklanır. Özellikle seri direnç, ileri yönlü I-V eğrisinin aşağı doğru bükülmesinden sorumludur. Sırasıyla Denklem (5.7) ve Denklem (5.8)'ten hesaplanan Φ_b ve η değeri Çizelge 5.3'de sunulmaktadır. Bu

çizelgede gösterildiği gibi η'nin büyüklüğü 1'den büyüktür. Bunun nedeni seri direnç etkisi, ara katmanların varlığı, bariyer homojensizlikleri ve arayüzey tuzaklarıdır [101, 102].



Şekil 5.7. Au/MgO/n-Si diyotun Ln(I)-V grafiği

Çizelge 5.3. Au/MgO/n-Si diyotun oda sıcaklığında elde edilen I_0, η, Φ_b ve R_s değerleri

Kullanılan Yöntem	I_0 (A)	η	Φ_b (eV)	R_s (kΩ)
Termiyonik Emisyon (TE)	$1.23x10^{-8}$	3.79	0.76	-
Norde	-	-	0.79	5.36

Diyotun Φ_b ve R_s değerlerini belirlemek için alternatif bir yöntem olarak Norde yaklaşımı [93] kullanıldı. Bu yöntemde Norde fonksiyonu F(V) olarak tanımlanır ve şu şekilde verilir:

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q}\left[\ln\left(\frac{I(V)}{AA^{*}T^{2}}\right)\right] \tag{5.9}$$

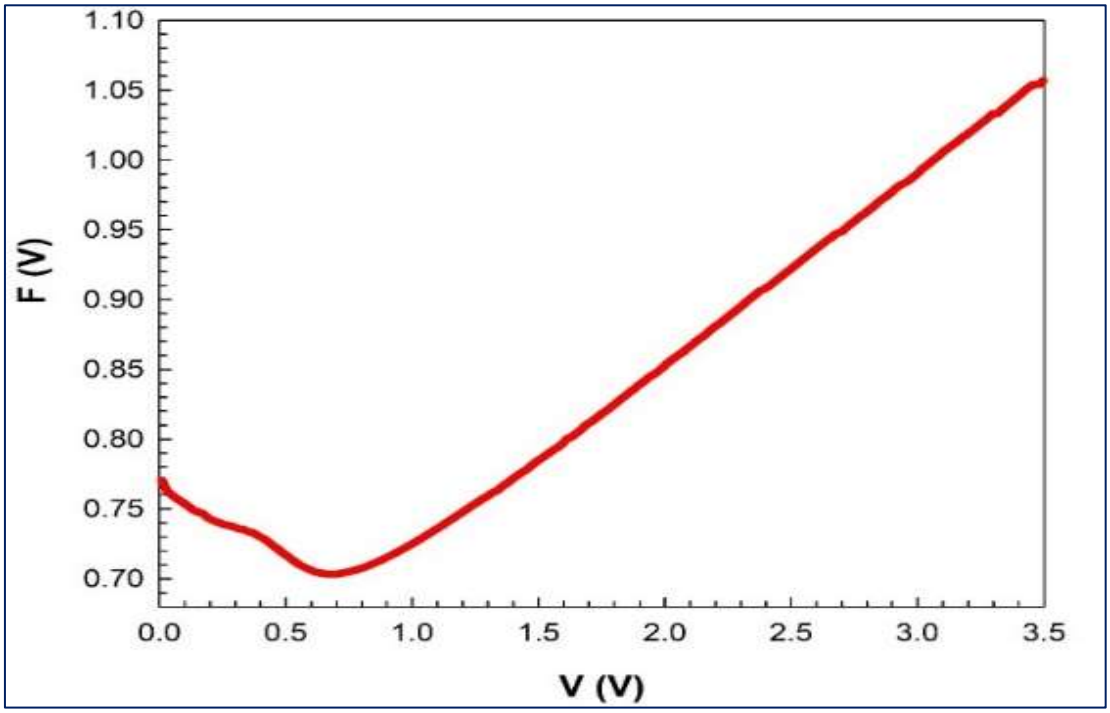
burada γ, n'nin elde edilen değerinden daha büyük bir tam sayıyı ifade eder. Φ_b ve R_s değerleri aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplandı.

$$\Phi_b = F(V_{min}) + \frac{V_{min}}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (5.10)$$

$$R_s = \frac{kT(\gamma - n)}{qI_{min}} \quad (5.11)$$

Burada $F(V_{min})$, F(V) eğrisinin minimum değeridir. V_{min} ve I_{min}, $F(V_{min})$'e karşılık gelen minimum gerilim ve akım değerleridir. Şekil 5.8, F(V)-V grafiğini göstermektedir. Bu grafiğin $F(V_{min})$'e karşılık gelen minimum değeri gösterdiği açıktır.

Hesaplanan Φ_b ve R_s değerleri Çizelge 5.3'de verildi. TE ve Norde yöntemleriyle elde edilen Φ_b değerlerinin birbirine çok yakın olduğu bulundu [94-98].

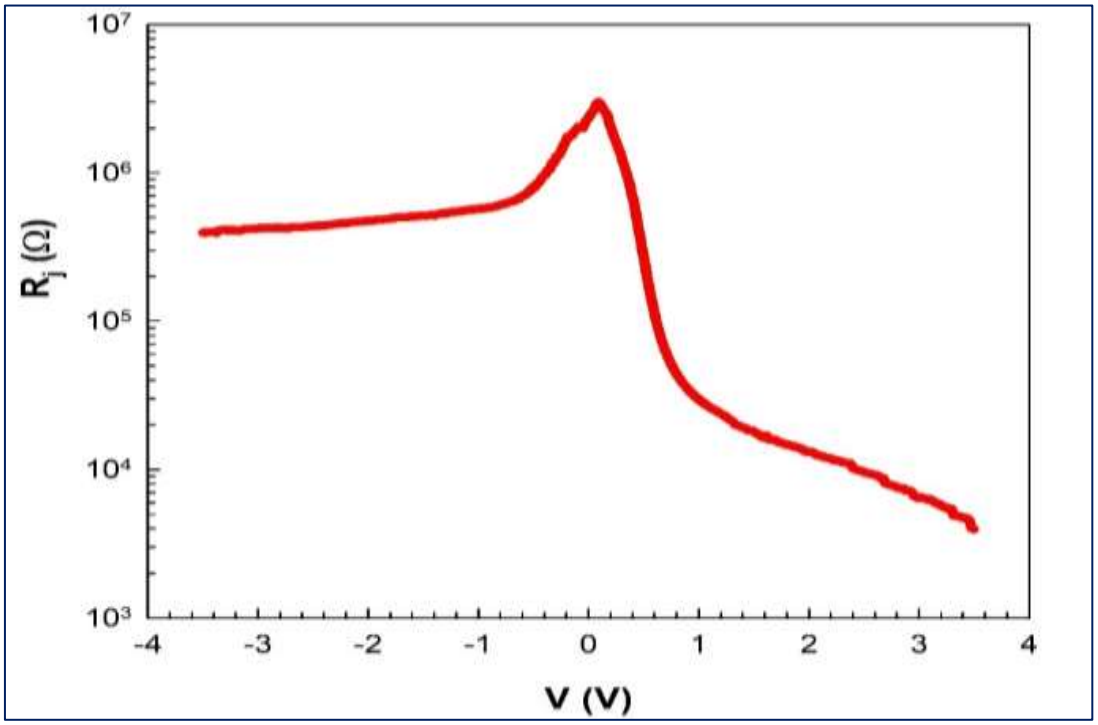


Şekil 5.8. Au/MgO/Si aygıtın F(V)-V grafiği

Ayrıca diyotun şönt direnci (R_{sh}) ve R_s parametrelerini çıkarmak için Ohm kanunu (eklem direnci, R_j, = dV/dI) kullanıldı [94, 98, 99].

Schottky diyotları çok yüksek R_{sh}'ye ve çok küçük R_s'ye sahip olmalıdır. Yüksek R_{sh} kaçak akımın azalmasına neden olur. Bu yaklaşımda, R_{sh} ve R_s'nin değeri sırasıyla aynı ters ve ileri eğilimde hesaplanan bağlantı direnci değerine karşılık gelir.

Şekil 5.9'da eklem direncinin (R_j) gerilime karşı grafiğini göstermektedir. -3,5 V ve +3,5 V'de R_{sh} ve R_s'nin hesaplanan değeri sırasıyla 0,39 MΩ ve 3,96 kΩ'dur.



Şekil 5.9. Au/MgO/Si aygıtın R_j–V grafiği

Arayüz durumları/tuzaklar yarıiletken cihaz performansını düşüren önemli parametrelerden biridir. İleriye dönük I-V verilerinden türetilen arayüz durum yoğunluğu (N_{ss}), Card ve Rhoderick [100] tarafından aşağıdaki şekilde verilmektedir:

$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q}\left[\frac{\varepsilon_i}{\delta}(n(V) - 1) - \frac{\varepsilon_s}{W}\right] \tag{5.12}$$

burada ε_i ve ε_s sırasıyla ara katman malzemesinin ve yarıiletkenin geçirgenliğidir. δ ve W sırasıyla ara katmanın kalınlığı ve tükenme katmanının genişliğidir.

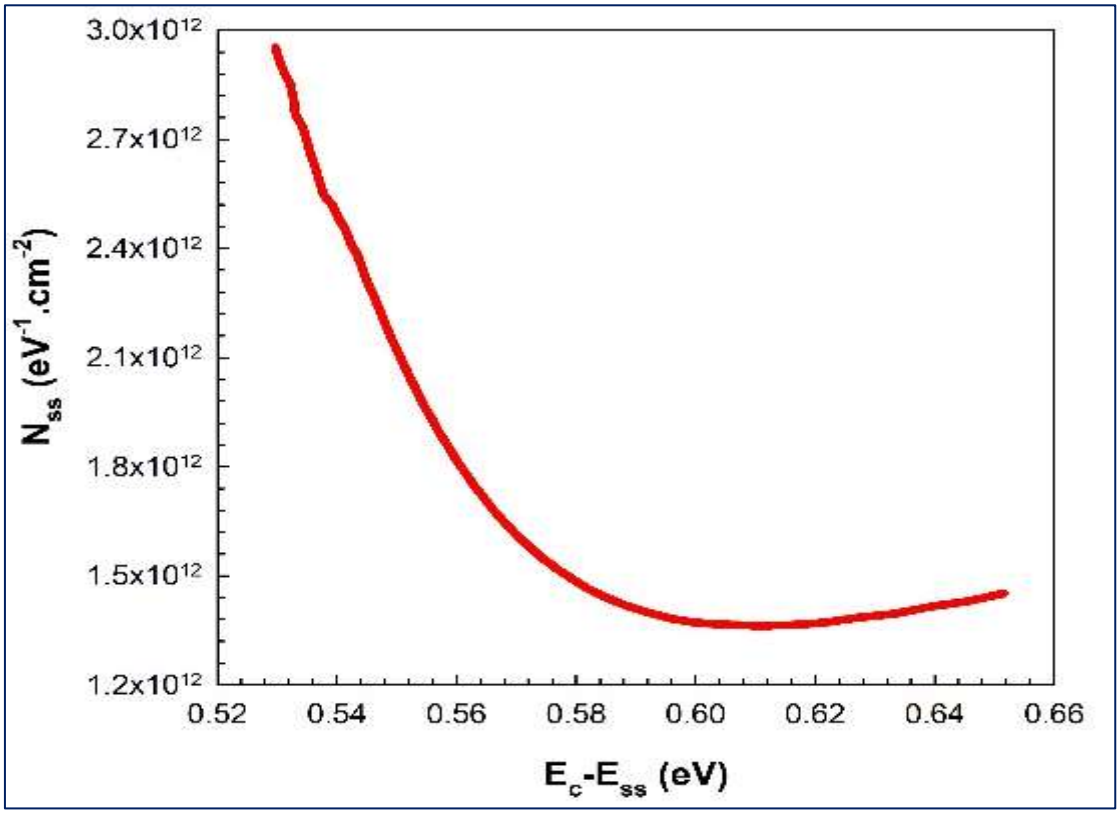
n-tipi yarıiletken için iletim bandının tabanına göre yüzey durum enerjisi (E_{ss}) şu şekilde tanımlanır:

$$E_c - E_{ss} = q(\Phi_e - V) \tag{5.13}$$

Etkin bariyer yüksekliği Φ_e şu şekilde tanımlanır:

$$\Phi_e - \Phi_b = \left(1 - \frac{1}{n(V)}\right)(V) \qquad (5.14)$$

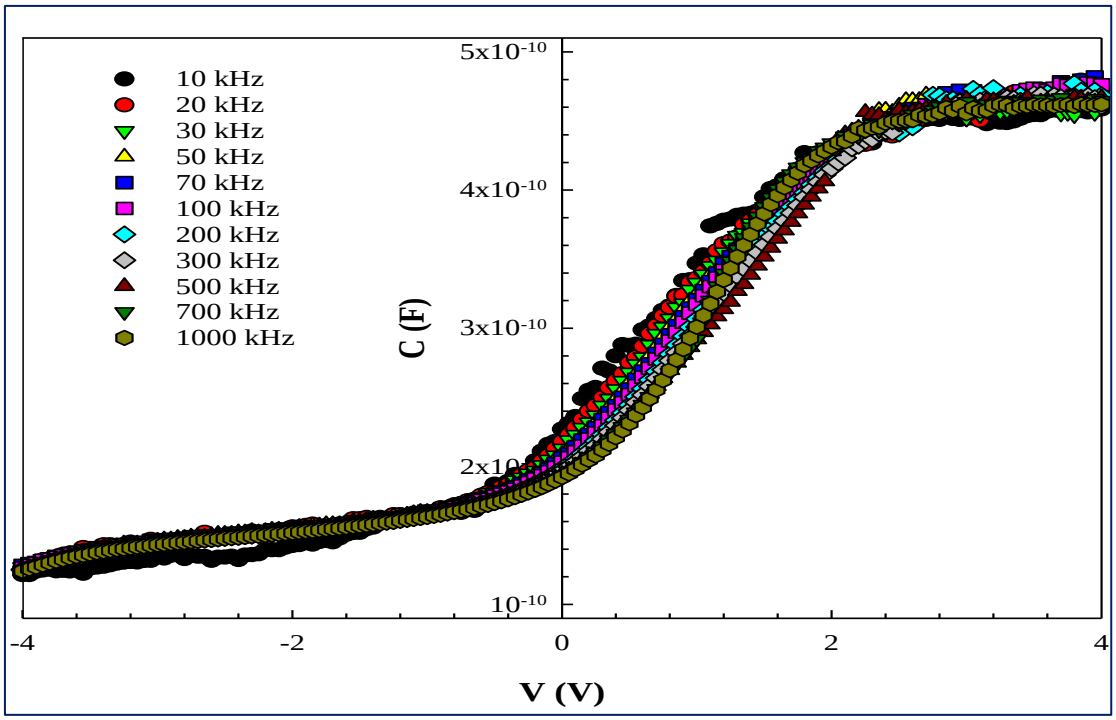
Şekil 5.10'da diyotun arayüz/yüzey durum yoğunluğunun enerji dağılım profilini göstermektedir. Enerjinin artmasıyla N_{ss} değerinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca, Nss eğrisi n-Si'nin yasak enerji band aralığından iletim bandının altına doğru üstel olarak yükselmektedir [100, 101, 107, 109-112].



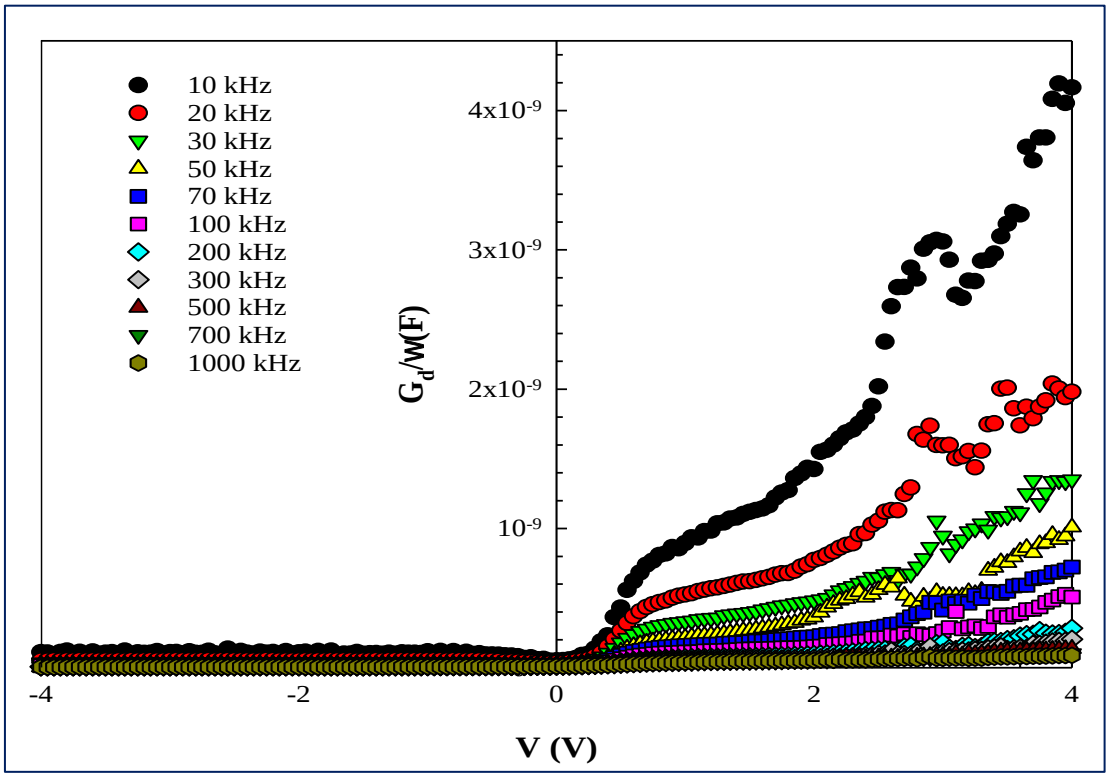
Şekil 5.10. Nss'nin Ec-Ess'e karşı grafiği

Kapasitans- Gerilim (C-V) analizi

Au/MgO/n-Si diyotun oda sıcaklığında 10kHz–1000 kHz frekans aralığında ve -4 V ile 4 V voltaj aralığında C-V ve G/ω-V ölçümleri yapıldı. Ölçüm sonuçlarından elde edilen C-V grafikleri Şekil 5.11' de verildi.



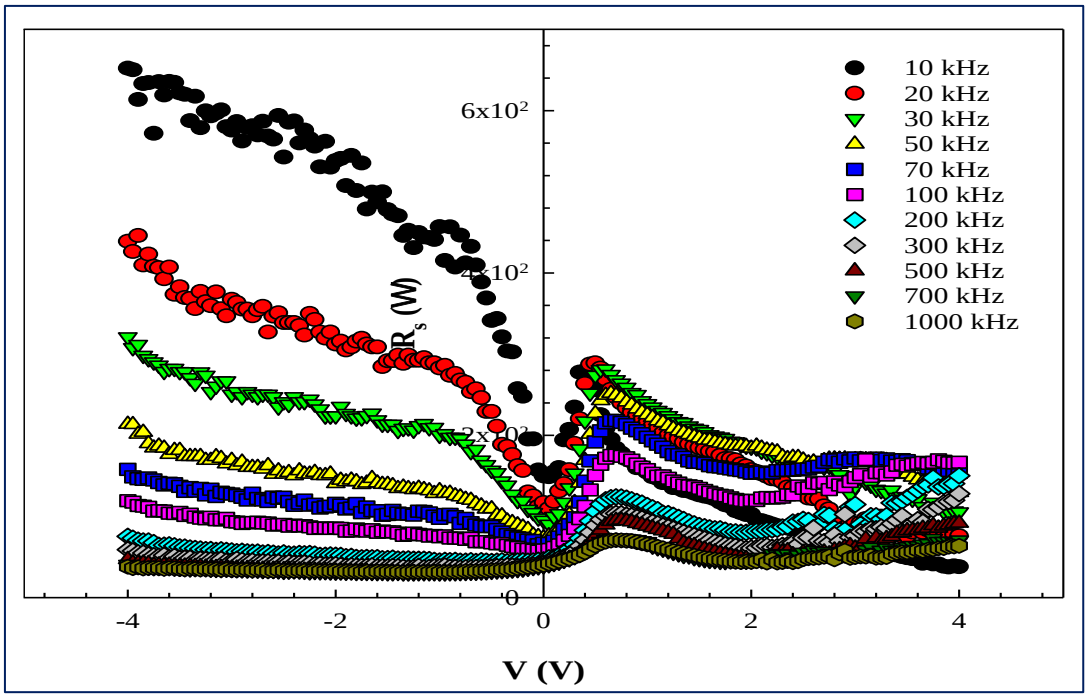
Şekil 5.11. C-V grafiği



Şekil 5.12. G_d/w-V grafiği

Şekil 5.12'de G_d/ω-V grafiği gösterilmektedir. Frekansın ve uygulanan ön gerilimin hem kapasitans hem de iletkenlik değerlerini etkilediği açıktır. İletkenlik ve kapasitans değerlerinin frekans arttıkça düştüğü gözlenmektedir. Grafiklerdeki eğrilerde pik değeri artan frekans ile azaldığı görülmektedir. Kapasitansın frekans bağımlılığından arayüzey durumları (N_{ss}) sorumludur. Arayüz durumları, AC sinyalini takip ederek düşük frekanslarda kapasitansa katkıda bulunabilir. Arayüz durumlarının yüksek frekanslarda kapasitans üzerinde çok az etkisi vardır çünkü bunlar AC sinyalini takip edememektedir. Böylece kapasitansa katkı sağlamamaktadır. İnce arayüz katmanlarına sahip metal-yarıiletken kontakların kontak kapasitesi, uygulanan AC sinyali 1000 kHz veya üzeri olduğunda arayüz durumları bir kontak kapasitesi üretemediğinden, yalnızca tüketim katmanındaki yüklerin hareketliliğine bağlıdır. Tükenim bölgesinde düşük ve orta frekanslarda arayüz durumları etki göstermektedir.

G/ω-V ve C-V özellikleri, seri direnç ve arayüz koşulları olduğunda doğrusal olmayan bir davranış gösterir. Metal temas noktalarının direnci, yarıiletkenin kütle direnci ve yarıiletken ile arka elektrot ve ön elektrot arasındaki temas direnci, yarıiletken aygıtların işlevselliğini etkileyen seri direnç kaynaklarıdır. Şekil 5.13'de R_s-V grafiği gösterilmiştir. Hesaplanan Rs değerlerinin artan frekansla azaldığı gösterilmiştir. Tuzaklanmış yükler, R_s'nin frekansla dalgalanması için bir açıklama sağlar. R_s-V eğrilerinde pozitif ve negatif gerilim alanlarında eş zamanlı iki tepe görüldü. Arayüzey durumlarının sürekli dağılımı, gözlemlenen bu tepe noktalarıyla ilişkilidir. Frekans arttıkça tepe gücü azalır.



Şekil 5.13. R_s-V grafiği

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında ilk olarak eş-püskürtme sisteminde RF güç kaynağı kullanılarak MgO ince film üretimi yapılmıştır. MgO hedef malzemesi kullanılarak oda sıcaklığında, n-Si ve cam alttaşlar üzerine 100 nm kalınlığında MgO ince filmler biriktirildi. MgO ince filmlerin kaplanması için, kullanımı kolay ekipman, ucuz maliyet, düşük sıcaklık, minimum kirlilik ve doğru kaplama kontrolü gibi faydaları nedeniyle eş-püskürtme yöntemi seçildi. Oluşturulan ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerini karakterize etmek için XRD, AFM, FTIR ve UV-Vis spektrometre ölçüm cihazları kullanıldı. Daha sonra üretilen MgO ince film üzerine metal kontaklar ile Schottky diyot fabrikasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

MgO ince filmin 1,54178 Å dalga boyuna sahip $CuK_{\alpha 1}$ kaynaklı XRD cihazı ile 20-70° dereceleri (2θ) arasında ve 0,05 derecelik adımlı tarama ile XRD analizi gerçekleştirildi. XRD analiz sonucunda MgO ince filmin XRD deseninde kırınım pikleri 36.29°'de (111) ve 43.55°'de (200) olarak bulundu. Bu piklerden kristal yapının kübik olduğu tespit edilmiştir. Yapılan XRD analizin sonucundan MgO ince filmin başarılı bir şekilde büyütüldüğünü anlaşıldı.

MgO ince filmlerin AFM sistemi ile 3x3 μm^2 tarama alanında ve oda sıcaklığında morfolojik analizi yapıldı. İnce filmlerin 2D ve 3D topografik görüntüleri elde edildi. n-Si ve cam alttaşlar üzerinde üretilen MgO ince filmlerin yüzey pürüzlülüğü değerleri sırasıyla 0,51 ve 0,58 nm'lik ortalama karekök değerlerine (RMS) sahip olduğu gözlemlendi.

MgO ince filmlerin optik analizleri yapıldı. İnce filmin FTIR analizi için 365-1500 cm^{-1} aralığında geçirgenlik ölçümü alındı. FTIR geçirgenlik spektrumu incelendiğinde, titreşim bantları yaklaşık olarak 391, 610, 1105 ve 1445 cm^{-1} değerlerinde tepe noktaları görüldü. UV/VIS analizi sonucunda optik geçirgenlik görünür ışık bölgesinde %90 civarında olduğunu görüldü. Optik geçirgenlik sonuçları ile Tauc eğrisi elde edildi böylece MgO ince filmin enerji bant aralığı (E_g) bulundu. MgO ince filmin enerji bant aralığı değeri 3,98 eV olduğu ve bu ince filmlerin direkt bant aralığına sahip olduğu tespit edildi.

MgO ince filme Schottky diyot fabrikasyon çalışmaları gerçekleştirildi. Schottky diyot uygulamasında, arka kontak için filmin arka yüzeyine $3{,}20\times10^{-6}$ Torr basınçta 200 nm kalınlığında altın (Au) metali kaplandı. Hızlı tavlama sisteminde (RTA) 300 $^{\circ}$C 1 dk tavlandı ve böylece omik kontak oluştu. Üst kontak için ince filmin yüzeyine dairelerden oluşan gölge maskesi yerleştirildi ve termal buharlaştırma sistemi ile $7{,}89\times10^{-6}$ Torr basınçta, 200 nm kalınlıkta altın (Au) metaliyle Schottky kontaklar alındı. Böylece diyot fabrikasyon işlemi gerçekleştirilmiş olundu.

Üretilen Au/MgO/n-Si Schottky diyotun optoelektronik özelliklerini incelemek için akım-voltaj (I-V) ve kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri gerçekleştirildi. I-V ölçüm sonucu kontakların Schottky davranışı gösterdiği anlaşıldı. Elektriksel parametrelerin belirlenmesi için I-V ölçüm analizinden Termoiyonik Emisyon Teorisi ve Norde metotları uygulandı. Bu metotlar sonucunda idealite faktörü $\eta= 3{,}79$, bariyer yüksekliği $\Phi_{b0}= 0{,}76$ eV ve seri direnç $R_s= 5{,}36\ x10^3\ \Omega$ olarak hesaplandı. C-V analizi ile 10-1000 kHz arasında C-V, G_d/W-V ve R_s-V grafikleri elde edildi. Böylece frekans değişimine göre karşılaştırma yapıldı. İletkenlik ve kapasitans değerlerinin uygulanan ön gerilim ve frekanstan etkilendiği açıktır. Frekans arttıkça kapasitans ve iletkenlik değerlerinin azaldığı bulunmuştur. Grafiklerin eğrileri, frekans arttıkça tepe değerinin düştüğünü göstermektedir. Kapasitansın frekans bağımlılığı arayüz durumlarından (N_{ss}) kaynaklanır. Hesaplanan R_s değerlerinin artan frekansla azaldığı görüldü.

Böylece üretilen MgO arayüzey tabakalı yarıiletken aygıtın elektronik ve optoelektronik özelliklerini incelendi. Au/MgO/Si yapısındaki Schottky diyotun iyi elektriksel parametrelere sahip olduğu anlaşıldı. Karakterizasyonlar sonucunda MgO ince filmin optoelektronik kullanımlara uygun bir malzeme olduğu sonucuna varıldı. Bu araştırmanın teknoloji açısından ülkemizde optoelektronik cihazların geliştirilmesinde büyük bir etki yaratması beklenilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Nilius, N. (2009). Properties of oxide thin films and their adsorption behavior studied by scanning tunneling microscopy and conductance spectroscopy. *Surface Science Reports*, 64(12), 595-659.

2. Norton, D. P. (2004). Synthesis and properties of epitaxial electronic oxide thin-film materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 43(5-6), 139-247.

3. Walia, S., Balendhran, S., Nili, H., Zhuiykov, S., Rosengarten, G., Wang, Q. H. and Kalantar-zadeh, K. (2013). Transition metal oxides–Thermoelectric properties. *Progress in Materials Science*, 58(8), 1443-1489.

4. Ukoba, K. O., Eloka-Eboka, A. C. and Inambao, F. L. (2018). Review of nanostructured NiO thin film deposition using the spray pyrolysis technique. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2900-2915.

5. Pejova, B. Grozdanov, I. (2006). Structural and optical properties of chemically deposited thin films of quantum-sized bismuth (III) sulfide. *Materials Chemistry and Physics*, 99(1), 39-49.

6. Lakshminarayan, N., Radhakrishnan, M. and Balasubramanian, C. (1986). Evaporation characteristics of TeO 2 in the formation of tellurium oxide thin films. *Journal of Materials Science*, 21, 246-250.

7. Hass, G., Francombe, M. H., Hoffman, R. W. and Vossen, J. L. (1963). *Physics of thin films: advances in research and development.* New York: Academic Press, 26-32.

8. Kelly, P. J. Arnell, R. D. (2000). Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. *Vacuum*, 56(3), 159-172.

9. Raj, A. M. E., Jayachandran, M. Sanjeeviraja, C. (2010). Fabrication techniques and material properties of dielectric MgO thin films—A status review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(2), 92-113.

10. Tlili, M., Nefzi, C., Alhalaili, B., Bouzidi, C., Ajili, L., Jebbari, N. and Turki Kamoun, N. (2021). Synthesis and characterization of MgO thin films obtained by spray technique for optoelectronic applications. *Nanomaterials*, 11(11), 3076.

11. Zulkefle, H., Ismail, L. N., Bakar, R. A. and Mahmood, M. R. (2011). *Molar concentration effect on MgO thin films properties*. 2011 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications, Langkawi, 468-471

12. Taşer, A., Güldüren, M. Güney, H. (2021). Cr dopant effect on MgO thin film structural, optical and morphology properties. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 14(1), 284-291.

13. Bredow, T. Gerson, A. R. (2000). Effect of exchange and correlation on bulk properties of MgO, NiO, and CoO. *Physical Review B*, 61(8), 5194.

14. Şenaslan, F., Çelik, A. Taşdemir, M. (2022). Production of high-transparent MgO films by radio-frequency sputtering method. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 320-326.

15. Rao, K. V. Sunandana, C. S. (2008). Structure and micro structure of combustion synthesized MgO nanoparticles and nanocrystalline MgO thin films synthesized by solution growth route. *Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic and Nano-Metal Chemistry*, 38(2), 173-180.

16. Lee, J. H., Eun, J. H., Park, S. Y., Kim, S. G., & Kim, H. J. (2003). Hydration of rf magnetron sputtered MgO thin films for a protective layer in AC plasma display panel. *Thin Solid Films*, 435(1-2), 95-101.

17. Yıldırım, S., Yurdaşkal, M., Öztürk, B., Batar, T. ve Çelik, E. (2014). Bir katalizör malzeme olarak grafen üretimi için alev sprey piroliz yöntemiyle nanoboyutlu MgO tozlarının sentezi ve özellikleri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(3), 461-465.

18. Aksay, S. (2019). Effects of Al dopant on XRD, FT-IR and UV–vis properties of MgO films. *Physica B: Condensed Matter*, 570, 280-284.

19. Patil, S. Puri, V. (2011). Oxidation temperature dependent properties of MgO thin film on alumina. *Applied Surface Science*, 258(4), 1535-1540.

20. Sönmezoğlu, S., Mehmed, K., Seçkin, A. (2012). İnce film üretim teknikleri. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 28(5), 389-404.

21. Aytaç, A. Malayoğlu, U. (2018). Fiziksel buhar biriktirme yöntemlerinden PVD ve JVD/DVD ince film kaplamaların karşılaştırılması ve DVD kaplama teknolojisinin endüstriyel uygulamaları üzerine kavramsal, akademik ve teorik bir analiz. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 17(1), 131-164.

22. Karakuş, E. Koç, M. M. (2023). Temel ince film üretim tekniklerine bir bakış. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 213-236.

23. Wasa, K., Kitabatake, M. Adachi, H. (2004). *Thin film materials technology: sputtering of control compound materials*. New York: Springer Science and Business Media, 45-52.

24. Nielsen, B. R. (1994). Ion beam assisted deposition. *Europhysics News*, 25(7), 149-150.

25. Vladoiu, R., Tichý, M., Mandes, A., Dinca, V. and Kudrna, P. (2020). Thermionic Vacuum Arc—A versatile technology for thin film deposition and its applications. *Coatings*, 10(3), 211.

26. Creighton, J. R. Ho, P. (2001). Introduction to chemical vapor deposition (CVD). *Chemical Vapor Deposition*, 2, 1-22.

27. Rashid, H. U., Yu, K., Umar, M. N., Anjum, M. N., Khan, K., Ahmad, N. and Jan, M. T. (2015). Catalyst role in chemical vapor deposition (CVD) process: A review. *Reviews On Advanced Materials Science*, 40(3), 235-248.

28. Lu, Z., Feigelson, R. S., Route, R. K., DiCarolis, S. A., Hiskes, R. and Jacowitz, R. D. (1993). Solid source MOCVD for the epitaxial growth of thin oxide films. *Journal of Crystal Growth*, 128(1-4), 788-792.

29. Boo, J. H., Yu, K. S., Koh, W. and Kim, Y. (1996). Preparation of MgO films on GaAs by metalorganic chemical vapor deposition. *Materials Letters*, 26(4-5), 233-236.

30. Fujii, E., Tomozawa, A., Torii, H., Takayama, R., Nagaki, M. and Narusawa, T. (1999). Preferred orientations and microstructure of MgO films prepared by plasma-enhanced metalorganic chemical vapor deposition. *Thin Solid Films*, 352(1-2), 85-90.

31. Zeng, J. M., Wang, H., Shang, S. X., Wang, Z. and Wang, M. (1996). Preparation and characterization of epitaxial MgO thin film by atmospheric-pressure metalorganic chemical vapor deposition. *Journal of Crystal Growth*, 169(3), 474-479.

32. Manin, M., Thollon, S., Emieux, F., Berthome, G., Pons, M. and Guillon, H. (2005). Deposition of MgO thin film by liquid pulsed injection MOCVD. *Surface and Coatings Technology*, 200(5-6), 1424-1429.

33. Kelly, P. J. Arnell, R. D. (2000). Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. *Vacuum*, 56(3), 159-172.

34. Constantin, D. G., Apreutesei, M., Arvinte, R., Marin, A., Andrei, O. C. and Munteanu, D. (2011). *Magnetron sputtering technique used for coatings deposition; technologies and applications*. 7th International Conference on Materials Science and Engineering, Maryland, 29-33.

35. Glocker, D. A. (2018). *Handbook of Thin Film Process Technology: 98/1 Reactive Sputtering*. New York: CRC Press, 85-93.

36. Maurya, D. K., Sardarinejad, A. Alameh, K. (2014). Recent developments in RF Magnetron sputtered thin films for pH sensing applications—an overview. *Coatings*, 4(4), 756-771.

37. Cáceres, D., Colera, I., Vergara, I., González, R., & Román, E. (2002). Characterization of MgO thin films grown by rf-sputtering. *Vacuum*, 67(3-4), 577-581.

38. Efkere, H. İ. (2022). *WO_3 memristör aygıtların geliştirilmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 21-42.

39. Karthikeyan, S., Hill, A. E., Cowpe, J. S. and Pilkington, R. D. (2010). The influence of operating parameters on pulsed DC magnetron sputtering plasma. *Vacuum*, 85(5), 634-638.

40. Kumari, N., Das, P. S., Joshi, N. K. and Barhai, P. K. (2012). Correlations of plasma parameters and properties of magnetron sputtered TiN films. *The European Physical Journal-Applied Physics*, 59(2), 85-93.

41. Soto, R., Mergui, S. Schmidt, P. E. (1997). Electrical and mechanical properties of MgO thin films on GaAs. *Thin Solid Films*, 308, 611-614.

42. Matsuda, Y., Otomo, K. Fujiyama, H. (2001). Quantitative modeling of reactive sputtering process for MgO thin film deposition. *Thin Solid Films*, 390(1-2), 59-63.

43. Balcı, E. (2022). *ZnSe ince filmlerin karakterizasyon ve fabrikasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 9-17.

44. Rhoderick, E. H. (1982). Metal-semiconductor contacts. *IEE Proceedings I Solid State and Electron Devices*, 129(1), 10–84.

45. Sze, S. N. (1981). *Physics of semiconductor devices*. (2. Edition). New York: John Wiley, 249-402.

46. Tanrıkulu, H. (2017). *Au/TiO2/n-Si (MIS) yapının elektriksel özelliklerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-13.

47. Sze, S. M., Li, Y. Ng, K. K. (2021). *Physics of semiconductor devices*. New York: John Wiley and Sons, 245-306.

48. Sharma, B. L. (1984). Fabrication and characterization of metal-semiconductor Schottky barrier junctions. *Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications*, 3, 113–159.

49. Rhoderick, E. H. Williams, R. H. (1988*). Metal semiconductor contacts*. Oxford: Oxford Press, 1-47, 257-267.

50. Büyükbaş, A. (2015). *AuGe/SiO2/p-Si/AuGe (MOS) kapasitörün elektrik ve dielektrik özelliklerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 112-115.

51. Pür, F.Z. (2012). *Au/Si3N4/n-Si (MIS) yapıların akım-voltaj (I-V) karakteristiklerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,4-10.

52. Alialy, S., Altındal, Ş., Tanrıkulu, E. E. and Yıldız, D. E. (2014). Analysis of temperature dependent current-conduction mechanisms in Au/TiO2/n-4H-SiC (metal/insulator/semiconductor) type Schottky barrier diodes. *Journal of Applied Physics*, 116, 083709-9.

53. Marıl, E. (2005). *(Al-Ti10W90+PtSi)/n-si schottky diyotların sıcaklığa bağlı temel parametreleri*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 4-22.

54. Norde, H. (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50(7), 5052–5053.

55. Azizian-Kalandaragh, Y., Farazin, J., Altindal, Ş., Shahedi Asl, M., Pirgholi-Givi, G., Delbari, S. A. and Sabahi Namini, A. (2020). Electrical and dielectric properties of Al/(PVP: Zn-TeO2)/p-si heterojunction structures using current–voltage (I–V) and impedance-frequency (Z–F) measurements. *Applied Physics A*, 126(8), 635.

56. Sze, S.M. (1981). *Physics of semiconductor devices* (2nd edition). New York: Willey, 245- 300.

57. Akın, N. (2015). *ZnO tabanlı Uv dedektör geliştirilmesi ve prototip üretimi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,42-44.

58. Joung, Y. H., Kang, H. I., Kim, J. H., Lee, H. S., Lee, J. and Choi, W. S. (2012). SiC formation for a solar cell passivation layer using an RF magnetron co-sputtering system. *Nanoscale Research Letters*, 7, 1-5.

59. Gudmundsson, J. T. (2021). *On electron heating and ıon recycling in the high power ımpulse magnetron sputtering discharge.* 2021 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS), Nevada, 1-1.

60. Depla, D., Mahieu, S. De Gryse, R. (2009). Magnetron sputter deposition: Linking discharge voltage with target properties. *Thin Solid Films*, 517(9), 2825-2839.

61. Chang, L. C., Zheng, Y. Z. Chen, Y. I. (2018). Mechanical properties of Zr–Si–N films fabricated through HiPIMS/RFMS co-sputtering. *Coatings*, 8(8), 263.

62. Stanjek, H. Häusler, W. J. H. I. (2004). Basics of X-ray Diffraction. *Hyperfine Interactions*, 154, 107-119.

63. Chatterjee, A. K. (2000). X-ray diffraction. In *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology*, New York: CRC Press, 275-332.

64. Bunaciu, A. A., Udristioiu, E. G. Aboul-Enein, H. Y. (2015). X-ray diffraction: instrumentation and applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 45(4), 289-299.

65. Chen, Z., Dinh, H. N. Miller, E. (2013). *Photoelectrochemical water splitting*. New York: Springer, 6-15

66. Verma, G. Mishra, M. (2018). Development and optimization of UV-Vis spectroscopy-a review. *World Journal of Pharmaceutical Research*, 7(11), 1170-1180.

67. Pena-Pereira, F., Costas-Mora, I., Romero, V., Lavilla, I. and Bendicho, C. (2011). Advances in miniaturized UV-Vis spectrometric systems. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 30(10), 1637-1648.

68. Makuła, P., Pacia, M. Macyk, W. (2018). How to correctly determine the band gap energy of modified semiconductor photocatalysts based on UV–Vis spectra. *The journal of Physical Chemistry Letters*, 9(23), 6814-6817.

69. McClelland, G. M., Erlandsson, R. Chiang, S. (1987). Atomic force microscopy: General principles and a new implementation. In *Review of progress in quantitative nondestructive evaluation*. Boston, MA: Springer US, 1307-1314.

70. İnternet: *Atomic Force Microscopy* (AFM). (2016). *METU- Middle East Technical University* Web: https://users.metu.edu.tr/chem355/assets/11-355-AFM.pdf Erişim tarihi 29.09.2023

71. Lakhtakia, A. Martín-Palma, R. J. (Eds.). (2013). *Engineered biomimicry*. New York: Newnes, 36-42.

72. Haruta, N. (2023). *Encyclopedic dictionary of condensed matter physics* (2nd edition). New York, NY: CRC Press, 248-260.

73. Song, S., Yang, T., Liu, J., Xin, Y., Li, Y. and Han, S. (2011). Rapid thermal annealing of ITO films. *Applied Surface Science*, 257(16), 7061-7064.

74. Platt, U., Stutz, J., Platt, U. and Stutz, J. (2008). *Differential absorption spectroscopy*. New York: Springer Berlin Heidelberg, 135-174.

75. Sagadevan, S., Venilla, S., Marlinda, A. R., Johan, M., Wahab, Y. A., Zakaria, R. and Ahmad, N. (2020). Effect of synthesis temperature on the morphologies, optical and electrical properties of MgO nanostructures. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 20(4), 2488-2494.

76. Nemade, K. R. Waghuley, S. A. (2014). Synthesis of MgO nanoparticles by solvent mixed spray pyrolysis technique for optical investigation. *International Journal of Metals*, 2014, 1-4.

77. Diachenko, O., Opanasuyk, A., Kurbatov, D., Opanasuyk, N., Kononov, O., Nam, D. and Cheong, H. (2016). Surface morphology, structural and optical properties of MgO films obtained by spray pyrolysis technique. *Acta Physica Polonica A*, 130(3), 805-810.

78. Karthik, K., Dhanuskodi, S., Gobinath, C., Prabukumar, S. and Sivaramakrishnan, S. (2019). Ultrasonic-assisted CdO–MgO nanocomposite for multifunctional applications. *Materials Technology*, 34(7), 403-414.

79. Visweswaran, S., Venkatachalapathy, R., Haris, M. and Murugesan, R. (2020). Characterization of MgO thin film prepared by spray pyrolysis technique using perfume atomizer. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(17), 14838-14850.

80. Wood, D. L. Tauc, J. S. (1972). Weak absorption tails in amorphous semiconductors. *Physical Review B*, 5(8), 3144.

81. Hssi, A. A., Atourki, L., Labchir, N., Ouafi, M., Abouabassi, K., Elfanaoui, A. and Bouabid, K. (2020). Optical and dielectric properties of electrochemically deposited p-Cu2O films. *Materials Research Express*, 7(1), 016424.

82. Nassier, L. F. Shinen, M. H. (2022). Study of the optical properties of poly (methyl methacrylate) (PMMA) by using spin coating method. *Materials Today: Proceedings*, 60, 1660-1664.

83. SThirumavalavan, S., Mani, K. and Sagadevan, S. (2015). Investigation of the structural, optical and electrical properties of copper selenide thin films. *Materials Research*, 18, 1000-1007.

84. Al-Kadhemy, M. F. H., Saeed, A. A., Khaleel, R. I. and Al-Nuaimi, F. J. K. (2017). Effect of gamma ray on optical characteristics of (PMMA/PS) polymer blends. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 11, 201-207.

85. Thangaraju, B. Kaliannan, P. (2000). Polycrystalline lead tin chalcogenide thin film grown by spray pyrolysis. *Crystal Research and Technology: Journal of Experimental and Industrial Crystallography*, 35(1), 71-75.

86. Rajesh, K. R. Menon, C. S. (2005). Electrical and optical properties of vacuum deposited MnPc thin films. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 47, 171-176.

87. Shinen, M. H., AlSaati, S. A. A. and Razooqi, F. Z. (2018). Preparation of high transmittance TiO_2 thin films by sol-gel technique as antireflection coating. *Journal of Physics: Conference Series*, 1032(1), 012018.

88. Balboul, M. R., Hosni, H. M., Soliman, M. A. and Fayek, S. A. (2014). Effect of composition on optical properties of GeSe 3-Sb 2 Se 3-ZnSe thin films. *Bulletin of Materials Science*, 37, 1255-1263.

89. Güllü, Ö. Tataroğlu, A. (2024). Optical and dielectric behavior of Al/CrO3/p-Si device. *Optical Materials*, 148, 114881.

90. Stepanyuk, V. S., Szász, A. Grigorenko, B. L. (1989). Electronic Structure and Optical Properties of MgO. *Physıca Status Solidi*, 155, 179-184.

91. Benkrima, Y., Souigat, A., Achouri, A., Soudani, M. E., Chaouche, Y., Korichi, Z. and Slimani, D. (2022). Study of the structural and electronic properties of MgO in the Wurtzite phase using the density functional theory. *Journal of Nano-and Electronic Physics*, 14(1), 85-93.

92. BNourozi, B., Aminian, A., Fili, N., Zangeneh, Y., Boochani, A. and Darabi, P. (2019). The electronic and optical properties of MgO mono-layer: Based on GGA-mBJ. *Results in Physics*, 12, 2038-2043.

93. Myvizhia, M., Kumarb, K. S., Kavithac, P. R. and Selvakumard, P. (2023). Structure and opto-electronic properties of MgO nanocrystals calculated by GGA approximation. *Journal of Ovonic Research*, 19(3), 46-63.

94. Tauc, J. (Edt.). (2012). *Amorphous and liquid semiconductors*. New York: Springer Science and Business Media, 93-102.

95. Aouati, R., Djaaboube, H., Bouabelloul, A., Taabouche, A., Bouachiba, Y., Daranfad, W. and Kharfi, F. (2021). Structural and optical properties of MgO thin films prepared by dip-coating process: effect of thickness. *Semiconductors*, 55(7), 583-590.

96. Siddqui, N., Sarkar, B., Pendem, C., Konthala, L. S., Sasaki, T., Bordoloi, A. and Bal, R. (2017). Highly selective transfer hydrogenation of α, β-unsaturated carbonyl compounds using Cu-based nanocatalysts. *Catalysis Science and Technology*, 7(13), 2828-2837.

97. Roozbahania, H., Maghsoodia, S., Raeia, B., Kootenaeia, A. S. and Azizia, Z. (2023). MgO support mediated enhancement of La2BMnO6 (B= Co, Ni) perovskite oxide in catalytic combustion of propane. *Iranian Journal of Catalysis*, 13(2), 211-222.

98. Kim, S. G., Choi, K. H., Eun, J. H., Kim, H. J. and Hwang, C. S. (2000). Effects of additives on properties of MgO thin films by electrostatic spray deposition. *Thin Solid Films*, 377, 694-698.

99. Rhoderick, E. H. Williams, R. H. (1988). *Metal-semiconductor contacts* (Vol. 129). Oxford: Clarendon Press, 112-126.

100. Tataroğlu, A. Altındal, Ş. (2008). Analysis of interface states and series resistance of MIS Schottky diodes using the current–voltage (I–V) characteristics. *Microelectronic Engineering*, 85(1), 233-237.

101. Uslu, H., Altındal, Ş., Aydemir, U., Dökme, I. and Afandiyeva, I. M. (2010). The interface states and series resistance effects on the forward and reverse bias I–V, C–V and G/ω-V characteristics of Al–TiW–Pd2Si/n-Si Schottky barrier diodes. *Journal of Alloys and Compounds*, 503(1), 96-102.

102. Norde, H. (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50(7), 5052-5053.

103. Buyukbas-Ulusan, A. Tataroglu, A. (2020). Electrical characterization of silicon nitride interlayer-based MIS diode. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31, 9888-9893.

104. Manjunath, V., Uppala, C., Bommireddy, P. R., Son, B., Kim, H., Ahn, C. H. and Park, S. H. (2023). Rapid thermal annealing influences on microstructure and electrical properties of Mo/ZrO2/n-Si/Al MISM junction with a high-k ZrO2 insulating layer. *Physica B: Condensed Matter*, 648, 414423.

105. Yıldız, D. E., Gullu, H. H. and Cavus, H. K. (2022). Effect of TiO2 thin film with different dopants in bringing Au-metal into a contact with n-Si. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 32(3), 1067-1077.

106. Aydemir, G. A., Akay, D., Tataroğlu, A. and Ocak, S. B. (2023). Electrical and optical properties of p-Si based structures with lead oxide interfaces. *Materials Science and Engineering: B*, 294, 116552.

107. Güçlü, Ç. Ş., Tanrıkulu, E. E., Dere, A., Altındal, Ş. and Azizian-Kalandaragh, Y. (2023). A comparison of electrical characteristics of the Au/n-Si Schottky diodes with (ZnCdS: GO (1: 1) and (ZnCdS: GO (1: 0.5) doped PVP interlayer using current–voltage (I–V) and impedance–voltage (Z–V) measurements. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(28), 1909.

108. Reddy, D. S., Janardhanam, V., Reddy, V. R. and Choi, C. J. (2023). Modification of interface properties of Au/n-GaN Schottky junction by rare-earth oxide Nd2O3 as an interlayer and its microstructural characterization. *Vacuum*, 215, 112300.

109. Card, H. C. Rhoderick, E. H. (1971). Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4(10), 1589.

110. Reddy, V. R., Reddy, P. S., Reddy, I. N. and Choi, C. J. (2016). Microstructural, electrical and carrier transport properties of Au/NiO/n-GaN heterojunction with a nickel oxide interlayer. *RSC advances*, 6(107), 105761-105770.

111. Badali, Y., Altan, H. Altındal, S. (2024). Thermal dependence on electrical characteristics of Au/(PVC: Sm2O3)/n-Si structure. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 35(3), 1-10.

112. Khediri, A. H., Talbi, A., Benamara, M. A. and Benamara, Z. (2021). Electrical Characterization and Interface State Density in Au/n-InN/InP Schottky Diode. *Journal of Nano-and Electronic Physics*, 13(4), 78-93.



Gazili olmak ayrıcalıktır…