



YARIİLETKEN NEM SENSÖRLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Karen Cansu FERRUH

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2021

ETİK BEYAN

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

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

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

Karen Cansu FERRUH

28/04/2021

YARIİLETKEN NEM SENSÖRLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Karen Cansu FERRUH

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2021

ÖZET

Bu tez çalışmasında, esnek (kapton) ve esnek olmayan (Al_2O_3) alttaşlar üzerine titanyum dioksit (TiO_2) ve kalay dioksit (SnO_2) algılama katmanına sahip nem sensörleri geliştirildi. Temelde nem sensörleri alttaş, elektrot ve aktif/algılayıcı katman olmak üzere üç katmandan oluşur. Sensörlerin elektrotları iki farklı teknikle oluşturuldu: İlk olarak, vakumlu kaplama tekniklerinden eş-püskürtme ve ısı buharlaştırma yöntemi ile $4 \times 7 \text{ mm}^2$ lik Al_2O_3 alttaşlar üzerine Altın (Au) ve Platin (Pt) kaplanarak vakumsuz ortamda lazer ablasyon ile iki farklı desene sahip elektrotlar oluşturuldu. İkinci olarak, vakumsuz kaplama tekniklerinden biri olan mürekkepli baskı (ink-jet) tekniği ile Gümüş (Ag) elektrotlar inkscape programı ile kapton alttaşlar üzerine işlendi. Al_2O_3 alttaşlar üzerine işlenen elektrotların üzerine püskürtme yöntemi ve vakumsuz kaplama tekniklerinden; daldırma, doktor bıçağı ve ultrasonik banyo kaplama tekniği ile aktif katman kaplandı. Kapton alttaş üzerine çizilen elektrotlar üzerine de daldırma tekniği ile algılayıcı katman oluşturuldu. Böylece, algılama katmanı ve elektrot tasarımı bakımından farklılıkları olan on bir adet nem sensörü geliştirildi. Geliştirilen algılama katmanlarının yapısal ve optik karakterleri belirlendi. Geliştirilen nem sensörlerinin çıktı parametreleri farklı nem ortamında $\Delta R = (R_{(\%70)} - R_{(\%40)})_{nem}$ direnç değişimi baz alınarak değerlendirildi. Dirençteki değişimin artması nem sensöründeki hassasiyetin artması olarak yorumlandı. Eş-püskürtme tekniği ile üretilen sensörde $3715k\Omega$ direnç farkı olduğu görüldü. Vakumsuz kaplama tekniklerinden ink-jet baskı tekniği ile üretilen esnek nem sensörlerinin direnç farkı TiO_2 için $3800k\Omega$ ve SnO_2 için $4500k\Omega$ olarak belirlendi. Bu durum SnO_2 malzemesinin neme daha duyarlı olduğu şeklinde yorumlandı. Al_2O_3 alttaş üzerine TiO_2 karışımı kullanılarak daldırma tekniği ile üretilen sensörün üretilen tüm sensörler içerisinde en yüksek direnç farkına sahip olduğu görüldü. Doktor bıçağı yöntemleriyle TiO_2 kaplanan nem sensörü $1379k\Omega$ 'luk direnç farkı gösterirken ultrasonik banyoda kaplanan nem sensörü $120k\Omega$ direnç farkı gösterdi. Vakumsuz kaplama yöntemlerinin kullanımının nem sensörlerinin üretim maliyetlerini düşürdüğü ve nem sensörü üretimi için avataj sağlayabileceği değerlendirildi.

Bilim Kodu : 20227
Anahtar Kelimeler : Nem sensörü, TiO_2 , SnO_2 , Al_2O_3 , Au
Sayfa Adedi : 76
Danışman : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

DEVELOPMENT OF SEMICONDUCTOR HUMIDITY SENSORS

(M.Sc. Thesis)

Karen Cansu FERRUH

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2021

ABSTRACT

In this thesis, humidity sensors with a focus of titanium dioxide (TiO_2) and tin dioxide (SnO_2) were developed on flexible (kapton) and unflexible (Al_2O_3) substrates. Basically, humidity sensors consist of three layers: substrate, electrode and active / sensing layer. The electrodes of the sensors were created with two different techniques: First, two different patterned electrodes were formed by coating Gold (Au) and Platinum (Pt) on $4 \times 7 \text{ mm}^2$ Al_2O_3 substrates with vacuum coating techniques, co-spraying and thermal evaporation. Secondly, one of the non-vacuum coating techniques, ink-jet and Silver (Ag) electrodes were processed on kapton substrates with the inkscape program. Spraying method and non-vacuum coating techniques on electrodes processed on Al_2O_3 substrates; The active layer was dip-coating, doctor blade and ultrasonic bath coating. A sensor was created by immersion on the electrodes drawn on the Kapton substrate. Thus, a humidity sensor was developed with differences in terms of sensing layer and electrode design. The perceived query and optical characters were determined. The base result of the humidity resistance change of $\Delta R = (R_{(\%70)} - R_{(\%40)})_{\text{humidity}}$ resistance was evaluated in several different humidity sensing of the developed humidity sensors. The increase in the change in resistance was interpreted as an increase in the sensitivity to the humidity sensor. A $3715 \text{ k}\Omega$ resistance difference was observed in the sensor produced by co-spraying. The difference in resistance between ink-jet printing and flexible humidity sensors, which is one of the non-vacuum coating techniques, was determined as $3800 \text{ k}\Omega$ for TiO_2 and $4500 \text{ k}\Omega$ for SnO_2 . This situation was interpreted as SnO_2 material is more sensitive to humidity. Transmitting TiO_2 onto the Al_2O_3 substrate was found to have the highest resistance difference of all sensors of the sensor surrounded by immersion. While the humidity sensor coated with TiO_2 with doctor blade methods showed a resistance difference of $1379 \text{ k}\Omega$, the humidity sensor coated in the ultrasonic bath showed a resistance difference of $120 \text{ k}\Omega$. It was evaluated that the use of non-vacuum coating methods reduces the production costs of humidity sensors and can provide an advantage for humidity sensor production.

Science Code : 20227
Key Words : Humidity sensörü, TiO_2 , SnO_2 , Al_2O_3 , Au
Page Number : 76
Supervisor : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

TEŞEKKÜR

Çalışmalara başladığım zamandan bu zamana kadar gerekli imkanları sağlayan, bana güvenerek çalışmalarımın sürekliliği için elinden geleni yapan Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürü, danışmanım Sayın Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca desteklerini her zaman hissettiğim Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan hocam Sayın Doç. Dr. Saime Şebnem AYDIN, Doç. Dr. Tarık ASAR ve diğer tüm hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Akademik hayatımda bana yol gösteren, bana olan inancını hiç kaybetmeyen, her zaman güvenen, destekleyen, enerjisi ile motive eden Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği bölümü Öğretim Üyelerinden Doç. Dr. Emre TAŞCI'ya sonsuz teşekkür ederim.

Her anımda yanımda olan, ilk öğretmenim, ablam, dostum, sırdaşım, idolüm, hayatta hep örnek aldığım, benim bugünlere gelmemde büyük emeği olan, canım annem Filiz FERRUH'a ve her adımda bana destek olan, varlığı ile bana güç veren, yol gösteren biricik babam Önal FERRUH'a. Her zaman bana inanan, destek olan, hep yanımda olan, yol arkadaşım Güneş ÜÇCAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Mutluluğumu kendi mutlulukları gibi, üzüntülerimi kendi üzüntüleri gibi yaşayan tüm stresli zamanlarımda büyük bir sabırla bana destek olan canım arkadaşlarım; Setenay ÜNÇE, Orhan Kağan OĞUZ ve Onur BAYRAM'a çok teşekkür ederim.

Çalışmalarıma başladığım ilk günden bu yana yanımda olan, Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezindeki birçok cihazı büyük bir sabırla anlatan, öğrenmemi sağlayan bana ağabeylik eden Halil İbrahim EFKERE ve Alp Deniz YAMAN'a teşekkür ederim. Bana aile sıcaklığını hissettiren, dostlukları ile motive eden, her zaman destek olan Dr. Ümran Ceren BAŞKÖSE, Hakkı KAPLAN ve diğer tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu tez 20011K120290 no'lu "Fotonik Araştırma Merkezi" isimli ve 2016K121220 no'lu "Fotonik Uygulama ve Araştırma Altyapısının Geliştirilmesi" isimli T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı projeleri ve EDS Elektronik bünyesinde 180158 no'lu proje ile TÜBİTAK 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. NEM SENSÖRLERİ	5
2.1. Klasik Nem Ölçümleri	5
2.1.1. Psikrometre	5
2.1.2. Saç higrometresi	6
2.1.3. Lityum klorür çiylenme noktası sensörü	7
2.1.4. Soğutulmuş ayna higrometreleri	8
2.2. Minyatürleştirilmiş Nem Sensörleri.....	9
2.2.1. Termal iletkenlik nem sensörleri	9
2.2.2. Optik nem sensörleri.....	10
2.2.3. Gravimetrik nem sensörleri	10
2.2.4. Kapasitif nem sensörleri	11
2.2.5. Rezistif nem sensörleri.....	15
3. TİTANYUM DİOKSİT (TiO ₂) VE KALAY (IV) OKSİT (SnO ₂).....	19
3.1. Titanyum Dioksit (TiO ₂).....	19
3.2. Kalay (IV) oksit (SnO ₂)	20

4. KULLANILAN YÖNTEMLER VE KARAKTERİZASYON SİSTEMLERİ.....	23
4.1. İnce Film Üretim Yöntemleri.....	23
4.1.1. Eş-püskürtme sistemi.....	23
4.1.2. Daldırma tekniği	25
4.1.3. Ultrasonik banyo ile kaplama tekniği	26
4.1.4. Doktor bıçağı yöntemi	28
4.2. Fabrikasyon Sistemleri.....	29
4.2.1. Isıl buharlaştırma sistemi	29
4.2.2. Mürekkepli baskı yöntemi (İnk-Jet)	30
4.2.3. Lazer ablasyon tekniği	31
4.3. İnce Film Karakterizasyonu	33
4.3.1. X-Işını kırınımı (XRD)	34
4.3.2. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM).....	36
4.3.3. Morötesi-görünür bölge (UV-Vis) spektrometresi	37
4.4. Nem Sensörü Test Sistemi	39
5. TiO ₂ VE SnO ₂ ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONLARI.....	41
5.1. TiO ₂ ve SnO ₂ Üretimi	41
5.1.1. Alttaş hazırlama ve temizleme işlemi.....	41
5.1.2. Titanyum dioksit (TiO ₂) üretimi	42
5.1.3. Kalay oksit (SnO ₂) üretimi	44
5.2. TiO ₂ ve SnO ₂ Karakterizasyonları	45
5.2.1. TiO ₂ ince filmlerinin karakterizasyonları	45
5.2.2. SnO ₂ karakterizasyonu.....	51
6. NEM SENSÖRÜ FABRİKASYONU VE SENSÖR ÇIKTI PARAMETRELERİ	57
6.1. Alttaşların Belirlenmesi	58

	Sayfa
6.1.1. Alümina (Al_2O_3)	58
6.1.2. Kapton.....	58
6.2. Elektrot Deseni Tasarlanması ve Üretimi	58
6.3. Aktif Katmanın Nem Sensörü Üzerine Üretilmesi	60
6.4. Sensör Çıktı Parametreleri	62
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	75

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Kalibrasyon numuneleri bilgileri.....	41
Çizelge 5.2. TiO ₂ ince filmleri için X-ışını kırınım desenleri yardımıyla elde edilen yapısal parametreler [D (tanecik büyüklüğü), δ (dislokasyon yoğunluğu) ve ε (noktasal gerilim)]	47
Çizelge 5.3. SnO ₂ ince filmleri için X-ışını kırınım desenleri yardımıyla elde edilen yapısal parametreler [D (tanecik büyüklüğü), δ (dislokasyon yoğunluğu) ve ε (noktasal gerilim)]	53
Çizelge 6.1. Üretilen nem sensörleri.....	62
Çizelge 6.2. Nem ölçüm sonuçları.....	64

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Psikrometre'nin şematik gösterimi	6
Şekil 2.2. Saç Higrometresinin şematik gösterimi	6
Şekil 2.3. LiCl çiy noktası sensörü şematik gösterimi	7
Şekil 2.4. Soğutulmuş ayna higrometreleri şematik gösterimi	8
Şekil 2.5. Termal İletkenlik Nem Sensörünün şematik gösterimi	10
Şekil 2.6. Birbirine bağlı elektrot (IDE) yapısının SEM cihazı altındaki görüntüsü	12
Şekil 2.7. Elektrot konfigürasyonunun 3 örneği; (sol) interdigital elektrot, (orta) düz elektrot ve (sağ) mesh yapıda elektrot	13
Şekil 2.8. Sandviç yapıli seramik nem sensörü kesiti	13
Şekil 2.9. DVS-BCB tabanlı nem sensörünün (a) kesiti ve (b) üstten görünümü	14
Şekil 2.10. a) PI tabanlı kapasitif nem sensörünün üstten görünümü ve b) PI'in AFM görüntüsü	15
Şekil 3.1. TiO ₂ kristal yapısı, (a) anataz, (b) rutil, (c) brokit	19
Şekil 3.2. SnO ₂ in örgü yapısı (a=b=4.737 Å ve c=3.186 Å)	20
Şekil 4.1. Püskürtme sisteminin şematik gösterimi	24
Şekil 4.2. Daldırma tekniğinin aşamaları	25
Şekil 4.3. Ultrasonik banyo ile kaplama tekniğinin gösterilmesi	26
Şekil 4.4. Doktor bıçağı kaplama tekniğinin şematik gösterimi	28
Şekil 4.5. Isıl Buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi	30
Şekil 4.6. Kristal düzlemlerinde X-ışınlarının saçılması	35
Şekil 4.7. UV-vis spektrometresine ait şematik gösterim	37
Şekil 5.1. Cam alttaşı temizlemek için kullanılan temizleme işlemi adımları	42
Şekil 5.2. Daldırma işleminin şematik gösterimi	43
Şekil 5.3. TiO ₂ pasta yapım aşamaları	43
Şekil 5.4. K1, K2, K3, K4 ve K5 numunelerinin X-ışını kırınım desenleri	46
Şekil 5.5. K1, K2, K3, K4 ve K5 numuneleri için üç boyutlu AFM görüntüleri	48

Şekil	Sayfa
Şekil 5.6. K1, K2, K3, K4 ve K5 numuneleri için geçirgenlik grafikleri	50
Şekil 5.7. K1, K2, K3, K4 ve K5 numuneleri için Tauc grafikleri	51
Şekil 5.8. K6 ve K7 için XRD grafiklerinin ve pik noktalarının gösterilmesi.....	52
Şekil 5.9. K6 ve K7 için AFM görüntüleri	54
Şekil 5.10. K6 ve K7 numuneleri için geçirgenlik grafikleri.....	55
Şekil 5.11. K6 ve K7 numuneleri için Tauc grafikleri.....	55
Şekil 6.1. Nem sensörü katmanları	57
Şekil 6.2. Grotthuss mekanizması.....	57
Şekil 6.3. (a) Tasarlanan IDE deseni ve ölçüleri (a=520 μm , b=220 μm , c=520 μm ve d=210 μm) ve (b) Lazer ablasyon ile işlenmiş IDE deseni ve ölçüleri (a=524 μm , b=215 μm , c=225 μm).....	59
Şekil 6.4. Inkscape programı ile çizilmiş IDE deseni.....	60
Şekil 6.5. Alttaşlar için temizleme işlemi	60
Şekil 6.6. NS1 ve NS9 için nem ölçüm sonuçları.....	63

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. PixDro LP50 inkjet yazıcı	31
Resim 4.2. Lazer-malzeme etkileşimi.....	31
Resim 4.3. Varsayımsal bir bağ A-B'deki enerji seviyesi geçişinin şeması	33
Resim 4.4. Nano Magnetics hpAFM atomik kuvvet mikroskobu	36
Resim 4.5. Kullanılan UV-Vis Spektrometresi.....	39
Resim 4.6. Kullanılan nem sensörü test sistemi	39

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
$\vec{E}$	Elektrik alan
$\vec{j}$	Akım yoğunluğu
°	Derece
°C	Derece santigrat
μm	Mikro metre
μs	Mikro saniye
A	İletken telin (hattın) kesit alanı
Ag	Gümüş
Au	Altın
cm	Santi metre
dk	Dakika
g	Gram
I	Akım
k Ω	Kilo ohm
L	İletken telin (hattın) uzunluğu
m	Metre
mbar	Mili bar
mm	Mili metre
M Ω	Mega ohm
nm	Nano metre
ph	Asitlik veya bazlık derecesini tarif eden ölçü birimi
R	Direnç
s	Saniye
V	Potansiyel fark
ρ	Özdirenç
Ω	Ohm

Kısaltmalar**Açıklamalar****AFM**

Atomik Kuvvet Mikroskobu

SnO₂ D

Kalay oksit karışımı

TiO₂ D

Titanyum dioksit karışımı

UV

Morötesi

Vis

Görünür

XRD

X-Işını Kırınımı



1. GİRİŞ

Su, dünya üzerindeki birçok canlı yaşam formu için en temel kimyasal bileşiktir. Hayatın ve yaşamın varlığı için en temel ihtiyaç sudur. Nem terimi, küçük damlacıklar şeklinde havada veya diğer gazlarda asılı olan suyu ifade eder [1]. Bu tez çalışmasında “nem” terimi, havadaki su buharı konsantrasyonunu ifade etmektedir.

Nem sensörlerinin tarihi antik çağa kadar uzanmaktadır. Antik Çin’de Shang Hanedanlığı döneminde Çinliler, çubuk odun kömürü ve bir parça toprak kullandılar. Odun kömürlerinin kuru ağırlıklarını ölçtüler ve daha sonra havaya maruz bıraktılar, kömürlerin havaya maruz kalan ağırlığını da ölçtükten sonra kuru ağırlık ile nemli ağırlığı kıyaslayarak havadaki nemi belirlediler [2]. İlk ham nem ölçer 1480 yılında İtalyan Rönesans mucidi Leonardo da Vinci tarafından icat edildi. Leonardo da Vinci, bir yün yumağının nem emmeden önce ve nem emdikten sonraki kütle farkını ölçebileceği bir sistem tasarladı. Daha modern versiyonu ise 1755 yılında İsviçreli bilim adamı Johann Heinrich Lambert tarafından oluşturuldu. Tıpkı yün gibi insan saçı da nem tutma özelliğine sahiptir ve saçın uzunluğu nem ile değişkenlik gösterir, saç uzunluk değişimine bağlı bir mekanizma ile kadran ve ölçek kullanılarak havadaki nem miktarı ölçülebilir. Bu prensipten hareketle, 1783 yılında İsviçreli fizikçi ve jeolog Horca Benedict de Saussure nemi ölçmek için insan saçı kullanılan bir nem ölçer icat etti. 17. Yüzyıl sonlarına doğru bu cihaz “higroskop” olarak adlandırıldı [3]. Higroskop kelimesi artık kullanılmamasına rağmen, higroskopik, higroskopi ve higrometre gibi kelimeler kullanılmaya devam etmektedir.

Nemin biyoloji, otomotiv, tarım, sağlık, elektronik aygıtlar ve günlük hayatımızda kullandığımız birçok cihazdaki önemi dünyanın her yerinde bilinmektedir, bu sebeple ortamdaki nem değerini hassas bir biçimde saptamak ve kontrol altında tutabilmek oldukça önemlidir. Nem sensörleri sıklıkla tarımda sulama sırasında toprak nemini belirlemek ve inşaat mühendisliğinde korozyon ve erozyon tespiti için akıllı sistemlerde kullanılır. Çevre koşullarının korunması ihtiyacı nem sensörlerinin gelişmesine katkı sağlamıştır [4]. Özellikle yarıiletken teknolojisinde nem değerinin sabit tutulması oldukça önemlidir.

Bahsedilen tüm uygulamaları kapsamak için birçok farklı tipte nem sensörüne ihtiyaç vardır. Nem ölçümleri için çok çeşitli sensör türleri önerilmiştir. Nem sensörleri temel olarak üç grupta sınıflandırılabilir. Bu teknolojinin çok uzun bir geçmişi vardır. Bunlardan ilki olan

mekanik sensörler, yavaş ve kesin olmayan sonuçlar vermesine rağmen yirminci yüzyılın ikinci yarısına kadar kullanıldı. Bu sırada, ilk elektronik çiplerle eşzamanlı olarak, ikinci nesil nem sensörleri olan elektronik nem sensörleri ortaya çıktı. Günümüzde ise üçüncü nesil olarak adlandırılan elektronik sensörlere dayalı nem algılama baskın teknolojidir [1] Bu sensörler günümüzde en yaygın kullanılan sensör türüdür. İyi bir nem sensörü yapmak; doğruluk, güç tüketimi, hassasiyet, tekrarlanabilir olması, uzun vadeli kararlılık, yanıt süresi, boyut, paketlenme ve maliyet gibi birçok unsura dayanır. Günümüzde tüm bu özellikler arasında boyut ve maliyet giderek daha önemli hale gelmektedir. Piyasada birçok nem sensörü bulunmaktadır.

Nem sensörlerinin algılama sistemlerinin gelişmesi genel olarak; aktif katmanları, elektrot tasarımı, çalışma ilkesi ve üretim-fabrikasyon teknolojileri gibi nem sensörünün performansının iyileştirilmesindeki gelişmeleri kapsar [4]. Sensör cihazlarının minyatürleştirilmesi, düşük histerezis [5], seri üretilebilmesi [6], paketlenme /entegrasyon kolaylığı ve buna karşılık gelen maliyet düşüşleri [7-8] gibi çok sayıda avantaj sunar.

Nem sensörleri genellikle seramik ve silikon alttaş üzerine imal edilir. Bununla birlikte mürekkepli baskı teknolojisi alanındaki son gelişmeler ile düşük maliyetli ve kolay fabrikasyon işlemleri nedeniyle, esnek alttaşlar üzerine sensör üretilmeye başlanmıştır [9]. Esnek alttaş üzerine üretilen sensörlerin verimliliklerinin artması, sensör teknolojisine yeni bir boyut kazandırmıştır. Bununla beraber araştırmacılar, Titanyum dioksit (TiO_2) ve Kalay(IV) oksit (SnO_2) gibi yarıiletken metal oksit nanoyapıların son derece hassas ve kararlı olduklarından dolayı sensörler için uygun bir algılayıcı katman olduklarını belirlediler [10]. Metal oksit yarıiletken filmler genellikle geniş bant aralıklarına sahiptirler. Geniş bant aralığına sahip polikristal filmler, tek kristal filmlere göre daha kolay ve ucuz yöntemlerle alttaş üzerine büyütülebilen filmlerdir [11]. Teknolojik aygıtların gelişiminde metal oksit yarıiletken filmler kolay ve ucuz büyütülebilmeye, hassas ve kararlı olma özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir.

Bu tez çalışmasında, düşük maliyetli, yüksek hassasiyetli, geri dönüş süresi kısa, kullanım ömrü uzun, üretim işlemleri fabrikasyona uygun, birçok alanda kullanılabilir boyutlara sahip, havadaki su buharına bağlı nem değerini ölçebilen (rezistif) nem sensörü üretimi gerçekleştirildi. Bu çalışmanın sonunda yapılan nem ölçüm testleri ile yapılan sensör ve yapılmak istenen sensör arasındaki durum değerlendirilerek tez içerisinde sunuldu.

Bu tez kapsamında vakumlu ve vakumsuz kaplama teknikleri kullanılarak esnek kapton ve esnek olmayan Al_2O_3 , alttaşlar üzerine Platin, Altın ve Gümüş elektrot desenleri üretilerek iki farklı algılayıcı katman TiO_2 ve SnO_2 kullanıldı.

Tez çalışmasında, 2. Bölüm’de nem algılama sistemleri verildi. Klasik nem ölçme teknikleri ve minyatürleştirilmiş nem sensörlerinin ölçüm metotları sunuldu. Tez kapsamında kullanılan rezistif nem sensörleri hakkında detaylı bilgiler verildi. 3. Bölüm’de tez kapsamında aktif katman malzemesi olarak kullanılan TiO_2 ve SnO_2 hakkında bilgi verildi. 4. Bölüm’de tez çalışmasında kullanılan yöntemler ve analiz sistemleri tanıtıldı. Vakumlu ve vakumsuz kaplama tekniklerinden; eş zamanlı püskürtme, ısı buharlaştırma, daldırma, Dr. Bıçağı ve ultrasonik banyo ile kaplama teknikleri verildi. Fabrikasyon sistemlerinden; lazer ablasyon ve mürekkepli baskı tekniğı (ink-jet) hakkında bilgi verildi. Aktif katman için ince film karakterizasyonunda kullanılan; X-ışını kırınımı, atomik kütle mikroskobu ve morötesi-görünür bölge spektrometresi anlatıldı. Nem sensörü ölçümü için kullanılan nem ölçüm cihazı hakkında bilgi verildi. 5. Bölüm’de tez kapsamında yapılan nem sensörlerinin aktif katmanlarının üretimi ve karakterizasyonu hakkında bilgi verildi. 6. Bölüm’de üretilen nem sensörü fabrikasyonu anlatıldı ve sensör çıktı parametrelerinden bahsedildi. Son olarak 7.Bölüm’de Tez kapsamında yapılan çalışmanın sonuçlarından, literatüre olan katkıları ve gelecekte planlanan çalışmalar sunuldu.



2. NEM SENSÖRLERİ

Nem, havadaki su buharı miktarıdır. Bir nem sensörü, saf bir gazdaki veya hava gibi bir gaz karışımındaki su buharı yoğunluğunu algılar. Nem, mutlak nem ve bağıl nem dahil olmak üzere birçok şekilde ifade edilebilir [11]. Mutlak nem, birimi mg /ml veya gram olan belirli bir hacimdeki su buharının kütlesidir. Bununla birlikte, su buharının kütlesini ölçmek zordur, bu bağıl nemi daha yaygın kullanılan bir ölçüm yapar.

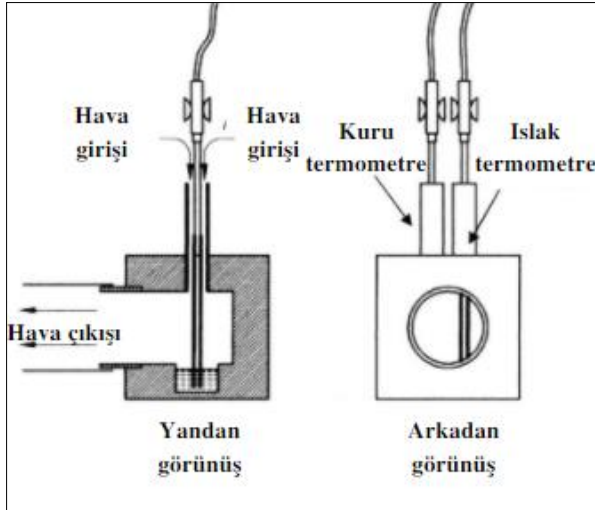
Bağıl nem ve Çiy/Don noktası, nem seviyelerini bildirmek için yaygın olarak kullanılan iki birimdir [12]. RH; belirli bir sıcaklıkta birim hacimdeki kısmi buhar basıncının, birim hacimdeki doyma buhar basıncına oranıdır ve genellikle yüzde olarak belirtilir. RH, sıcaklığın güçlü bir fonksiyonudur; mutlak nem değişmemiş olsa bile sıcaklık değiştiğinde değişecektir. Çiy noktası, havadaki su buharının yoğunlaşarak sıvı suya dönüşeceği sıcaklıktır; yani Çiy noktası, bağıl nem %100 olduğunda hava sıcaklığına eşittir. Donma noktası, havadaki su buharının sıvı faza geçmeden buza yoğunlaştığı sıcaklıktır. Sonuç olarak donma noktası her zaman 0°C'nin altındadır. Çiy ve donma noktası mutlak ölçümlerdir. Bununla birlikte bağıl nem kontrolü gerektiren çoğu uygulama için sıcaklık aralığı oldukça dardır. Nem seviyelerini bildirmek için yaygın kullanılan RH sensörleri, diğer nem sensörü türlerinden önemli ölçüde daha ucuzdur.

2.1. Klasik Nem Ölçümleri

Nemi ölçmenin birkaç yöntemi vardır. Psikrometre, saç higrometresi, LiCl çiylenme noktası sensörü ve soğutulmuş ayna higrometreleri, en yaygın yöntemlerden sadece birkaçıdır. Tüm bu yöntemler bu bölümde avantajları ve dezavantajları ile tartışıldı.

2.1.1. Psikrometre

Psikrometre iki ampul termometreden oluşur (Şekil 2.1). Bir termometre su veya buz içeren pamuklu fitil ile kaplıdır. Bu termometreye "ıslak termometre" denir ve adyabatik doygunluk sıcaklığını ölçer. Diğer termometre, oda sıcaklığını ölçmek için ortaya çıkarılır. Bu termometreye "kuru termometre" denir. Islak haznenin suyu buharlaştırmak için ısı tüketmesi gerekir, bu nedenle ıslak haznedeki sıcaklık her zaman kuru haznede olduğundan daha düşüktür.

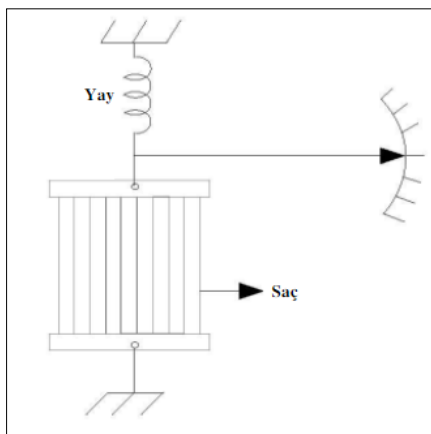


Şekil 2.1. Psikrometre'nin şematik gösterimi [13]

Islak termometre ile kuru termometre arasındaki sıcaklık farkı ortam nemi ile ilgilidir. Nem azaldığında ıslak ampulde su daha kolay buharlaşır. Bu nedenle sıcaklık, ıslak haznede daha fazla düşer. Bununla birlikte, sıcaklık farkı, hava akışı, hava basıncı ve ampulün çapı gibi diğer birçok faktör de etkilidir. Psikrometrenin avantajı, suyun fiziksel özelliklerine bağlı olan doğruluğudur. Dezavantajları arasında boyutu, güç tüketimi ve su ikmali gibi düzenli bakım ihtiyacı öne çıkar [13].

2.1.2. Saç higrometresi

Saç, tahta ve kağıt gibi birçok doğal malzeme neme karşı hassastır. Bu malzemelerin boyutları nem ile değişmektedir. Saç higrometresi (Şekil 2.2), 1783 yılında bu prensibe [14] dayanarak De Saussure tarafından icat edilmiştir.



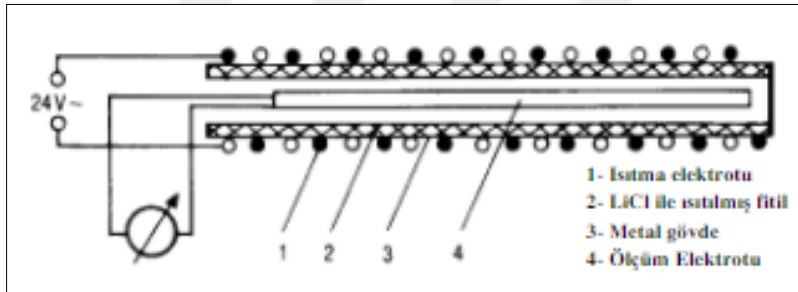
Şekil 2.2. Saç Higrometresinin şematik gösterimi [14]

Saçın emebileceği nem miktarı, ortamdaki bağıl nem miktarına bağlıdır. Öte yandan saçın uzunluğu içerdiği nem ile ilgilidir. Bağıl nem arttıkça saçın uzunluğu da artacaktır. Bir saç parçasının kırılması kolaydır, bu nedenle mekanik gücü artırmak için genellikle bir saç tutam kullanılır. Tüyün uzunluğu değiştikçe işaretçinin konumu değişecektir. Saç higrometrelerinin avantajları ucuz, basit ve kullanım kolaylığıdır. Dezavantajları, düşük doğruluk ve yavaş yanıtın yanı sıra boyutudur.

2.1.3. Lityum klorür çiylenme noktası sensörü

Lityum Klorür (LiCl) havada iyi stabilite gösterir. LiCl katı haldedir ve nem oranı %12 RH'nin altında olduğunda yüksek dirence sahiptir. Bağıl nem %12'ye yükseldiğinde, LiCl havadaki nemi emer ve sıvılaşır. Bu nedenle LiCl çiylenme noktası sensörü yalnızca bağıl nem %12'den fazla olduğunda çalışabilir.

Seyreltik LiCl solüsyonu, etrafına sarılan iki ince bakır tel bulunan ince cidarlı bir cam tüp üzerine kaplanır [13]. LiCl çiy noktası sensörünün şeması Şekil 2.3'te gösterilmektedir.

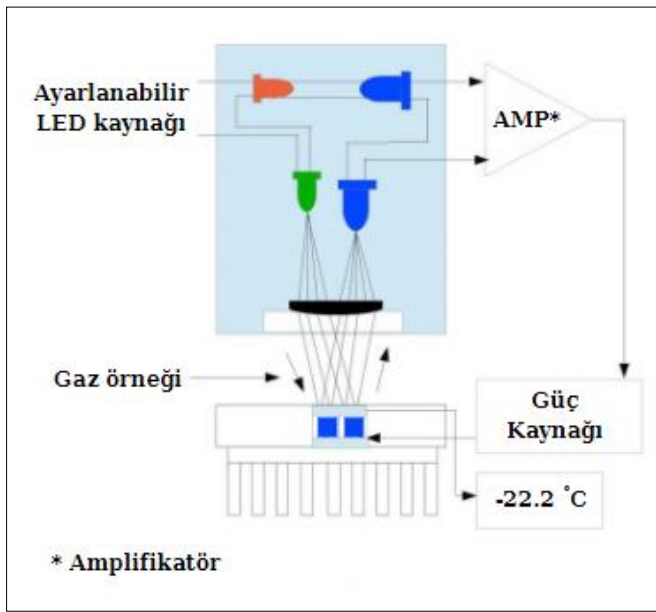


Şekil 2.3. LiCl çiy noktası sensörü şematik gösterimi [13]

RH %12'nin üzerinde olduğunda, LiCl çözelti içinde sıvılaşır. Bağıl nem arttıkça, LiCl daha fazla nem emer ve LiCl'de daha fazla iletken iyon bulunur, bu nedenle direnci azaltır. Tellere sabit bir voltaj uygulandığında, daha düşük dirençli daha yüksek akım olacaktır, bu nedenle sensör ısınır. LiCl'deki su, ısınma nedeniyle buharlaşacak ve bu da daha yüksek dirence neden olacaktır. LiCl solüsyonu ile RH arasında dengeye ulaşıldığında bu işlem duracak ve sıcaklık sabit kalacaktır. Ardından sıcaklık okunur ve bağıl nem veya çiy noktasıyla ilişkilendirilir. LiCl çiylenme noktası sensörlerinin ana avantajı doğruluktur. Ancak, yanıt süreleri uzundur ve düzenli bakım gerektirirler.

2.1.4. Soğutulmuş ayna higrometreleri

Bu sensörlerde, gaz numunesi belirli bir basınç altında aynanın üzerinden akar, sıcaklık ayna yüzeyinde çiy görünmesine neden olan bir noktaya düştüğünde, aynanın sıcaklığı çiy noktasıdır. Soğutulmuş ayna higrometrelerinde kullanılan ayna genellikle gümüş veya bakır gibi iyi ısı iletkenliğine sahip bir malzemeden yapılır. İridyum (Ir), Rubidyum (Rb), Nikel (Ni) veya Altın (Au) gibi kararmayı ve oksidasyonu önlemek için bazı inert metaller kullanılmalıdır [15].



Şekil 2.4. Soğutulmuş ayna higrometreleri şematik gösterimi [15]

Aynayı soğutmak için bir termoelektrik soğutucu kullanılır. Ayna yüzeyi bir ışık demeti ile aydınlatılır ve yansıyan ışık bir fotodetektör ile izlenir (Şekil 2.4). Yansıyan ışık, ayna yüzeyinde çiy damlacıkları oluştuğunda dağılır. Azalan yansıyan ışıkla birlikte fotodetektör çıkışı azalacaktır. Termoelektrik ısı pompası ise bir kontrol sistemi aracılığıyla kontrol edilir. Aynanın sıcaklığını çiy noktasında tutmak için hassas minyatür platin dirençli termometre aynaya gömülüdür. Sensör, ayna sıcaklığı buzlanma noktasının üzerinde olduğunda çiy noktasını, 0 °C'nin altında donma noktasını ölçer. Mutlak nem, çiy/don noktasından hesaplanabilir ve bağıl nem, çiy/don noktası ve gaz sıcaklığından elde edilebilir. Soğutulmuş ayna higrometresinin avantajları, yüksek doğruluğu ve uzun vadeli kararlılığıdır. Dezavantajı, aynanın temiz tutulması gerekliliğidir, bu da deney sırasında özen ve dikkat ve

sık sık bakım gerektirir. Bununla birlikte, soğutulmuş ayna higrometreleri, doğruluğun gerekli olduğu uygulamalarda genellikle referans sensör olarak kullanılır.

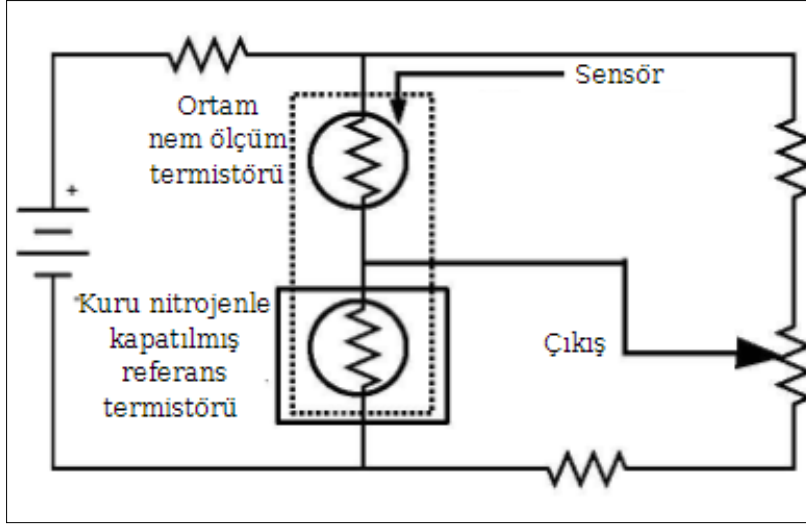
2.2. Minyatürleştirilmiş Nem Sensörleri

Minyatürleştirilmiş nem sensörleri, yukarıda bahsedilen klasik ölçüme kıyasla birçok avantaja sahip oldukları için popüler hale gelmektedir. Mikroelektromekanik sistemler (MEMS), minyatürleştirilmiş sensör yapma yöntemleri arasındadır. Algılama prensiplerine göre, minyatürleştirilmiş nem sensörü beş kategoriye ayrılabilir. Bunlar; termal iletkenlik, optik, gravimetrik, kapasitif ve direnç tipli nem sensörleridir [16].

2.2.1. Termal iletkenlik nem sensörleri

Termal iletkenlik, bir malzemenin fizikte ısı iletme özelliğidir. Kuru hava ile su buharı içeren hava arasındaki termal iletkenlik farkını ölçen termal iletkenlik nem sensörü, mutlak bir nem sensörüdür. Kuru havada bir nesnenin sıcaklığı, havada su buharı bulunduğundan daha kolay değiştirilebilir[17].

Termal iletkenlik nem sensörleri iki uyumlu termistörden oluşur [17]. Bu iki termistör aynı DC köprü devresine yerleştirilir. Termistörlerden biri, kuru nitrojenle kapatılmış referans, diğeri ise ortama maruz kalan mutlak nemi test etmek içindir (Şekil 2.5). DC köprü devresinin çıkış voltajı, mutlak nem ile orantılıdır. Standart bir CMOS işlemiyle üretilmiş bir termal iletkenlik nem sensöründe, alt tabakadan izole etmek için kullanılan iki asılı p-n bağlantı diyotu kullanılır. Diyotlardan biri, referans diyot olarak bir silikon kapak takılarak mühürlenir. Diğer diyot, ortamda açığa çıkan test diyotudur. Sonuçlar, bu sensörün iyi hassasiyete, düşük güç tüketimine ve düşük maliyete sahip olduğunu gösterir.



Şekil 2.5. Termal İletkenlik Nem Sensörünün şematik gösterimi [17]

2.2.2. Optik nem sensörleri

Optik nem ölçümü, nemin bir fonksiyonu olarak genliğe, polarizasyona ve frekans değişikliğine dayalı olabilir [13]. Sensör neme duyarlı film ile kaplandığında, filmin kırılma indisi su buharını emerken değişecektir. Nem, kırılma indisinin değişimine bağlıdır [18].

Bazı çalışmalarda, polimer içermeyen sensöre kıyasla, fotonik kristal fiberin (PCF) mikro deliklerine sızan neme duyarlı polimer ile sensörün hassasiyeti iyileştirildiği gözlemlendi [19]. Bu sensörler, kompakt uzunluk, düşük maliyet ve basit imalat avantajlarına sahiptir.

Kobalt klorür katkılı PVA film, optik nem sensörü [19] üzerine kaplanmış neme duyarlı bir filmidir. PVA film su emilimindeki değişime göre nem oranını %25 ile %65 algılayabilir. PVA algılama malzemesi, bu nem sensörüne iyi bir stabilite sağlayan stabil bir malzemedir. Aitor Urrutia ve arkadaşları algılama filmi olarak poli (akrilik asit) (PAA) elektrospun nanolifleri içeren bir optik nem sensörü sundu [20].

2.2.3. Gravimetrik nem sensörleri

Gravimetrik ölçüm, higroskopik malzemenin nem emiliminin neden olduğu kütle değişikliğine dayanır. Nem, kütle değişikliğinden kaynaklanan rezonans frekansındaki değişim ile tespit edilebilir [21].

Pascal-Delannoy ve arkadaşları Quartz Crystal Microbalance (QCM) ve Peltier modülüne [21] dayalı bir gravimetrik nem sensörü tanımladı. Peltier elemanı doğrudan kristale bağlanır. Peltier elementi ile kuvars arasındaki temas, termal iletkenliği iyileştirmek için gümüş gres kullanılarak yapılır. Kuvars sensör frekansını kuvars referans frekansıyla karşılaştırarak, RH'yi tespit etmek için gecikme süresini bilebiliriz. Sonuç, bu sensörün bağıl nem aralığını hızlı bir yanıt süresi ve iyi bir doğrulukla %20 ila %95 arasında ölçebildiğini gösterir.

Gravimetrik nem sensörünün bir başka örneği, nem algılama filmi olarak elektrosprey polimerize elektrolit nanopartikülleri kullanan bir yüzey akustik dalga (SAW) nem sensörüdür. Bu sensör geniş bir bağıl nem algılama aralığına, yüksek hassasiyete, tekrarlanabilirliğe ve hızlı yanıt süresine sahiptir.

2.2.4. Kapasitif nem sensörleri

İki paralel plakanın kapasitansı, C şu şekilde hesaplanabilir:

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2.1)$$

İki paralel plakanın örtüşme alanı olan bu formül, ϵ_r ve ϵ_0 sırasıyla dielektrik sabiti ve elektrik geçirgenliğidir ($\epsilon_0 \approx 8,854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$) ve d , iki paralel plaka arasındaki mesafedir.

Kapasitif RH sensörleri, geniş bir RH aralığındaki doğrusallıkları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır [22]. Kapasitif RH sensörlerinin çalışması, ortamdaki RH'nin bir fonksiyonu olarak hassas bir malzemenin dielektrik sabitinin değişmesine dayanır [23]. Nem sensörü için algılama elemanları olarak birkaç farklı malzeme kullanılır; seramik ve polimerler en çok kullanılan iki türdür [12], [24].

Su buharının varlığında, havanın dielektrik sabiti ϵ_r , [25] Eş. 2.2 ile hesaplanabilir.

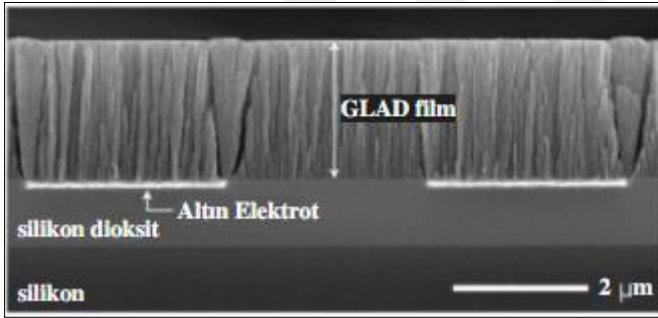
$$\epsilon_r = 1 + \frac{211 \times 10^{-6}}{T} \left(P + \frac{48P_s}{T} RH \right) \quad (2.2)$$

Bu eşitlikte T mutlak sıcaklıktır, P ve P_s , T sıcaklığında nemli hava ve doymuş su buharının basıncı ve RH bağıl nemdir.

Eş. 2.1, kapasitans C 'nin dielektrik sabitiyle orantılı olduğunu gösterir; Eş. 2.2, dielektrik sabiti ϵ_r 'in bağıl nem, RH ile orantılı olduğunu gösterir. Dolayısıyla kapasitans, aşağıdaki gibi gösterilen bağıl nem ile yaklaşık orantılıdır [25]:

$$C_h \approx C_0(1 + a_h RH) \quad (2.3)$$

Eş. 2.3'de C_0 , RH % 0 olduğunda C kapasitansıdır. Oksit bazlı seramiğin [12] temel türlerinden biri olan TiO_2 , kapasitans nem sensörlerinin yapımında [28] kullanılır. Algılama materyali olarak nanoyapılı TiO_2 kullanılarak kapasitif nem sensörü üretilmiş çalışmalar literatürde mevcuttur. Bu sensör için eş düzlemlili birbirine bağlı elektrot (IDE) yapısı kullanılır (Şekil 2.6). Bu sensörün avantajı, geniş hassasiyet aralığı ve hızlı tepki süresidir.

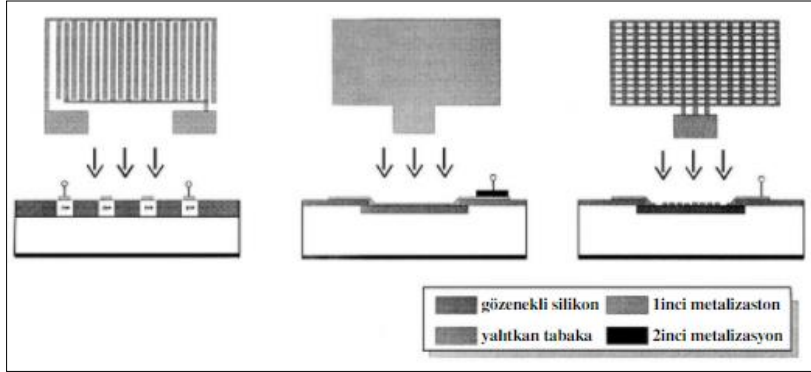


Şekil 2.6. Birbirine bağlı elektrot (IDE) yapısının SEM cihazı altındaki görüntüsü

Al_2O_3 , yüksek sıcaklıklara uygun olması ve geniş bağıl nem aralığında herhangi bir etki göstermemesi nedeniyle en çok kullanılan seramik algılama malzemelerinden biridir. Alt tabaka olarak alüminyum kullanarak, silikon yongalar üzerinde üretilen mikro boyutlu anodik alüminyum oksit (AAO) sensörleri üretilir. Bu AAO bazlı nem sensörü, ortalama olarak % 15pF / RH civarında yüksek bir hassasiyete sahiptir.

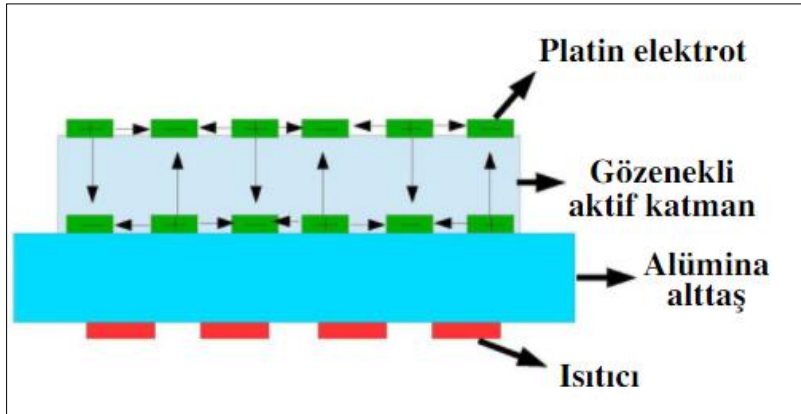
Çalışmalarda, algılama malzemesi olarak gözenekli silikon kullanan yeni bir kapasitif nem sensörü sunulmuştur [26]. Gözenekli silikon dielektrikli bir kapasitör, bir yenileme direnci ve iki termoreztor içeren sensördür. Kapasitörün hassasiyeti ve sensör özelliklerinin tekrar üretilebilirliği, büyük ölçüde gözenekli silikonun elektriksel olarak nasıl temas ettiğine

bağlıdır. Şekil 2.7, elektrot konfigürasyonunun üç örneğini göstermektedir. Bu nem sensörü mekanik ve termal parçalar üzerinde iyi bir stabiliteye sahiptir.

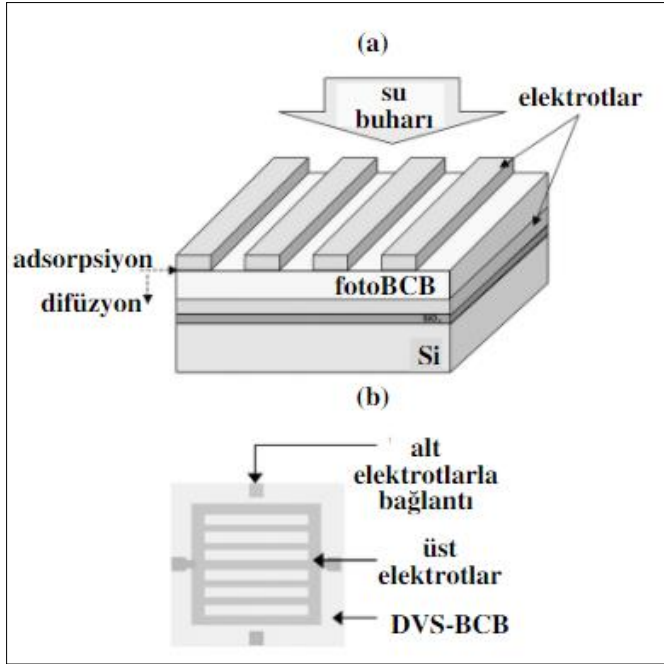


Şekil 2.7. Elektrot konfigürasyonunun 3 örneği; (sol) interdigital elektrot, (orta) düz elektrot ve (sağ) mesh yapıda elektrot [26]

Seramik nem sensörleri için başka bir algılama malzemesi de Huebnerite ($MnWO_4$) dir, [27]. Nem sensörü, birbirine bağlı iki elektrot arasına $MnWO_4$ yerleştirilerek sandviç yapı ile üretilir (Şekil 2.8). Alümina, alttaş olarak kullanılır ve ısıtıcılar, alttaşın arka tarafında imal edilir. Geleneksel cam fritler yerine LiCl tozları yapışma artırıcı olarak kullanılır. Yüksek hassasiyet ve hızlı tepki, bu nem sensörünün avantajlarıdır.

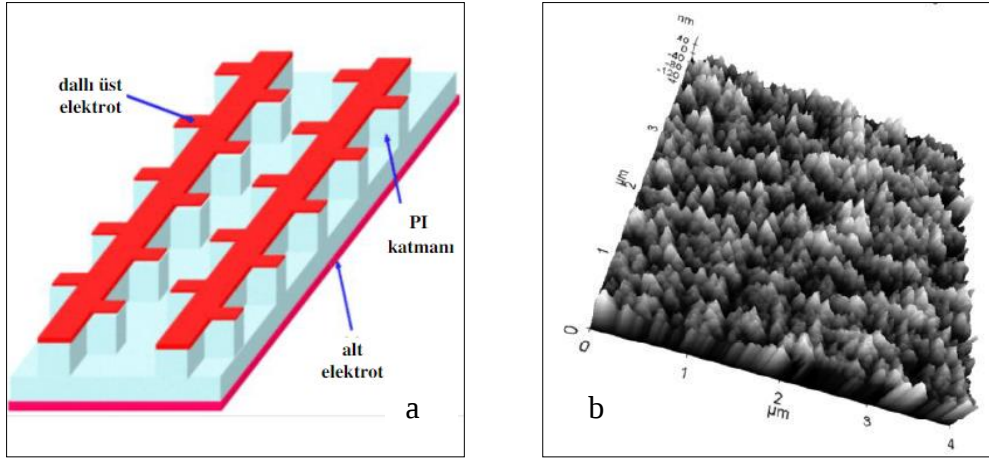


Şekil 2.8. Sandviç yapıli seramik nem sensörü kesiti [27]



Şekil 2.9. DVS-BCB tabanlı nem sensörünün (a) kesiti ve (b) üstten görünümü [28]

Polimer bazlı nem sensörüne bir örnek, Divinil siloksan benzosiklobuten (DVS-BCB) [28], [29] kullanılarak yapılan hızlı yanıt veren kapasitif bir nem sensörüdür. Sensör, paralel elektrotlarla üretilir ve Şekil 2.9'de gösterilen DVS-BCB ile kaplanır. Üst elektrotların genişliği ve üst elektrotlar arasındaki boşluk aynı ise, genişliği ve aralığı daha küçük olan sensör daha yüksek hassasiyete sahiptir ve daha hızlı yanıt verir. Poliimid (PI), düşük duyarlılığı, doğrusal davranışı ve geniş bir sıcaklık aralığında kararlılığı nedeniyle algılama malzemesi olarak kullanılır [30]. Nem sensöründe, güvenilirliği artırmak için silikon bir alt tabaka üzerinde bir boşluk bulunur. Al alt elektrot, bir PI algılama katmanı ve dallara sahip tarak şeklinde bir Al üst elektrot, sensörü oluşturur (Şekil 2.10). Kazınmış PI katmanına sahip kapasitif nem sensörü, 303 fF / % RH hassasiyetine kıyasla 350 fF / % RH hassasiyetine ve 40 saniye yanıt süresine ve aşındırılmamış PI katmanına sahip sensörün 122 saniye yanıt süresine sahiptir. Yüksek hassasiyet ve düşük tepki süresi, bu kapasitif nem sensörünün avantajlarıdır. Hyemin Lee ve arkadaşlarının kullandığı bu sensörde ayrıca algılama malzemesi olarak poliimid kullanan bir nem sensörü imal etmektedir [31].



Şekil 2.10. a) PI tabanlı kapasitif nem sensörünün üstten görünümü ve b) PI'in AFM görüntüsü [30]

Nano çim PI, nem algılama malzemesi olarak birbirine geçmiş altın elektrotların üstündedir. Nano çim PI'nin AFM görüntüsü Şekil 2.10 'da gösterilmektedir. Bu nem sensörü, nano çim yüzey alanı düz yüzeyin 21 katı olduğu için verimli su adsorpsiyonu sunar. Nano çim yapısı, nem sensörünün daha yüksek hassasiyete ve daha hızlı tepki süresine sahip olmasını sağlar.

2.2.5. Rezistif nem sensörleri

Belirli bir nesnenin direnci iki faktöre bağlıdır: malzeme ve şekil. Sabit kesitli bir malzemenin direnci şu şekilde hesaplanabilir:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.4)$$

Eş. 2.4'de ; ρ elektriksel direnç, L iletkenin uzunluğu ve A iletkenin kesit alanıdır. Direnç neme maruz kaldığında, iyonik fonksiyonel gruplar, direncin elektriksel iletkenliğini artırmak için ayrışacak ve bu da direncin azalmasına neden olacaktır. Hong ve arkadaşları, 3-Aminopropyltriethoxysilane (APTS) ve n-butyl bromide (BB) içeren dirençli bir nem sensörü imal ettiler. Bu bahsedilen çalışmada; APTS ve BB, etanol içinde karıştırılır ve daha sonra, üstte iç içe altın elektrot bulunan bir seramik alttaşı üzerinde biriktirilir. Bu rezistif nem sensörü, geniş bir bağıl nem aralığında (%11 ile %97) ve küçük duyarlılık (yaklaşık %1 bağıl nem) seviyesinde iyi hassasiyet sergiler. Sensör ayrıca deneylerle kanıtlanmış iyi çevresel kararlılığa ve yüksek su direncine sahiptir. Algılama materyali olarak çinko oksit nanotelleri (ZnO NWs) kullanılan bir nem sensörü [32] alttaşı olarak, termal olarak

büyütülmüş oksitli Si plakaları kullanılmıştır. ZnO NW'ler, alt tabakanın üstüne imal edilen bağımsız altın elektrotlar arasına yerleştirilir. Dirençli nem sensörü, yüksek yüzey hacmi oranı sayesinde su moleküllerini kolayca emebilir [33].

Plazma ile işlenmiş karbon nanotüp / poliimid (p-MWCNT / PI) başka bir çalışmada [34] algılama materyali olarak kullanılmıştır. Si alttaşının üstünde bir Si_3N_4 köprüsü imal edilmiş, Pt/Ta elektrotları daha sonra Si_3N_4 'ün tepesine yerleştirilmiştir. MWCNT / PI filmi, elektrotlar arasında Si_3N_4 'ün üstüne yerleştirilir. MWCNT / PI filmli dirençli nem sensörü, yalnızca poliimidden oluşan sensöre kıyasla geniş bir bağıl nem aralığında daha iyi doğrusallık ve daha düşük direnç göstermiştir. Dirençli nem sensörlerinin çoğu, oldukça doğrusal olmayan yanıtlar gösterir.

Rezistif nem sensörleri tuz, iletken polimer veya işlemde geçirilen tabakalar gibi higroskopik malzemeden üretildiğinde ortamın nemine duyarlılık gösterir. Bu duyarlılık havadaki nemin empedans değiştirmesi ile oluşur. Neme duyarlı bir iletken ve kontak metallere oluşan kaplama havayı geçirme özelliğine sahip delikli yapıdadır. Empedans değişimi sayesinde gerilim, akım ya da direnç büyüklükleri ölçülebilir. Çevredeki su moleküllerini absorbe eden rezistif nem sensörlerinde sensör malzemesinde elektriksel değişim gözlenir. % 100 bağıl nemin bulunduğu ortamda dahi zarar görmeyen bu tip sensörler oldukça hassas empedans değişimlerine cevap verir. Hata oranları % 2 - % 3 bağıl nem aralığındadır. Bu tip nem sensörlerinin üretim malzemeleri, düşük nemli ortamlarda bile duyarlılık gösteren polimer esaslı malzemeler, kimyasal dayanıklılığı yüksek olan seramik malzemeler ve cevap süresi uzun olan elektrolit malzemelerdir. Algılayıcı maddenin direnci ile ortam nemi arasında ters orantı vardır ve nem değeri arttıkça direnç değeri düşer. Nem sensörlerinin çoğu için empedans aralığı 1 k Ω ile 100 M Ω arasında değişim gösterir [35]. Nem sensörü üretiminde algılayıcı malzeme olarak hidrofilik ve hidrofobik organik polimerler, seramik malzemeler, metal oksitler ve polimer kompozitler kullanılır. Neme duyarlılıklarının yüksek olması, gözenekli yapıları ve kimyasal dayanıklılarından dolayı algılayıcı malzeme olarak metal oksitler ve seramikler sıklıkla tercih edilir. ZnO, MgO, CoO ve SnO₂ elektriksel özelliklerinde meydana gelen değişimlere dayalı olarak çalışan metal oksitlerdir. Ayrıca TiO₂, MgAlO ve ZnCrO gibi seramik malzemeler ve KClO₂, NaCl ve K₂CO₃ gibi katı elektrolitler ve metal tuzları gibi inorganik yapılar nem sensörü üretiminde sıklıkla kullanılır.

Bu tez çalışmasında kullanılan nem sensörü tipi rezistif nem sensörüdür.



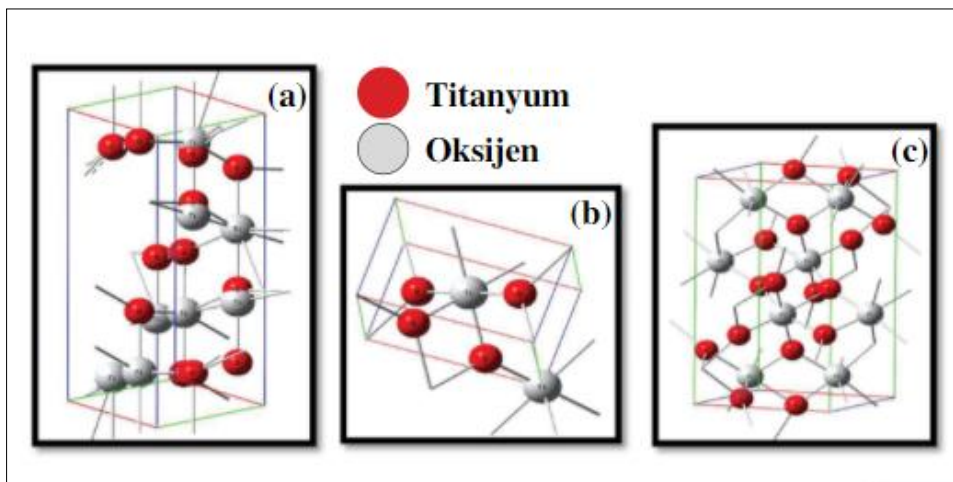


3. TİTANYUM DİOKSİT (TiO_2) VE KALAY (IV) OKSİT (SnO_2)

Bu tez çalışmasında aktif katman olarak TiO_2 ve SnO_2 kullanıldı. Kullanılan malzemelerle ilgili genel bilgiler tezin bu bölümünde verildi.

3.1. Titanyum Dioksit (TiO_2)

Kimyasal ve biyolojik olarak aktif olmayan ve çevreye zarar vermeyen metal oksit malzeme olmasından dolayı, TiO_2 , sağlıktan gıdaya birçok endüstriyel sektörde tercih edilmektedir. TiO_2 , güneş koruyucuların ana aktif bileşeni olarak da kullanılmaktadır. Görünür ve yakın kızılötesi (IR) bölgedeki saydamlığı ve yüksek optik endeksinden dolayı optik kaplamaların çoğunda, yansıma önleyici katman olarak TiO_2 kullanılır [36]. TiO_2 , yüksek kararlılık ve istenilen hassasiyeti sağladığı için, sensör uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. TiO_2 kristal yapısında anataz, rutil ve brokit olmak üzere üç fazı bulunur [37]. TiO_2 'nin en yaygın bilinen fazı rutildir. Rutil faz, siyah veya kahverengi dörtgen formda oluşur ve yüksek sıcaklıkta termodinamik olarak kararlı bir fazdır. Daha az belirgin olarak oluşan doğal fazları ise rhombohedral şekilli anataz ve brokittir. TiO_2 , brokitte yarı kararlı, anataz ve rutil fazda kararlı özellik gösterir. Yarı kararlı fazları, 650 °C ve üzerinde ısıya maruz kaldığında rutil faza geçer [38]. Anataz ve rutil fazı kararlı faz özelliğinden dolayı daha çok tercih edilir. Bu iki faz tetragonal sistemde kristalleşir. Şekil 3.1'de verilen TiO_2 kristal yapısına bakıldığında, her iki yapıda da titanyum atomunun altı oksijen atomu ile bağlı olup, her oksijen atomunun üç titanyum atomu ile çevrili olduğu görülmektedir [36].



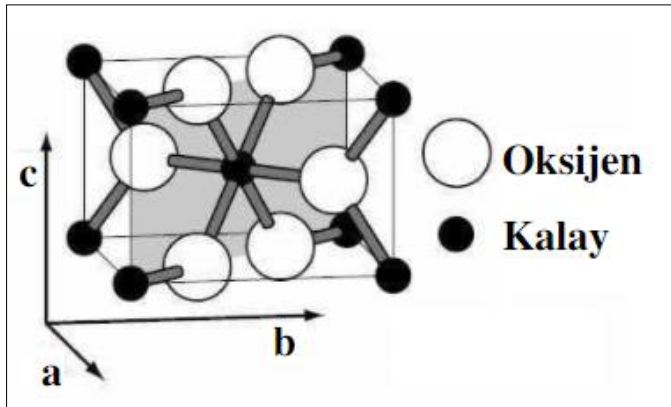
Şekil 3.1. TiO_2 kristal yapısı, (a) anataz, (b) rutil, (c) brokit [39]

TiO₂, anataz fazında 3,2 eV ve rutil fazında 3,0 eV yasak enerji bant aralığına sahip doğal bir n-tipi yarıiletkendir [40], [41], foton Emilimi 380 nm nin altındaki ($h\nu \geq E_g$) bir dalga boyuna karşılık gelir [36]. Elektronik yapısı 3d²4s²'dir. Yüksek (~85) dielektrik sabitine sahip olduğu için malzeme kullanım alanları açısından daha avantajlı hale gelmiştir. İyon/elektron bombardımanı veya malzemenin uygun şekilde yüksek sıcaklıkta ısıtılmasıyla oluşan nokta kusurları, ağırlıklı olarak oksijen iyonu boşlukları malzemenin elektronik yapısında değişikliklere neden olur, bu da sensör teknolojileri için büyük avantaj sağlar [37]. Yüksek (~2,7) kırılma indisine sahip olan TiO₂'nin geniş bant aralığı görünür ışıktaki duyarlılık, ultraviyole ışınımında güçlü emilim sağlar [39].

Bu tez kapsamında üretilen sensörler, hassas, dayanıklı ve düşük maliyetli olmalıdır. TiO₂'nin nem sensörü uygulamalarındaki katkısı yüksek olup birçok araştırmacı nem sensörü araştırmalarında bu malzemeyi kullanmaktadır.

3.2. Kalay (IV) oksit (SnO₂)

Kalay(IV) oksit (SnO₂) geniş bant aralığına sahip n tipi bir yarı iletken [42]. Düzgün oktahedranların köşelerindeki 6 oksijen atomunun merkezinde kalay atomu bulunur.



Şekil 3.2. SnO₂ in örgü yapısı ($a=b=4.737 \text{ Å}$ ve $c=3.186 \text{ Å}$) [43]

Her oksijen atomu eşkenar üçgenin köşelerindeki 3 kalay atomu tarafından çevrelenmiştir [44]. Tamamen stokiometrik kalayoksit yalıtkandır [44]. Şekil 3.2. de gösterilen, 2 kalay 4 oksijen atomu içeren, Tetragonal rutil yapıda olan örgü yapısının mükemmel olmayışı ve oksijen boşlukları sebebiyle iletkenlik özelliği gösterir [45]. SnO₂ iletkenliği çeşitli elementlerin katkılanmasıyla artırılabilir. Bu katkılanan elementler In, Nb, Sb, F'dur.

İndiyum kalay oksit (ITO) ilk ticari olarak kullanılmış katkılanmış SnO_2 filmidir. 3.5 eV – 4.2 eV gibi geniş bir bant aralığına sahip olan SnO_2 ince film elektromanyetik spektrumun görülebilir bölgesinde büyük bir geçirgenliğe sahiptir. SnO_2 filmler genellikle 400–2000 nm arasındaki dalga boylarında geçirgendir. Serbest elektronların soğurulmasından dolayı taşıyıcıların artmasıyla birlikte geçirgenlik azalır. SnO_2 yaklaşık ~8 mikron dalga boyu üzerinde yüksek miktarda yansıtıcı özellik gösterir. İletken bandındaki foton ve elektronların etkileşimiyle ilgili olan bu yüksek kızılötesi yansıtıcılık ise kaplamanın direkt olarak iletkenliğini etkiler [44]. SnO_2 ve SnO olmak üzere kalayın iki ana oksiti vardır ve bu iki oksit kalayın +2 ve +4 olmak üzere iki değerliğinin olduğunu gösterir. Elektronik bant aralığı 3.6 eV olarak aktarılan SnO_2 , elektronik bant aralığı tam olarak bilinmeyen fakat bazı yerlerde 2.5–3 eV olduğu söylenen SnO ’dan daha büyük bir bant aralığına sahiptir. SnO_2 tetragonal rutil yapıdadır ve daha yoğun ortorombik yüksek basınç fazı gösterir [46]. Yüksek sıcaklıklarda SnO ile SnO_2 arasında orta fazı bulunur. SnO_2 geniş bant aralığına sahip olan bir n-tipi bir yarıiletken olmasının yanında düşük elektriksel iletkenlik, kızılötesi ışınlar için yüksek yansıtıcılık, yüksek mekanik sertlik, yüksek optik geçirgenlik, iyi çevresel kararlılık gibi birçok iyi özelliği bir arada bulunur [44]. Bununla birlikte SnO_2 , kimyasal kararlılık ve yarı iletken özelliklerinden dolayı gaz ve nem sensörleri üretiminde tercih edilirken [46], geçirgen ve iletken özelliğinden dolayı, amorf Si güneş hücrelerinde F katkılanmış SnO_2 sıklıkla üst elektrot olarak kullanılır. Ayrıca buhar veya buzu buharlaştırarak uzaklaştırmasından dolayı uçaklarda pencerenin üzerine uygulanan ince SnO_2 filmi kullanılır [43].



4. KULLANILAN YÖNTEMLER VE KARAKTERİZASYON SİSTEMLERİ

Bu tez çalışmasında, nem sensörleri için aktif katman olarak TiO_2 ve SnO_2 üretildi. Bu malzemelerin üretilmesinde farklı teknikler kullanıldı ve kullanılan üretim tekniklerine göre nem sensörünün, sensör özellikleri incelendi. TiO_2 üretilirken, eş-püskürme sistemi, daldırma tekniği, Dr. Bıçağı ve ultrasonik banyo ile kaplama tekniği kullanıldı. SnO_2 üretilirken sadece daldırma tekniği kullanıldı. Üretilen aktif katmanlar eş zamanlı olarak ısıya dayanıklı cam üzerinde büyütüldü ve cam üzerine büyütülen aktif katmanların X-Işını Kırınımı (XRD), Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ve Morötesi-görünür bölge (uv-vis) spektroskopisi ile ince film karakterizasyonları yapıldı. Nem sensörünün diğer bir katmanı olan elektrot için inter dijital elektrot (IDE) ve “s” şeklinde (s desen) tasarlandı bu elektrotlardan, platin (Pt) malzemesine sahip olanlar eş-püskürtme ile ve altın (Au) malzemesine sahip olanlar ısı buharlaştırma ile büyütüldü, lazer ablasyon ile desenler işlendi. Elektrotlardan gümüş (Ag) malzemesine sahip olanlar ink-jet kullanılarak üretildi. Oluşturulan nem sensörleri nem kabininde ölçüldü. Bu bölümde kullanılan ince ve kalın büyütme yöntemleri ve analiz sistemleri anlatıldı.

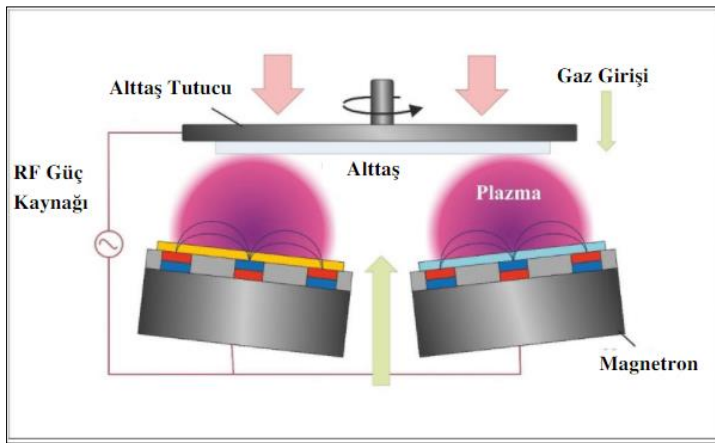
4.1. İnce Film Üretim Yöntemleri

Bu tez çalışmasında nem sensörü üretimi için iki farklı aktif katman kullanıldı ve farklı ince film üretim yöntemleri ile üretildi. TiO_2 aktif katmanı için eş-püskürtme sistemi, daldırma, Dr. Bıçağı ve Ultrasonik banyo ile kaplama yöntemleri kullanıldı. SnO_2 aktif katmanı için ise sadece daldırma yöntemi kullanıldı. Bu bölümde aktif katman üretiminde kullanılan ince film üretim yöntemlerinden bahsedildi.

4.1.1. Eş-püskürtme sistemi

Farklı alttaşlar üzerine çeşitli kalınlıklara sahip katı bir hedef malzemenin kolayca biriktirilmesi için kullanılan vakum kaplama tekniğine “Püskürtme Sistemi” adı verilir. Bu işlemde, iyonize bir gazla (plazma ile) hedef malzemenin yüzeyinde yer alan atomların bombardımanı ve kopan atomların bir alttaş üzerine aktarımı sağlanır. Sistem içerisinde biri anot diğeri katot olmak üzere iki elektrot bulunur. Kaplanması istenen malzeme katot elektrot kısmına, alttaş olarak kullanılacak malzeme ise anot elektrot kısmına yerleştirilir.

Tüm süreç vakum ortamında gerçekleştirilir. İstenilen vakum değerine ulaşıldığında katotta bulunan hedeften atomları koparacak olan plazmanın elde edilmesi işlemine geçilir . Elektrotlar arasına uygulanan gerilimin elde edildiği güç kaynağına göre iki çeşit püskürtme tekniği kullanılır. Güç kaynağı olarak radyo frekans kullanılmış ise RF püskürtme, doğru akım kullanılmış ise DC püskürtme olarak isimlendirilir. Yüksek saflıkta ortamda bulunan asal gaz gibi reaktif olmayan bir gazın plazma haline geçmesini sağlamak için anot ve katot arasına uygun miktarda gerilim uygulanır. Yüksek saflıktaki bu gaz, elektrotlara uygulanan gerilim farkından dolayı hareket eden serbest elektronların etkisiyle iyonlaşarak gaz halden plazma haline geçer. İyonlaşmış halde bulunan Ar atomları da ikincil elektronlar olarak ortamda yer alan elektronlara eklenir. Böylece elektronların, yüklü ve yüksüz Ar atomlarının yer aldığı bir plazma ortamı meydana gelir. Hedef üzerinde yer alan kesici açıldıktan sonra Ar^+ iyonları hedefe doğru yönlendirilerek malzeme üzerinden atom kopartır. Anot kısmına yerleştirilmiş olan alttaşın yüzeyinde biriken koparılmış bu atomlar film oluşumunu sağlar. Hedefin arka kısmında yer alan, sistemde oluşan elektrik alanına dik manyetik alan oluşturan kalıcı mıknatıslar, plazmayı hedefin yüzeyinde sınırlamak için kullanılır. Katot yakınlarda hapsedilmiş olan elektronların alttaş yüzeyindeki bombardıman etkisini azaltmak için manyetik akı boyunca sarmal biçimde hareket eden manyetik alanlar kullanılır. Kalıcı mıknatısların diğer bir etkisi de katot etrafındaki iyonizasyonu arttırmaktır. DC püskürtme yöntemi iletken malzemeler için kullanılırken, RF püskürtme yöntemi dielektrik ve yarıiletken malzeme tipleri için kullanılır [47].



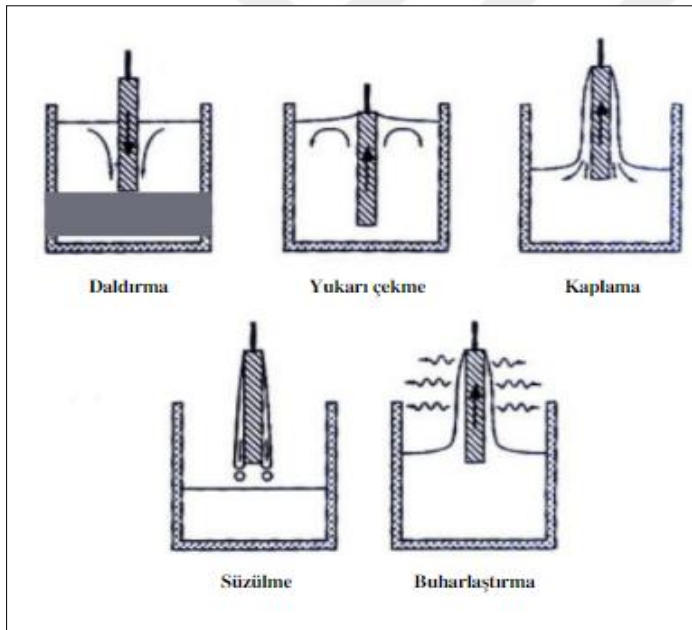
Şekil 4.1. Püskürtme sisteminin şematik gösterimi [48]

Tasarımda aynı anda birden fazla hedefin ortak bir şekilde alttaşı odaklayarak kullanılmasına ise “Eş Püskürtme” adı verilir. Anot kısmında yer alan alttaşı malzeme z eksenini etrafında döndürülerek yüzeyin her noktasında homojen kalınlık değeri elde edilmeye çalışılır [48].

Bu tez çalışmasında kullanılan sistem eş-püskürtme sistemi olmasına rağmen tek hedef malzeme kullanıldığı için püskürtme sistemi olarak bahsetmek de yanlış olmaz.

4.1.2. Daldırma tekniği

Daldırma tekniği, sol-jel kaplama teknikleri içerisinde ki en önemli tekniklerdendir. Saydam ve iletken film kaplamaları bu yöntemle elde edilebilir [49]. Daldırma ile kaplama tekniği 5 aşamadan oluşur, bunlar; daldırma, yukarı çekme, kaplama, süzülme ve buharlaşmadır. Bu aşamalar Şekil 4.2’ de gösterildi.



Şekil 4.2. Daldırma tekniğinin aşamaları [50]

Numune sole daldırılır ve daldırıldığı hızla solden çekilerek çıkarılır. Kaplama aşamasında numunenin sol ile temas eden yüzeyi film kaplanmış olur. Kaplamanın bu aşamasında yer çekimi kuvveti, sol ile numune arasındaki yüzey gerilimi ve sürtünme kuvveti etkili olur [50]. Süzülme aşamasında da aynı kuvvetler etkili olmaktadır ve bu aşamada yüzeydeki fazla sol damlacıkları süzülerek yüzeyi terkeder. Süzilemeyen sol ise daldırma tekniğinde ki buharlaşma aşamasında uzaklaşır ve son aşamada numunede ki kuru jel tavlama işlemiyle

film haline gelir [51], [52]. Bu yöntemle üretilen filmlerin homojenliği ve kalınlığı kontrollü olarak yapılabilir. Landau-Levich tarafından türetilen, Eşitlik 4.1’de film kalınlığı hesabı gösterildi [53].

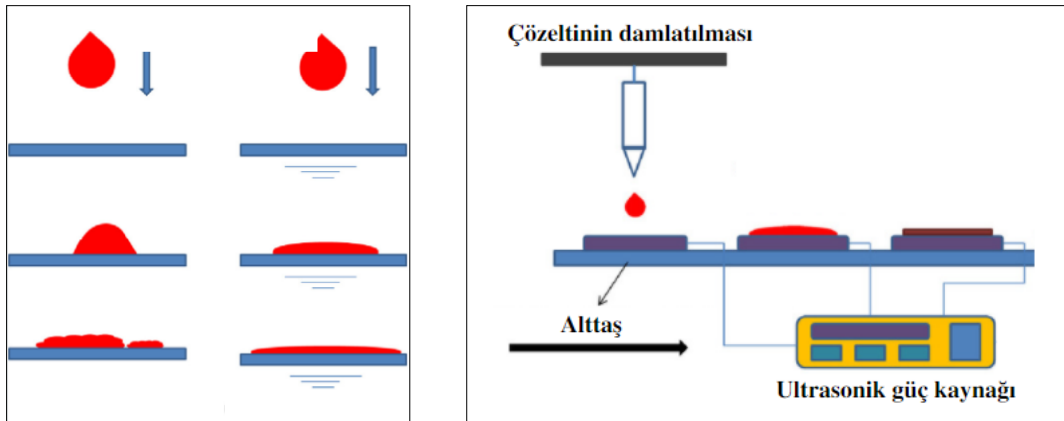
$$h = 0,94 \frac{(\eta U)^{2/3}}{\gamma_{LV}^{1/6} (\rho g)^{1/2}} \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1’de verilen h : film kalınlığı, η : sıvı viskozitesi, U : daldırma hızı, γ_{LV} : sıvı-uhar yüzey gerilimi, ρ : solün yoğunluğu, g : yerçekimi ivmesidir.

Bağıntıya göre film kalınlığı daldırılıp çıkarılma süresinden değil, hızından etkilendiği görülmektedir. Daldırma ile kaplama yönteminin avantajları homojen kalınlık ayarlanabilmesi, çoklu kaplama yapılabilmesi, geometrik sınırlama olmaması olarak kabul edilebilir. Dezavantajları ise çok katmanlı sistemler için uygulanamaması, tek taraflı kaplamanın zorluğudur [51].

4.1.3. Ultrasonik banyo ile kaplama tekniği

Genellikle kullanılan ultrasonik püskürtme tekniği olarak bilinen ultrasonik kaplama yöntemi hazırlanan çözeltinin şırınga ile hatta sürülmesi ve nozüle gelen çözeltinin ultrasonik ses dalgaları ile atomize edilerek ısıtılmış olan alttaş üzerine püskürtülmesi ile gerçekleşmektedir. Bu tez kapsamında ultrasonik banyo genellikle kullanılan ultrasonik püskürtme tekniği dışında ultrasonik banyo kullanılarak kaplama işlemi gerçekleştirildi.



Şekil 4.3. Ultrasonik banyo ile kaplama tekniğinin gösterilmesi [54]

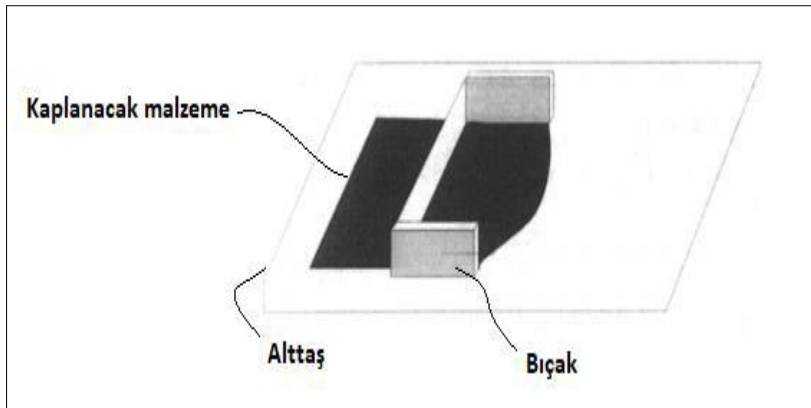
Bu yöntem basit, ekonomik ve vakum gerektirmediği için tercih edilebilen yöntemlerdendir. Şekil 4.3’de gösterildiği gibi, ince film kaplanmak istenen alttaş ultrasonik güç kaynağının bağlı olduğu yüzeye yerleştirilir daha sonra hazırlanan çözeltiden damla şeklinde alttaşın üstüne damlatılır ve ultrasonik banyoda titreştirilir. Bu teknikte ürettiğimiz ince filmler üzerine birçok parametre etki etmektedir. Bu parametreler; alttaş sıcaklığı, hava basıncı, alttaş ile nozül arası mesafe, damlatma zamanı, çözelti konsantrasyonu, çözelti miktarı, başlangıç çözeltisi, geçiş sayısı, çözelti damlacıklarının aerodinamiğidir. Üretilmek istenen filmlerin bütün parametreleri ayarlanabilmekte ve istenilen filmler elde edilebilmektedir. Bu yöntemle üretim yapılırken herhangi bir parametrenin değiştirilmesi elde edeceğimiz filmin bütün özelliklerini değiştirmektedir. Üreteceğimiz filmlere göre parametreler belirlenmekte ve ona göre üretim yapılmaktadır. Bu yöntemin avantajları; düşük donanım maliyeti, yüksek kaplama oranı, hazırlanan çözeltiye istediğimiz miktarda katkı yaparak üretilen filmin özelliklerinin ayarlanabilmesidir. Dezavantajları ise atmosfer şartlarından etkilenmesi, pürüzlü ve homojen yapıların oluşabilmesidir.

Partikül oluşumuna en fazla etki eden parametrelerden birisi konsantrasyon etkisidir. Yapacağımız kaplama kalınlığı veya homojenliğin sağlanması için yoğun ya da seyreltik formda başlangıç solüsyonu ayarlanabilir. Damlacığın merkezindeki konsantrasyon, çözelti denge durumuna eşit veya büyük ise hacimsel çökeltme görülmektedir. Damlacığın merkezindeki konsantrasyon, denge durumundan küçük ise yüzey çökeltmesi gerçekleşmektedir. Hacimsel çökeltme için yüksek, yüzey çökeltmesi için düşük konsantrasyon uygundur. Damlacıklar ısıtılmış bölgede yeterli sürede kalamazlarsa; dar boyut dağılımına sahip partiküller elde edilmektedir. Yüzey çökeltmesi olduğunda küçük boyut dağılımına sahip içi boş veya yoğun yapılar elde edilmektedir. Yalnız bu durum her zaman geçerli olmamaktadır. Bazı durumlarda diğer faktörlere de bağlı olarak geniş boyutlarda yapılara da sahip olabilmektedir [55]. Bu teknikle yapılan kaplamalarda bir diğer önemli faktör ise çözeltinin alttaş üzerine damlatıldığı mesafedir. Bu mesafe, üretilen filmlerin kalitesini ve kalınlıklarını etkilemektedir. Aradaki mesafe ideal değerin üzerinde olursa alttaş üzerinde kaplanmayan bölgelere sebep olmaktadır. Aradaki mesafe normal değerin altında olursa alttaş üzerinde tortular oluşabilmekte ve daha kalın filmler elde edilmektedir. Genellikle aradaki mesafe 30 ile 40 cm arasında değişmektedir [56]. Alttaş sıcaklığı da bu teknikte kullanılan diğer önemli faktörlerden biridir. Alttaş sıcaklığı üretilen filmin fiziksel özelliklerini ve kalınlığını etkilemektedir. Alttaş sıcaklığı ince filmin oluşması için gereken sıcaklık değeri olmadığı zaman filmlerin yüzeye tutunması

zayıf olmaktadır. Genelde, yüksek alttaş sıcaklıkları filmlerin ince olmasına ve düşük alttaş sıcaklıkları ise filmlerin kalın olmasına sebep olmaktadır [57]. Atmosferik ortamda üretim yapmanın getirdiği bir zorluk ta taban sıcaklığını sabit bir değerde tutulamamasıdır. Bu nedenle; alttaş sıcaklığından $\pm 5^{\circ}\text{C}$ gibi bir sapmalar olabilmektedir [58], [59].

4.1.4. Doktor bıçağı yöntemi

Doktor bıçağı (Dr. Bıçağı) kaplama tekniği (Doctor Blade Coating Technique) geniş alan yüzeylerinde ince filmler üretmek için yaygın olarak kullanılan tekniklerden biridir. Bu teknik, başlangıçta ince piezoelektrik malzemeler ve kapasitörler oluşturma tekniği olarak geliştirilmiştir. Günümüzde kabul gören hassas bir kaplama tekniği olarak nispeten yeni bir işlemdir [60]. Bu işlemde, genellikle pasta adı verilen bir çözelti oluşturulur. Pasta, katkı maddeleri (bağlayıcılar, dağıtıcılar veya plastikleştiriciler gibi) ile birlikte parçacıklardan oluşan, iyi karıştırılmış bulamaç şeklindedir. Şekil 4.4’de gösterildiği gibi bir alttaş üzerine yerleştirilir. Bir bıçak ve alttaş arasında sabit bir nispi hareket sağlandığında, pasta alttaş üzerinde ince bir tabaka oluşturmak üzere yayılır ve ardından film tavlınır. Tekrarlanabilirlik özelliğine sahip olan Dr. Bıçağı kaplama tekniği ile oldukça hızlı ve farklı kalınlıklarda ince film üretmek mümkündür. Diğer ince film kaplama teknikleri (elektrokimyasal biriktirme, KBD (kimyasal banyo depolama) ve spreyci kaplama vb.) ile kıyaslandığında bu yöntem ölçeklenebilir, basit ve ekonomik olması sebebiyle çok daha hızlıdır.



Şekil 4.4. Doktor bıçağı kaplama tekniğinin şematik gösterimi [61]

4.2. Fabrikasyon Sistemleri

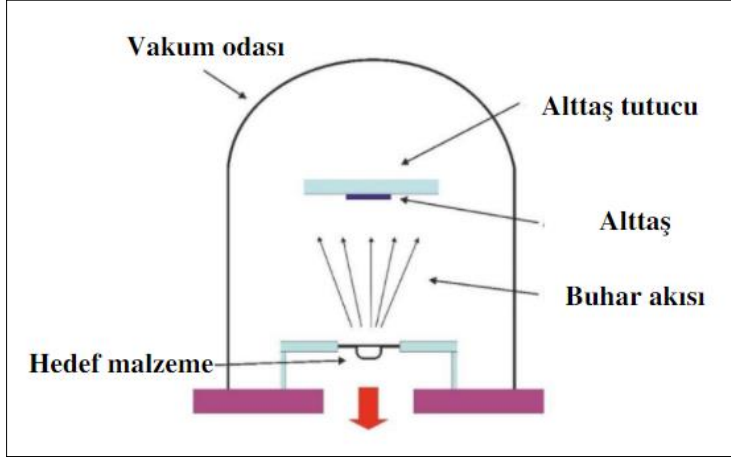
Nem sensörlerinin ölçüm metotlarına göre geliştirilen diğer bir katman da elektrot katmanıdır. Bu bölümde elektrotların üretiminde kullanılan fabrikasyon sistemlerinden bahsedildi. Isıl buharlaştırma ve 4.1.1’de bahsedilen eş-püskürtme sistemi ile kaplanan altaşlara elektrotların desen verme işlemleri lazer ablasyon ile yapıldı. Mürekkepli baskı tekniği ile üretilen elektrotlar inkscape programı ile çizildi ve üretildi.

4.2.1. Isıl buharlaştırma sistemi

Çeşitli kaynaklarda Isıl Buharlaştırma terimi, vakum buharlaştırma veya vakum biriktirme şeklinde kullanılır [47], [62], [63]. Isıl Buharlaştırma, katı bir kaynak malzemenin buhar odası içinde ısıtılmasını ve buhar basıncı üreten bir sıcaklığa getirilmesini içerir. Yüksek dirence sahip sac levha veya filament yardımıyla yapılan ısıtma ile elde edilen buhar akısı altaş yüzeyine birikerek film oluşturulur. Isıtma işlemi, üzerinde bir pota yer alan ve bu potaya kullanılmak istenen yüksek saflıktaki malzeme eklenen ısıtıcı üzerinden akım geçirilerek başlatılır. Isıtma işlemi, pota ile kaynak malzeme arasında reaksiyon gerçekleşmesini önlemek amacıyla çok hızlı bir şekilde yapılır [48] . Bu sistemde, bir kaynaktaki malzeme, çeşitli ısıtma metotları ile ısıtılarak direkt olarak buharlaştırılır. Sistem istenilen malzemeyi buharlaştırabilmek için bir ısıtma kaynağı ve bu kaynağı görecektir şekilde uygun bir yere yerleştirilen altaştan oluşur. Buharlaştırma yapabilmek için kullanılabilecek ısıtma kaynaklarından bazıları; rezistans, indüksiyon, ark, elektron ışını ve lazerlerdir. Altaş istendiğinde ısıtılabilir ve/veya altaşa istenilen potansiyelde DC/RF kaynağı ile gerilim uygulanabilir. Buharlaştırmanın gerçekleştirildiği vakum 10^{-5} - 10^{-7} torr basınç uygular. Bu basınç aralığında ($5 \times 10^2 - 10^7$ cm) kaynak – altaş mesafesi, atomların ortalama serbest yolu (MFP) ile karşılaştırıldığında çok büyüktür. Atomların düz bir hat boyunca çarpışma olmadan altaş üzerine yoğunlaşmasının sebebi bu büyük farktır. Bazı durumlarda ortama 5-200 mTorr basınç altında argon gibi uygun bir gaz verilerek ortalama serbest yol azaltılabilir. Bu sayede kaynaktan altaşa geçişte çok yönlü çarpışmalar meydana getirilir. Çarpışmalar sonucunda üniform kalınlığa sahip kaplamaların elde edildiği bu tekniğe “gaz sıçratma” veya “basınç kaplama” ismi verilmiştir [47].

Kaynak malzemenin mikron veya angström kalınlığında kaplanabilmesine olanak veren Isıl Buharlaştırma tekniği, Fiziksel Buhar Biriktirme tekniklerinden biridir. Bu teknik hem

metaller hem de metalleri içermeyen oksitler veya nitritler gibi çeşitli yapıların yüzeyine, malzemelerin kaplama işlemlerini vakum altında gerçekleştiren bir ince film biriktirme yöntemidir.



Şekil 4.5. Isıl Buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi [48]

Bu tez çalışmasındaki metalizasyon işlemleri Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan Bestec Isıl Buharlaştırma Sistemi ile gerçekleştirildi.

4.2.2. Mürekkepli baskı yöntemi (İnk-Jet)

İnkjet baskı yöntemi, sadece ihtiyaç duyulduğunda mürekkebin püskürtüldüğü ve dolayısı ile malzeme harcamasının sadece basılmak istenen desen ile sınırlandırıldığı bir baskı yöntemidir. İnkjet baskı yönteminin keşfi 1970'lere dayanmakta olup, elektronik verilerin alttaşa temas olmaksızın aktarımı ihtiyacına bir karşılık olarak geliştirilmiştir [64]. Dolayısı ile günümüzde bu teknoloji oldukça gelişmiş olup birçok uygulamada kullanılmaktadır. Genel olarak kullanım alanları ofis ya da evlerde sıklıkla kullanılan yazıcılar olmakla beraber, son yıllarda ince filmlerin sıklıkla kullanıldığı, güneş hücresi üretimi, elektronik devre kartı üretimi, anten teknolojileri ve sensör teknolojileri gibi birçok alanda, üretim aracı olarak yüksek potansiyele sahip olduğunu göstermiştir. Bunun yanında, diğer kaplama yöntemleri ile kıyaslandığında, üretim sırasında maskeye ve vakum ortamına ihtiyaç duymaması, düşük malzeme sarfiyatı ve dolayısı ile diğer yöntemlere göre daha düşük maliyetle üretim imkânı bu yöntemin popülerliğine katkı sağlamaktadır [65].

Bu tez kapsamında kullanılan malzeme basımında kullanılan Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesindeki İnkjet Sistemi Resim 4.1’de verildi.



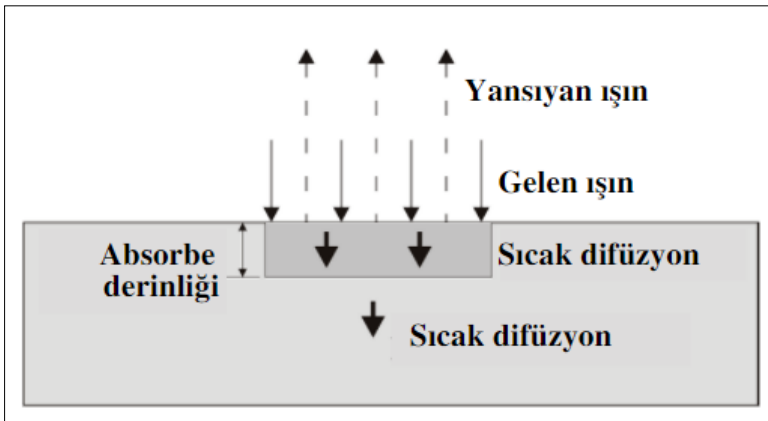
Resim 4.1. PixDro LP50 inkjet yazıcı

4.2.3. Lazer ablasyon tekniği

Lazer ablasyon terimi genellikle herhangi bir patlayıcı lazer malzeme etkileşimini tanımlamak için kullanılır, ancak bu bir mekanizma anlamına gelmez. Ablasyon sırasında lazer-malzeme etkileşim mekanizmasını açıklamak için birçok teorik yaklaşım önerilmiştir. Deneysel olarak gözlenen iki temel model, fototermal ablasyon ve fotokimyasal ablasyondur.

Lazer ablasyon mekanizmaları

Fototermal ablasyon



Resim 4.2. Lazer-malzeme etkileşimi [66]

Lazer ışını bir malzeme yüzeyine düştüğünde, Şekil 4.6'da gösterildiği gibi, geri kalanı malzemenin içine girerek emilirken, bir kısmı yansıtılır. Emilen enerji malzemeyi ısıtarak malzemenin erimesine ve buharlaşmasına neden olur. Fotonlar absorbe edildiğinde, elektronlar hareketlenir ve sıcaklık piko saniyelik bir zaman ölçeğinde yükselir. Elektronlar birbirleriyle etkileşime girer ve kafes içinde serbestçe hareket eder, bu da elektronlar arasında ve elektronlar ile kafes arasında ısı değişimine yol açar. Sıcaklık buharlaşma noktasına ulaştığında, ablasyon başlar ve malzeme buharlaşır. Enerji emilimi ve malzeme kaldırma, enerji transferine bağlı olarak iki ayrı işlem olabilir ve buda, kesip çıkarma alanını çevreleyen ısıdan etkilenen bir bölge oluşturur. Ablasyon kalitesini etkileyen anahtar faktör olarak ısıdan etkilenen bölge, malzeme absorpsiyonuna, termal iletkenliğe ve lazer atım süresine bağlıdır [67]. Femto saniyelik darbeler kullanılırsa ısı iletimi ihmal edilebilir [68]. Bu, hassas, temiz ve soğuk desenleme avantajı sağlar. Bununla birlikte, nano saniyelik darbeler, maruz kalan alanlardan çevreleyen alanlara termal iletim için kısa süre izin verir, böylece ısıdan etkilenen bölgeler ve yüzey kalitesinin düşürülmesine sebep olur.

Termal mekanizma, ablasyonu başlatmak için minimum enerji gerektirir. Isı dağılımı göz önüne alındığında, [66] tarafından bir eşik yoğunluğu verilir:

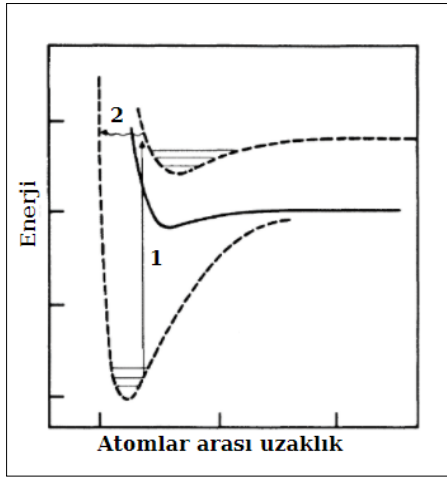
$$F_{th} = (\alpha_{eff}^{-1} + 2\sqrt{Dt_p}) \frac{c_p}{1-R} \quad (4.2)$$

F_{th} (mJ / cm²) eşik akısı, α_{eff}^{-1} (cm) etkili absorpsiyon katsayısı, R yansıma katsayısı, p (g / cm³) yoğunluk, t_p darbe süresi ve D (cm² / s) ısı yayılımı ilk tespit edildiğinde yüzey sıcaklığıdır [69]. Eş. 4.2, malzeme deneysel olarak belirlenen bir eşik akısına maruz bırakıldığında yüzey sıcaklığı artışını tahmin etmek için kullanılabilir.

Fotokimyasal ablasyon

Organik polimerler, başta karbon, hidrojen, oksijen ve nitrojen olmak üzere 10³ ila 10⁵ atomdan oluşan moleküllerden oluşur. Bir polimer oluşturmak için bir zincir boyunca 6 ila 40 atomluk küçük bir moleküler birim (monomer) tekrarlanır. Bir polimer 10² ila 10³ monomer biriminden oluşabilir. Tek atomlar arasındaki bağ kovalent ve güçlüdür (2.6-6.5 eV), ancak moleküller arasındaki kuvvetler zayıftır (<0.43 eV) [70]. Foton enerjisi bir UV lazer (örneğin KrF için 4,9 eV ve ArF lazer için 6,4 eV) bağ enerjisini aşarak polimer zincirlerinin ve kovalent bağların doğrudan fotokimyasal etki ile kırılmasına izin verebilir.

Ayrışma esas olarak elektronik olarak uyarılmış durumların ve yüzeyden hızlı itmeye yol açabilen moleküller arasındaki itici kuvvetlerin bir sonucu olarak gerçekleşir [71]. Bağ kırma sürecinde emilen enerji, ılıman yükselişi ve çevredeki bölgedeki termal hasarın boyutunu sınırlar. Şekil 4.7 'de en düşük eğri, temel enerji durumunu, üstteki kesik çizgi ve düz çizgi uyarılmış elektronik durumları temsil eder. Bir UV fotonun enerji absorpsiyonu, 1. yolu izleyen elektronik uyarıma neden olur. Uyarılmış moleküller, bir fotokimyasal reaksiyon olan bu durumda doğrudan ayrışmaya girebilir. Bu arada, uyarılmış moleküller yol 2'yi takiben başka bir uyarılmış duruma iç dönüşüme uğrarsa, sonraki herhangi bir ayrışma, bir fototermal reaksiyon olarak kabul edilebilir.



Resim 4.3. Varsayımsal bir bağ A-B'deki enerji seviyesi geçişinin şeması [70] (Altındaki kesik çizgi, temel elektronik durumu; üstteki kesik çizgi ve düz çizgi, uyarılmış elektronik durumları temsil eder)

Bu tez kapsamında kullanılan lazer ablasyon cihazı Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde yer alan Rofin marka Yb Fiber, 900-1200nm dalga boyuna sahip, 20 W lazer gücündeki cihaz ile yapıldı.

4.3. İnce Film Karakterizasyonu

Üretilen ince filmlerin karakterizasyonlarının incelenmesi üretilen filmin istenilen yapıda olduğunu anlamak için oldukça önemlidir. Bu tez çalışmasında üretilen ince filmlerin X-ışını kırınımı, atomik kuvvet mikroskobu altında ki görüntüsü ve morötesi-görünür bölge spektrometresi incelendi. Kullanılan bu karakterizasyon cihazlarından bu bölümde bahsedildi.

4.3.1. X-Işını kırınımı (XRD)

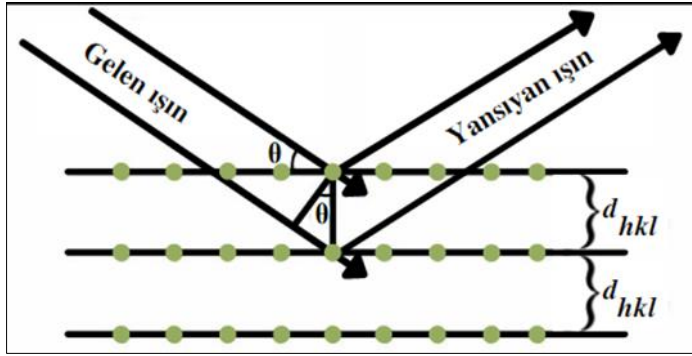
Kırınım yöntemleri, kristal yapıdaki malzemeler hakkında bilgi edinmek için uygulanırken, kristal parametreleri elde edilerek, kristalin özelliklerinin de elde edilmesini sağlar. Kristalin sahip olduğu yapısal kusurlar, örgü sabitleri, bağ uzunlukları ve açıları, düzlemler arası mesafeler, bağlanmamış atom pozisyonları gibi çeşitli özellikler ile herhangi bir yapıyı oluşturan bileşenleri ve miktarlarını doğru biçimde belirlemede kullanılan yöntemlerden biri X-ışını kırınımı (XRD) tekniğidir.

X-ışınlarının elde edilmesinde X-ışını tüpü kullanılır. Bir anot ve katottan oluşan tüpte iki elektrot arasına yüksek gerilim uygulanır. Bu gerilim ile katottan elektronlar kopar ve gerilimden dolayı hızlanarak anota çarparlar. Bu sayede enerjilerini aktararak x-ışını oluştururlar. Şekil 4.8, kristal düzlemlerinden X-ışınlarının saçılmasını şematik olarak göstermektedir ve bu şekilden faydalanılarak kırınım yöntemlerinin temelini oluşturan Bragg Kanunu Eş. 4.3 ile verilir.

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (4.3)$$

Burada d kristalin mevcut özdeş düzlemleri arasında uzaklık, θ kırınım açısı, n kırınım mertebesi ve λ kullanılan X-ışını dalgaboyudur.

Yapı içerisinde birbirini düzenli olarak tekrar eden kristal atomları gönderilen X-ışınlarını anizotropik olarak saçarlar. Bu sebeple eş faza sahip ışıklardan bazıları yıkıcı girişim yaparken, bazıları üst üste binerek yapıcı girişim gerçekleştirirler. Yapıcı girişim için iki örgü arası mesafe $2d\sin\theta$ değerindeki yol farkı, dalgaboyunun tam katlarında ($n=0,1,2,\dots$) bir değere sahiptir. Bragg kanunu dalgaboyu $2d$ değerine eşit veya küçük ($\lambda \leq 2d$) olduğu durumlarda geçerli hale gelir.



Şekil 4.6. Kristal düzlemlerinde X-ışınlarının saçılması [48]

Birim hücresi a ve c örgü parametreleri ile karakterize edilen tetragonal yapılı bir kristal için düzlemler arasındaki uzaklık (d) ve örgü parametreleri arasındaki ilişki ise

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (4.4)$$

şeklindedir [72]. Burada h , k ve l miller indisleridir. Düzlemler arası uzaklık ve kırınım açısı arasındaki ilişkiyi veren Eş. 4.3’de $n = 1$ olarak alındığında $(1/d^2) = (4\sin^2\theta)/\lambda^2$ eşitliği elde edilir. X-ışını kırınım desenindeki pik pozisyonu kullanılarak a ve c örgü parametreleri elde edilebilir. Ayrıca, Debye Scherrer’s denklemi kullanılarak tanecik büyüklüğü (D)

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (4.5)$$

ile verilir [73]. Burada θ kırınım açısı, β kırınım deseninde elde edilen pikin pik yarı genişliğidir (FWHM). λ X-ışını dalga boyu, k değeri “1” olan bir sabittir.

Kristal yapının atomik dizilişinde bir çizgi boyunca görülen kusurlara dislokasyon denir [73]. Bu kusur çizgi kusuru olarak da adlandırılır. Dislokasyon yoğunluğu (δ)

$$\delta = \frac{n}{D^2} \quad (4.6)$$

eşitliği ile tanecik büyüklüğüne bağlıdır [73]. Burada n değeri “1” olan bir sabittir. Kaplama koşullarına bağlı olan örgü uyumsuzluğuna dayanan mikrostrain (ε)

$$\varepsilon = \left(\frac{\lambda}{D \cos\theta} - \beta \right) \frac{1}{\tan\theta} \quad (4.7)$$

eşitliği ile belirlenebilir [73]. Bu eşitlikler kullanılarak yapılan analizler ile malzemeler hakkında yapısal bilgiler elde edilebilir.

Bu tez kapsamında elde edilen XRD ölçümleri Gazi Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde yer alan $\lambda=1,5405 \text{ Å}$ dalgaboyuna sahip $\text{CuK}\alpha$ kaynaklı Bruker D8 XRD cihazı ile yapıldı. Tüm ölçümler oda sıcaklığında ve atmosfer basıncında gerçekleştirildi.

4.3.2. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM)

Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) yüzey topografisini, uç-yüzey arasındaki atomlar arası etkileşmeyi esas alarak ölçen bir yüzey görüntüleme tekniğidir. Dirsekli bir kolun (cantilever) ucuna yerleştirilmiş birkaç mikron uzunluğunda atomik sivrilikte bir uç ile örnek yüzeyi taranır. Tarama esnasında uç-yüzey arasındaki atomlar arası kuvvetler kolun sapmasına sebep olur. Bu sapma bir sensörle ölçülerek numune yüzeyinde taranan alanın yüzey topografisi elde edilir. AFM ölçümleri uç-örnek mesafesine göre; kontak, non-kontak ve yarıkontak olmak üzere üç farklı modda gerçekleştirilir. Bu yöntemle örneğin yüzey pürüzlülüğü, yüzeyindeki kusur tipleri ve kusur yoğunlukları hakkında fikir sahibi olunur.



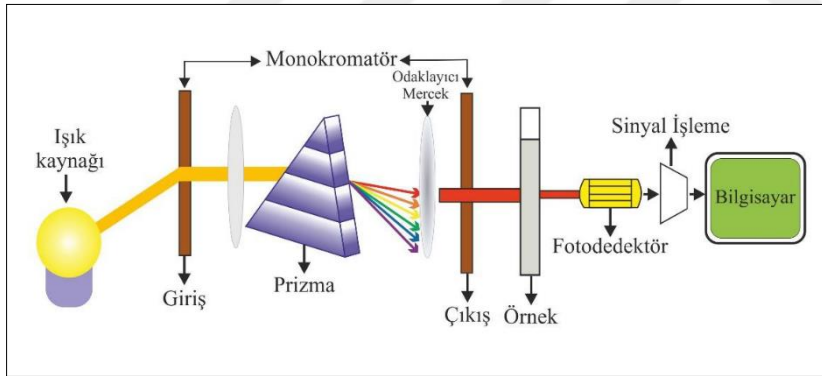
Resim 4.4. Nano Magnetix hpAFM atomik kuvvet mikroskobu

Pürüzlülük, yüzey veya ara yüzeydeki tüm atomları kapsayan bir çeşit kusurdur. Pürüzlülüğün belirlenmesinde kullanılan çok sayıda parametre vardır. Bu parametrelerden en yaygın biçimde kullanılan kare ortalama karekök (RMS) değeridir ve yüzey yüksekliklerinin standart sapmasını temsil eder.

Bu çalışmada Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesindeki Nano Magnetics marka hpAFM (Resim 4.2) Sistemi ile vakumsuz ortamda yüzey görüntüleme işlemleri gerçekleştirildi.

4.3.3. Morötesi-görünür bölge (UV-Vis) spektrometresi

Optik soğurma özellikleri kullanılarak yarıiletken malzemelerin bant aralığı ve geçirgenlik gibi diğer optik değerleri elde edilebilir. Bu teknikte temel olarak, morötesi ve görünür bölge aralığında çalışan, elektromanyetik spektrumun morötesi bölgeye yakın ve görünür bölgesinde (Yakın morötesi ve görünür bölge için dalgalıboylarının aralığı sırasıyla yaklaşık olarak 200-400 nm ve 400-700 nm'dir.) soğurumunu, geçirgenliğini ve yansımısını ölçen ve UV-Vis spektrometresi olarak bilinen spektrometre kullanılır. UV-Vis spektrometresinin şematik gösterimi Şekil 4.9'de gösterildi. Burada var olan temel bileşenler ışık kaynakları (morötesi ve görünür bölge), odaklayıcı mercek, prizma/ışığı kırıcı bir optik malzeme, foto detektör ve sinyal toplayıcıdan oluşmaktadır.



Şekil 4.7. UV-vis spektrometresine ait şematik gösterim [48]

160-375 nm aralığında radyasyon yayan hidrojen lambaları veya döteryum gibi ışık kaynakları UV ışık kaynağı olarak tercih edilir. Halojen lambalar veya 350-2500 nm dalgalıboyu aralığında radyasyon yayabildiğinden tungsten filamentli ise görünür ve yakın kızılötesi bölgede ölçümler için tercih edilir. Giriş yarığında monokromatöre geçen, birden fazla dalgalıboyuyla sahip radyasyondan oluşan ışık ile spektrometrede, materyali aydınlatmak için bir monokromatik ışınım sağlanarak, gelen fotonların yoğunluğu ölçülür. Bu yoğunluk ile dışarıdaki ışık yoğunluğu oranlanır. Paralel bir mercek vasıtasıyla toplanan ve daha sonra bir açıyla prizmaya (dağıtıcı ortam) çarparak farklı dalgalıboylarına ayrılan ışık, yarıktan geçer ve numune üzerine düşer. Test edilen katı malzemelerin kalınlığına bağlı olarak, ışığın

bir kısmı soğurulurken, diğerleri iletilir. İletilen ışığın (I) yoğunluğu gelen ışık yoğunluğuyla ilgilidir ve

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x} \quad (4.8)$$

eşitliği ile verilir. Eş. 4.8’de x , yarıiletkenin kalınlığıdır ve ışığın yarıiletken malzemesinde kat ettiği mesafeyi temsil eder, α ise malzemenin soğurma katsayısı olarak adlandırılan bir sabittir. Malzemenin geçirgenliği (T), Eş. 4.8’de ifade edildiği gibi, iletilen ışık yoğunluğunun, tek renkli ışığın yoğunluğuna oranıyla tanımlanır ve

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (4.9)$$

eşitliği ile verilir. Yarıiletken ince filmlerin yasak enerji bant aralığı geçirgenlik spektrumu kullanılarak elde edilen Tauc teorisi ile hesaplanır. Tauc teorisi

$$ah\nu = A(h\nu - E_g)^n \quad (4.10)$$

eşitliği ile verilir [60]. Burada α , “ $-\ln T$ ” ile doğru orantılı olan soğurma katsayısı, A foton yoğunluğundan bağımsız bir sabit, E_g yasak enerji bant aralığı $h\nu$ foton enerjisi ve n değeri “ $1/2$, $2,3/2$ ve 3 ” olan sabit bir sayıdır. Yarıiletken malzeme $n=1/2$ olduğunda doğrudan, $n=2$ olduğunda dolaylı, $n=3/2$ olduğunda doğrudan ve $n=3$ olduğunda dolaylı yasak bant aralığına sahiptir. Doğrudan bant aralıklı bir yarıiletkenin $(ah\nu)^2$ ’nin foton enerjisi $h\nu$ ’a göre olan grafiği çizildiğinde, eğriye alınan teğetin enerji eksenini kestiği nokta E_g yasak enerji aralığını verir.

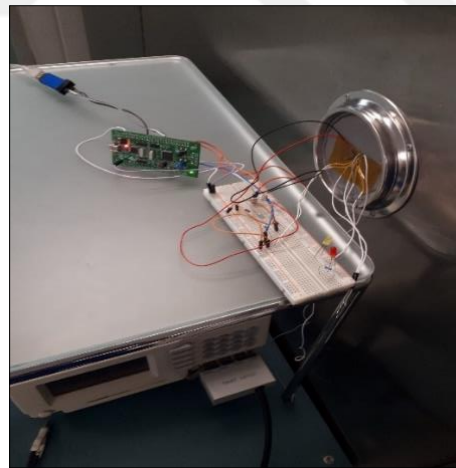
Üretilen aktif katmanların optik geçirgenlik ölçümleri Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan Perkin Elmer Lambda 2S UV-Vis spektrometresi (Resim 4.3) ile 200-1100 nm dalgaboyu arasında gerçekleştirildi.



Resim 4.5. Kullanılan UV-Vis Spektrometresi [48]

4.4. Nem Sensörü Test Sistemi

Nem sensörlerinin iletkenlik ve dielektrik ölçümlerini yapmak için GW Instek LCR-819 cihazı kullanılmıştır (Resim 4.4.). Ölçümler için 20 Hz-10 MHz aralığında logaritmik olarak dağılmış 26 test frekansı belirlenmiştir. Oda sıcaklığında ($\sim 25-26^{\circ}\text{C}$), elde edilen sığa ve iletkenlik değerleri özel bir yazılım sayesinde gerekli parametrelere çevrilmiştir.



Resim 4.6. Kullanılan nem sensörü test sistemi



5. TiO₂ VE SnO₂ ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONLARI

Aktif katman, sensörü oluşturan en önemli katmanlardan biridir. Aktif katmanın algılama kalitesi, sensörün kalitesi ve kullanılabilirliği ile paraleldir. Bu bölümde sensör fabrikasyonu öncesinde aktif katman karakterizasyonu için ısıya dayanıklı cam üzerine TiO₂ ve SnO₂ ince filmleri kaplandı. Bu malzemelerin üretim aşamaları ve karakterizasyonları Bölüm 4’de anlatılan metotlarla yapıldı ve bu bölümde detaylandırıldı.

5.1. TiO₂ ve SnO₂ Üretimi

TiO₂ aktif katmanı farklı kaplama yöntemleri ile üretildi. Bunlar: vakumlu kaplama tekniklerinden; eş-püskürtme ve vakumsuz kaplama tekniklerinden; daldırma, Dr. Bıçağı, Ultrasonik banyo yöntemleridir. SnO₂ aktif katmanı ise sadece daldırma yöntemi ile kaplandı. Bu bölümde aktif katman kalibrasyonu için üretilen numuneler Çizelge 5.1 de verildi.

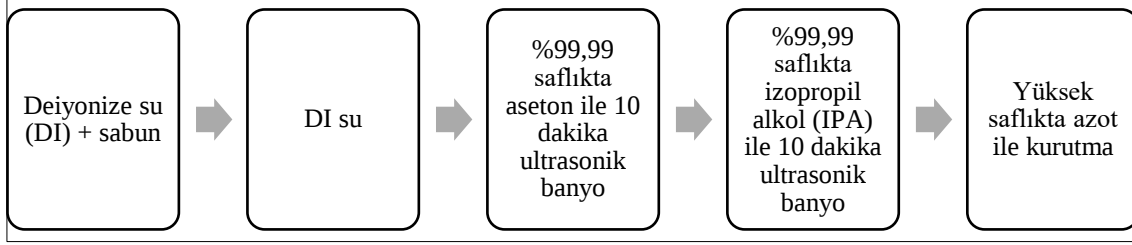
Çizelge 5.1. Kalibrasyon numuneleri bilgileri

Numune	Aktif Katman	Aktif Katman üretim yöntemi
K1	TiO ₂	Eş-püskürtme yöntemi
K2	TiO ₂ D (Al ₂ O ₃ alttaş ile eş zamanlı yapılan numune)	Daldırma ile kaplama
K3	TiO ₂ D (Kapton alttaş ile eş zamanlı yapılan numune)	Daldırma ile kaplama
K4	TiO ₂ pasta (az alkol)	Doktor bıçağı yöntemi ile kaplama
K5	TiO ₂ pasta (çok alkol)	Ultrasonik Banyo ile kaplama
K6	SnO ₂ D (Al ₂ O ₃ alttaş ile eş zamanlı yapılan numune)	Daldırma ile kaplama
K7	SnO ₂ D (Kapton alttaş ile eş zamanlı yapılan numune)	Daldırma ile kaplama

5.1.1. Alttaş hazırlama ve temizleme işlemi

Bahsedilen aktif katmanların büyütülmesinde ısıya dayanıklı cam kullanıldı. Cam üzerine homojen bir katman kaplamak için camın iyi temizlenmesi oldukça önemlidir. Cam alttaş

temizliği için Şekil 5.1'deki adımlar izlendi ve tüm numuneler için ayrı ayrı bu adımlar uygulandı.



Şekil 5.1. Cam alttaşı temizlemek için kullanılan temizleme işlemi adımları

5.1.2. Titanyum dioksit (TiO₂) üretimi

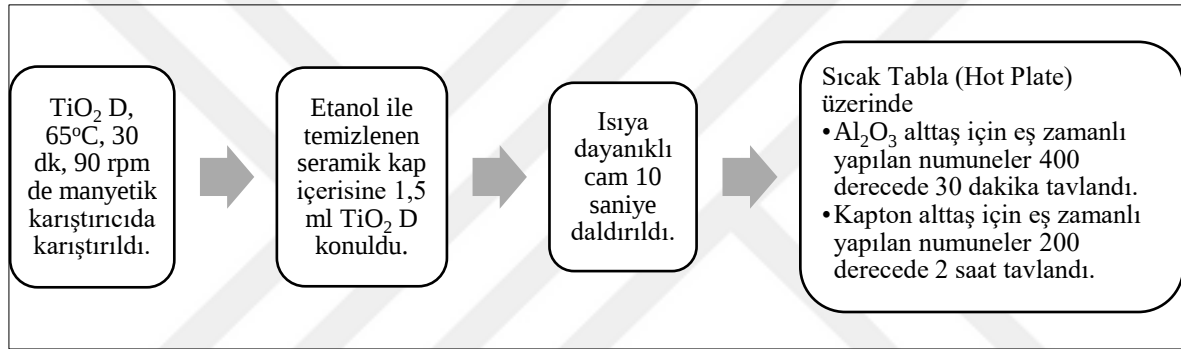
TiO₂ üretimi için 4 farklı metot kullanıldı. İlk olarak eş-püskürtme sisteminde kaplandı. Daha sonra TiO₂ karışımı (TiO₂ D) kullanılarak daldırma işlemi yapıldı Ultrasonik banyo ve Dr. Bıçağı yöntemleri ile kaplamak için önce TiO₂ pastası yapıldı ve ardından kaplama işlemleri sırasıyla gerçekleştirildi.

Eş-püskürtme sisteminde TiO₂'nin kaplanması

Sistem $8,7 \times 10^{-7}$ Torr temel basınca ulaştığında kaplama basıncı 11 mTorr'a ayarlanarak argon plazma ortamında kaplamalar gerçekleştirildi. Numunelerin üretimi sırasında; plazma gücü, kaplama basıncı ve hedef-numune arası mesafe gibi kaplamayı etkileyebilecek parametreler sabit tutuldu. Bölüm 6 da bahsedilen elektrotların kalınlığından dolayı TiO₂'nin de kalın olması nem sensörünün algılama verimini etkiler, bu yüzden ~600 nm kalınlıkta olması için 2 saat boyunca kaplama işlemi devam etti K1 numunesi için eş-püskürtme sisteminde ki kaplama parametreleri; 150 W RF gücünde, oda sıcaklığında kaplandı. Kaplanan numuneler daha sonra hızlı termal tavlama (RTA) sisteminde 350 °C de tavlandı.

Daldırma yöntemi ile TiO₂'nin kaplanması

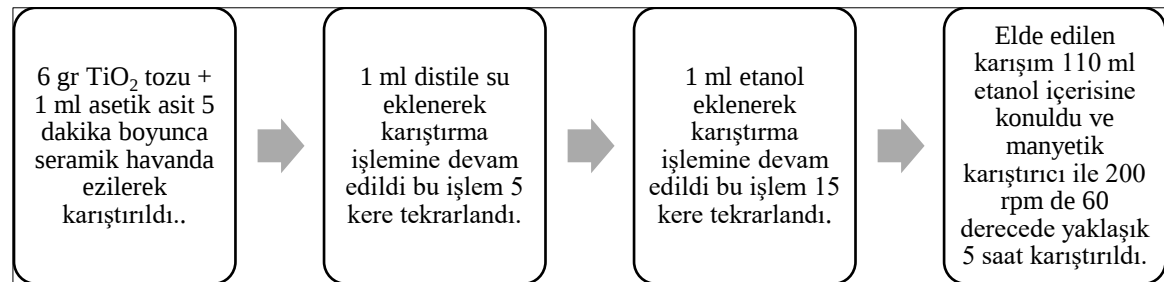
Daldırma işlemi için American Elements ürünü olan TiO₂ karışımı kullanıldı (TiO₂ D). Bu karışım; trietilen glikol monoetil eter (TEGMME) içerisinde %2,5 TiO₂ net ağırlık (atom ağırlığı) bulunduran karışımdır. Normal şartlarda bu karışımlar ink-jet sisteminde kullanılan mürekkeptir fakat bu tez çalışmasında daldırma işleminde kullanıldı. Şekil 5.2’de verilen işlem, film kalınlığını arttırmak için ~5 kere tekrarlandı. Bu işlem ile kaplanan numunelerden K2 ile adlandırılan numune Al₂O₃ üzerine üretilen sensör numunesi için yapılan kalibrasyon numunesidir ve K3 ile adlandırılan numune de kapton alttaşı üzerine üretilen sensör için yapılan kalibrasyon numunesidir.



Şekil 5.2. Daldırma işleminin şematik gösterimi

Ultrasonik banyo ve Dr.Bıçağı ile TiO₂ kaplanması

Ultrasonik banyo ve Dr. Bıçağı yöntemi ile kaplama yapabilmek için önce elimizde bulunan 10-20 nm parçacık boyutuna sahip TiO₂ tozu ile belirli adımlar izlenerek TiO₂ pasta yapıldı. TiO₂ pasta yapımı şekil 5.3’de gösterildiği gibidir [74].



Şekil 5.3. TiO₂ pasta yapım aşamaları [74]

Elde edilen bu karışım hem ultrasonik banyo hem de Dr. Bıçağı yöntemi için kullanıldı.

Doktor bıçağı ile kaplama için,

- Hazırlanan karışımın 11,5 ml'lik kısmı daha yoğun bir karışım elde etmek için 60 derecede 500 rpm de manyetik karıştırıcıda karıştırıldı.
- Bir spatula yardımı ile numunenin üzeri kaplandı.
- Önce hotplate üzerinde 125 °C de 6 dakika tavlandı.
- Sonra geleneksel termal tavlama sisteminde (CTA) 600 °C de 1 saat tavlandı.

Bu numune K4 olarak adlandırıldı.

Ultrasonik Banyo da kaplama için,

- Karışımın 8 ml'si ayrıldı ve üzerine 8 ml etanol eklendi ve karıştırılmaya başlandı.
- 2 ml etanol eklenerek karıştırılmaya devam edildi ve bu işlem 11 kez tekrarlandı.
- Elde edilen karışım oda sıcaklığında 500 rpm de manyetik karıştırıcıda karıştırıldı.
- Karışımdan 1 damla numunenin üzerine damlatıldı ve 15 dakika Ultrasonik banyoda kaplandı.
- Önce ısıtıcı tabla (hotplate) üzerinde 125 °C de 6 dakika tavlandı.
- Sonra geleneksel termal tavlama sisteminde (CTA) 600 °C de 1 saat tavlandı.

Bu numune K5 olarak adlandırıldı.

5.1.3. Kalay oksit (SnO_2) üretimi

SnO_2 tez çalışmasında sadece daldırma yöntemi ile üretildi. Daldırma işlemi için American Elements ürünü olan SnO_2 karışımı kullanıldı (SnO_2 D). Bu karışım; trietilen glikol monoetil eter (TEGMME) içerisinde %2,5 SnO_2 net ağırlık (atom ağırlığı) bulunduran karışımlardır. Normal şartlarda bu karışımlar ink-jet sisteminde kullanılan mürekkeptir fakat bu tez çalışmasında daldırma işleminde kullanıldı. Şekil 5.2'de verilen işlem, film kalınlığını arttırmak için ~5 kere tekrarlandı. Bu işlem ile kaplanan numunelerden K6 ile adlandıran numune Al_2O_3 üzerine üretilcek olan sensör numunesi için yapılan kalibrasyon numunesidir ve K7 ile adlandırılan numune de kapton alttaş üzerine üretilcek olan sensör için yapılan kalibrasyon numunesidir.

5.2. TiO₂ ve SnO₂ Karakterizasyonları

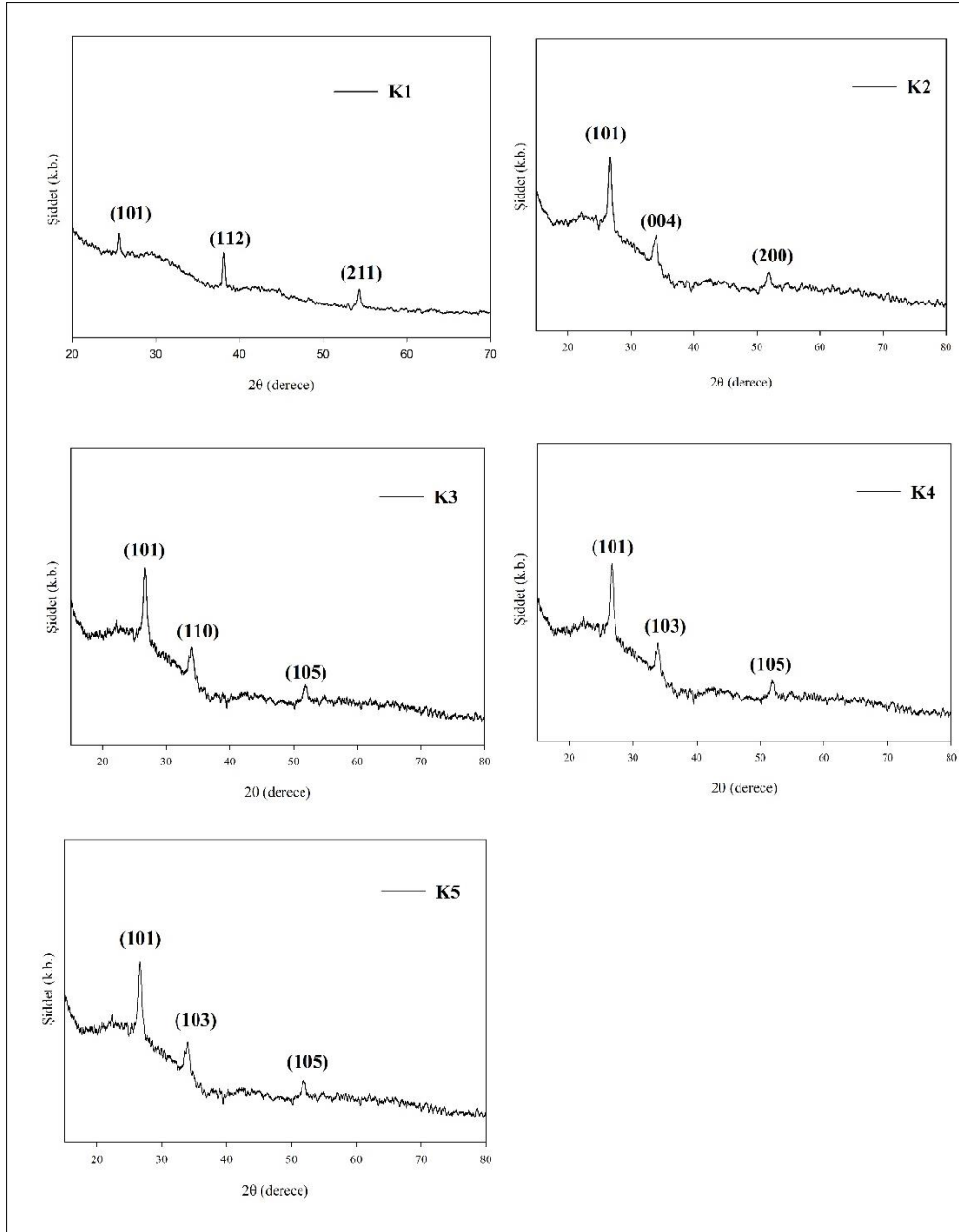
Üretilen TiO₂ ve SnO₂ ince filmlerinin X-ışını kırınımı analizi (XRD), Atomik kütle mikroskobu (AFM) ve morötesi-görünür bölge spektrometresi (UV-Vis) sistemleri ile belirlenen ölçüm sonuçları ve bu sonuçların analizleri bu bölümde sunuldu.

5.2.1. TiO₂ ince filmlerinin karakterizasyonları

TiO₂ ince filmlerinin XRD, AFM ve UV-Vis sistemleri ile belirlenen ölçüm sonuçları ve analizleri bu bölümde sunuldu.

X-ışını kırınımı (XRD) analizi

Üretilen K1, K2, K3, K4 ve K5 numunelerinin yapısal analizleri Gazi Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bulunan 1,5405 Å dalgaboyuna sahip CuK α kaynaklı XRD cihazı ile yapıldı. Tüm ölçümler oda sıcaklığında ve atmosfer basıncında gerçekleştirildi. Bu numuneler için elde edilen kırınım desenleri Şekil 5.4'de verildi. K2 numunesinin kırınım desenleri incelendiğinde, 25,3879° (101), 37,8762° (004) ve 48,1692° (200) düzlemlerinden kaynaklanan kırınım pikleri gözlemlendi. K3 numunesi için 25,4293° (101), 37,9176° (004) ve 48,045° (200) düzlemlerinden kaynaklanan kırınım pikleri gözlemlendi. K4 numunesi için 26,6098° (101), 33,9412° (103), 51,8764° (105) düzlemlerinden kaynaklanan kırınım pikleri gözlemlendi. K5 numunesi için 26,6305° (101), 33,962° (110), 51,8764° (105) düzlemlerinden kaynaklanan kırınım pikleri gözlemlendi. Bulunan piklere bağlı olarak, TiO₂'ye ait veri kartı dikkate alınarak karşılaştırıldı ve TiO₂'nin anataz fazında olduğu ve tetragonal yapıda olduğu görüldü. Şekil 5.4'de belirtilen pik değerleri ile numunelerin XRD grafikleri gösterildi.



Şekil 5.4. K1, K2, K3, K4 ve K5 numunelerinin X-ışını kırınım desenleri

Tetragonal yapıya sahip olan ince filmlerin elde edilen pik pozisyonu değerleri kullanılarak örgü sabitleri Eş. 4.2 ve 4.3 kullanılarak elde edildi. Ayrıca tanecik büyüklüğü (D) değerleri, Eş. 4.4 ile verilen Debye Scherrer's denkleminde pik pozisyonu değerleri (θ) ve FWHM değerleri (β) kullanılarak belirlendi. Dislokasyon yoğunluğu (δ) ve mikrostrain (ϵ) değerleri Eşitlik 10 ve 11 yardımıyla bulundu. Dislokasyon yoğunluğu, kristalin bir bölümündeki kafesin diğer bölümüyle yanlış düzenlenmesi ile ilişkili bir kristaldeki kusurdur. Boşluklardan farklı olarak, dislokasyonlar denge kusurları değildir yani, termodinamik değerlendirmeler, gözlemlenen yoğunluklar üzerindeki varlığını açıklamak için yetersizdir.

Dislokasyon yoğunluğu (δ), n 'nin bir faktör olduğu, birliğe eşit olduğunda minimum dislokasyon yoğunluğu veren bir faktör olduğu ilişki ile tanecik büyüklüğü (D) değerlendirilebilir [73]. Bu bilgi dahilinde $k = 0,9$ ve $n = 1$ ve $\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$ olarak alınarak elde edilen tüm yapısal parametreler Çizelge 5.2'de sunuldu.

Çizelge 5.2. TiO_2 ince filmleri için X-ışını kırınım desenleri yardımıyla elde edilen yapısal parametreler [D (tanecik büyüklüğü), δ (dislokasyon yoğunluğu) ve ε (noktasal gerilim)]

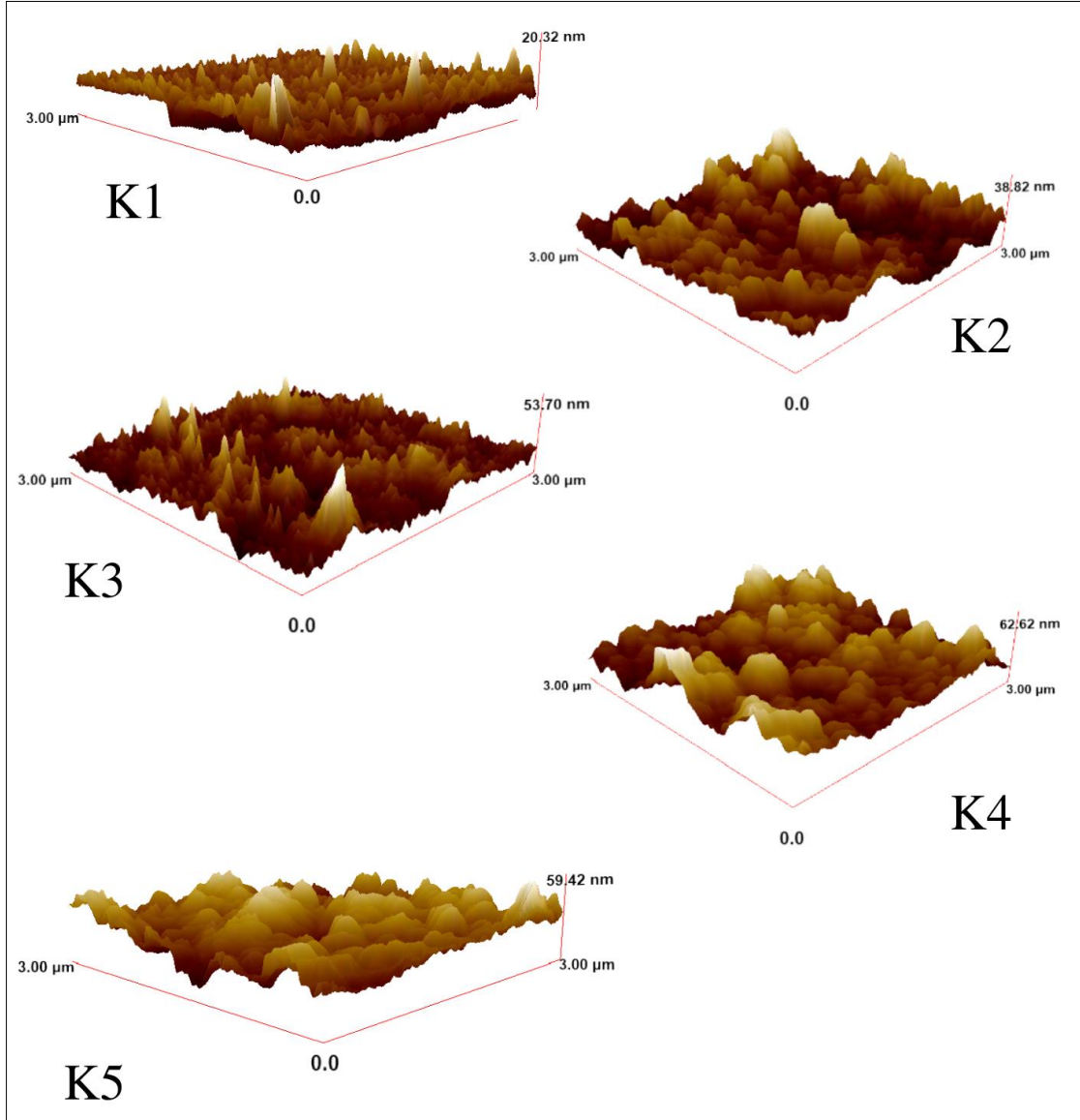
Numune	h	k	l	2θ (°)	β (°)	D (nm)	δ ($\times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$)	ε (10^{-3})
K1	1	0	1	25,64	0,8139	10,0094	9,9812	6,9366
K2	1	0	1	25,39	0,4261	19,1095	2,7384	3,6688
K3	1	0	1	25,43	0,3799	21,4389	2,1757	3,2649
K4	1	0	1	26,61	0,5563	14,6744	4,6438	4,5619
K5	1	0	1	26,63	0,6286	12,9876	5,9285	5,1506

Tanecik boyutu kontrolü yüksek hassasiyetli nem sensörleri için önemlidir [75]. Tanecik boyutunun büyük olması, nem sensörlerinin algılayıcı katmanının nem ile temas yüzeyini artırır. Bu durumda nem sensörlerinin nem algılama mekanizmasının gelişmesine ve daha hassas sensör üretmemize olanak sağlar [11]. Bu analiz sonucunda daldırma ile üretilen TiO_2 'nin diğer üretim metotlarına göre nem sensörü kullanımına daha uygun olduğu görüldü.

AFM analizi (Morfolojik analiz)

Nem algılama mekanizmasında yüzey etkileşimlerini anlamak büyük önem taşır. Aktif katmanın yüzey morfolojisinin araştırılması sensör karakterizasyonunda oldukça önemlidir. TiO_2 aktif katmanı için üretilen kalibrasyon numunelerinin yüzey görüntüleri $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ alanda AFM sistemi ile alındı. Kaplanan numunelerin Atomik Kütle Mikroskopunda ki analizleri Şekil 5.5'de gösterildi. AFM ölçümleri sonucunda RMS değerlerinin K1, K2, K3, K4 ve K5 numuneleri için sırasıyla 1,73 nm, 4,87 nm, 5,11 nm, 7,56 nm ve 9.18 nm olduğu belirlendi.

Cheng ve diğerlerinin [76] ürettikleri TiO_2 'nin AFM görüntüsünde RMS değerlerini 10,2 nm olarak ölçüldüğü görüldü. Üretilen numunelerin daha küçük RMS değerlerine sahip olduğu ve buna bağlı olarak da algılama özelliğine olumlu bir katkı sağladığı yorumu yapılabilir.



Şekil 5.5. K1, K2, K3, K4 ve K5 numuneleri için üç boyutlu AFM görüntüleri

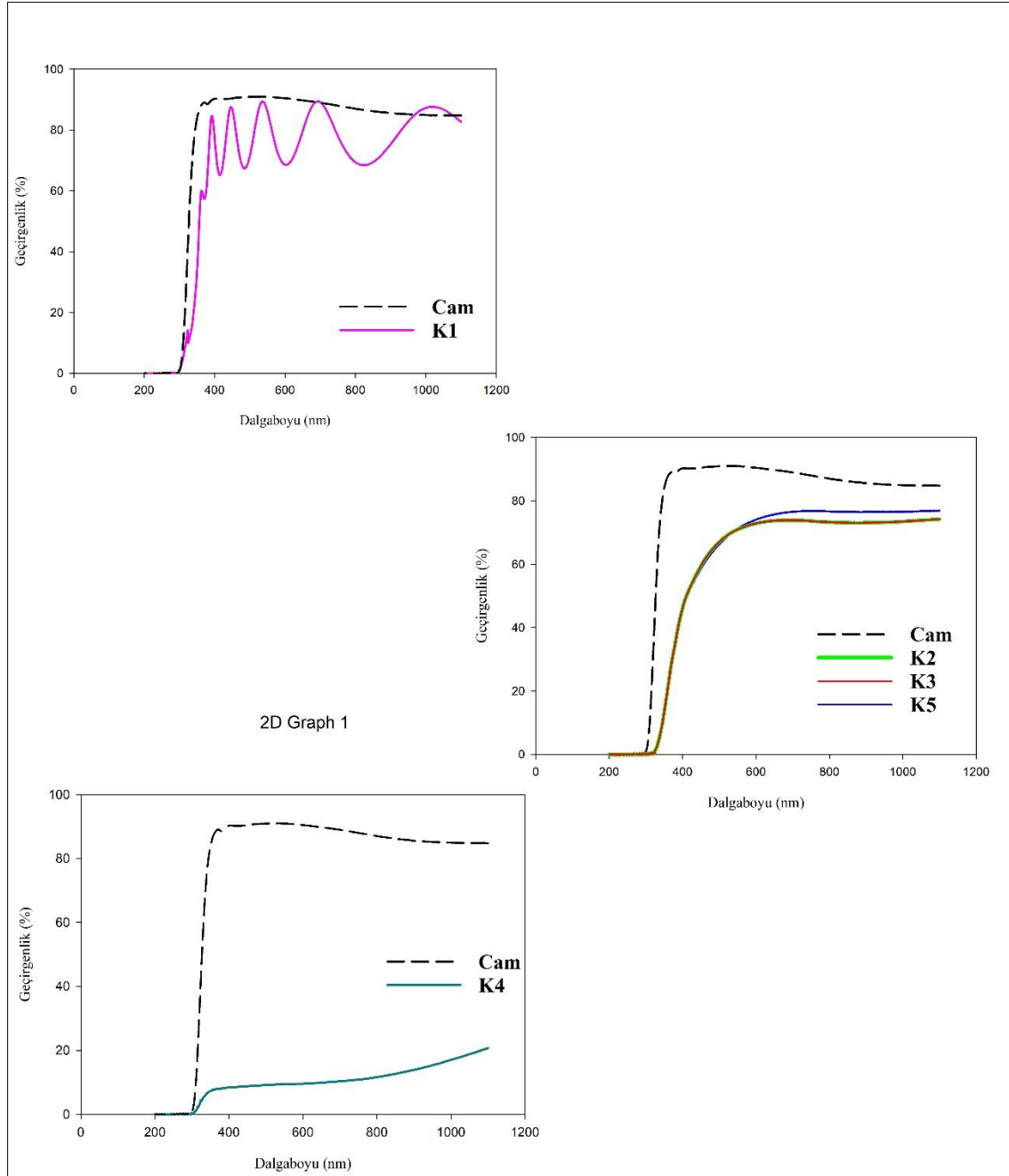
UV-VIS analizi

TiO_2 anataz fazında 3,2 eV ve rutil fazında 3,0 eV yasak enerji bant aralığına sahip doğal yarıiletkenlerdir. UV-Vis spektrometresi kullanılarak 200 nm ile 1100 nm dalgaboyu aralığında ısıya dayanıklı cam üzerine vakumlu ve vakumsuz tekniklerle kaplanan TiO_2 ince filmlerin

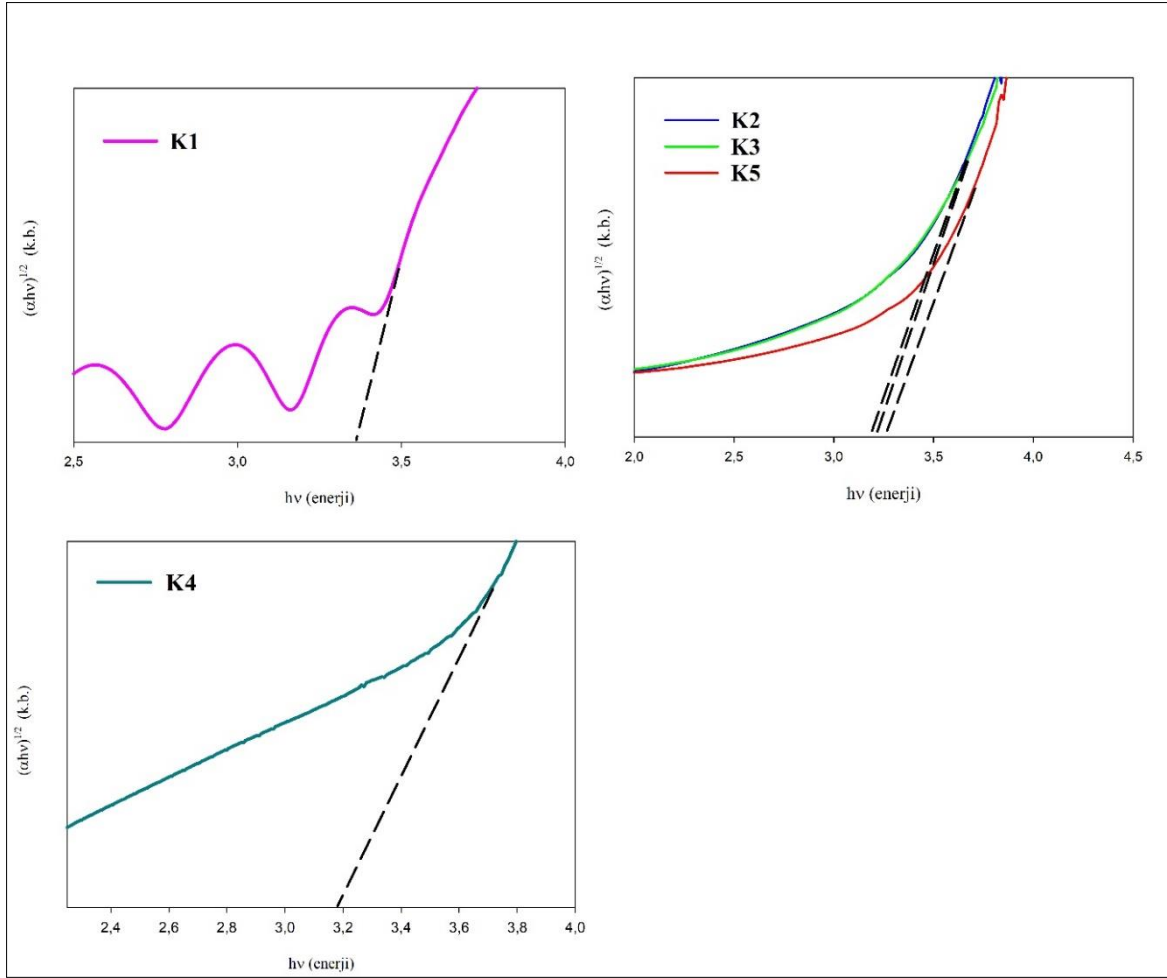
geçirgenlikleri ölçüldü. Şekil 5.6’da farklı kaplama teknikleri için K kodu ile belirtilmiş nem sensörlerinin (Çizelge 5.1) algılayıcı katmanı ile cam alttaşın ölçülen dalgaboylarına karşılık gelen optik geçirgenlik ölçümleri gösterildi.

Yarıiletken ince filmlerin yasak enerji bant aralığı geçirgenlik spektrumu kullanılarak Tauc teorisi ile hesaplanır. Eşitlik 4.9 ile verilen Tauc teorisi ifadesinde doğrudan bant aralıklı bir yarıiletken için $n=1/2$ kullanılır. Doğrudan bant aralıklı bir yarıiletkenin $(\alpha h\nu)^2$ ’nin foton enerjisi $h\nu$ ’a göre olan grafiği çizildiğinde, eğriye alınan teğetin enerji eksenini kestiği nokta E_g yasak enerji aralığını verir.

Geçirgenlik spektrumlarından direkt bant aralığına sahip TiO_2 ince filmlerin enerji bant aralığı değerleri K1 için 3,32 eV, K2 için 3,16 eV, K3 için 3,19 eV, K4 için 3,18 eV K5 için 3,24 eV olarak tespit edildi (Şekil 5.7). Genel olarak optik yasak enerji aralığında meydana gelen değişimler stokiyometri kayması, faz geçişi ve kuantum boyutu etkisinden kaynaklanabilmektedir [39].



Şekil 5.6. K1, K2, K3, K4 ve K5 numuneleri için geçirgenlik grafikleri



Şekil 5.7. K1, K2, K3, K4 ve K5 numuneleri için Tauc grafikleri

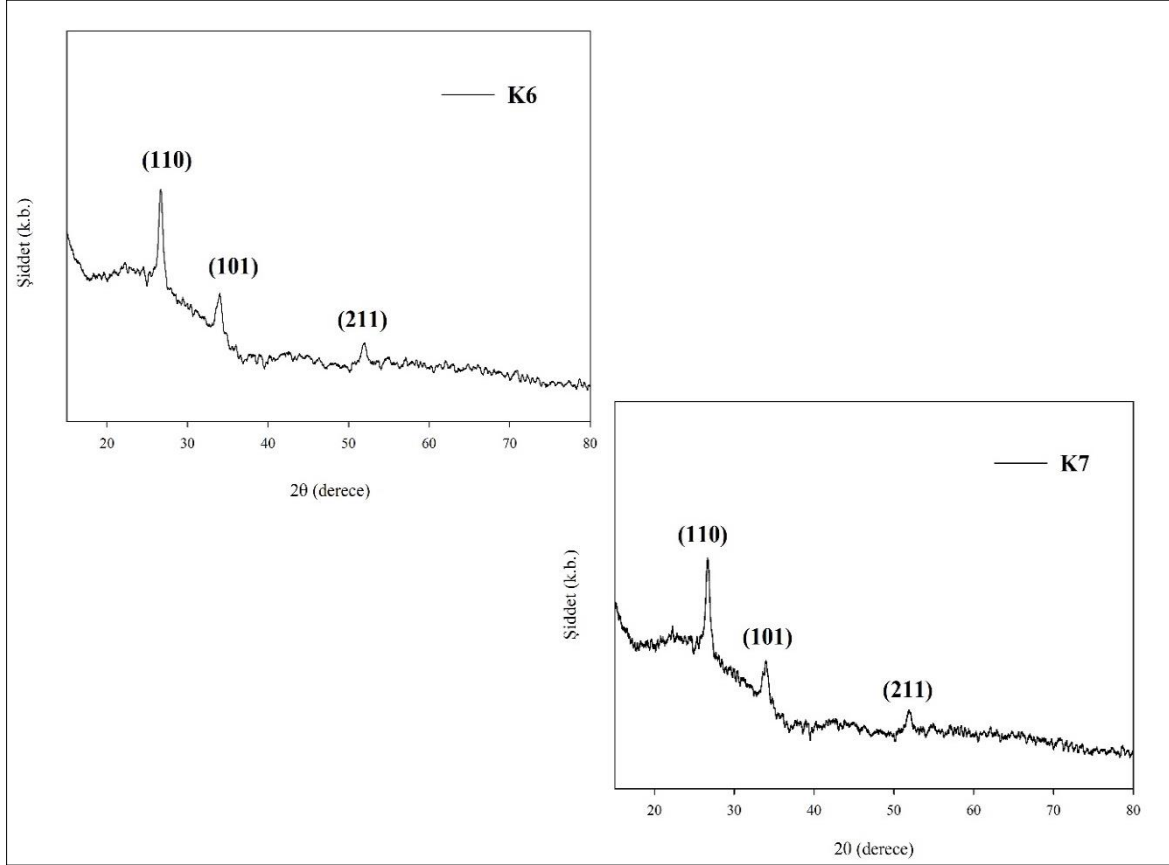
5.2.2. SnO₂ karakterizasyonu

SnO₂ ince film karakterizasyonu için XRD, AFM ve UV-Vis ölçümleri ve analizleri bu bölümde sunuldu.

XRD analizi

Üretilen K6 ve K7 numunelerinin yapısal analizleri Gazi Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bulunan 1,5405 Å dalgaboyuna sahip CuK α kaynaklı XRD cihazı ile yapıldı. Tüm ölçümler oda sıcaklığında ve atmosfer basıncında gerçekleştirildi. K6 numunesinden (110), (101) ve (211) düzlemlerinden elde edilen yansılardan kaynaklanan pik pozisyonları gözlemlendi. (110) düzlemi için 26,6719°, (101) düzlemi için 34,0034° ve (211) düzlemi için 52,0214°'de görüldü. K7 numunesi için (110), (101) ve (211) düzlemlerinden elde edilen yansımalar için gözlenen 2 θ açıları sırasıyla 26,6305°, 33,962° ve 51,8764°'dir.

Şekil 5.8’da belirtilen pik değerleri ile numunelerin XRD grafikleri gösterildi. Bulunan piklere bağlı olarak SnO₂ veri kartı ile kıyaslandığında, SnO₂ nin tetragonal yapıda olduğu görüldü.



Şekil 5.8. K6 ve K7 için XRD grafiklerinin ve pik noktalarının gösterilmesi

Tetragonal yapıya sahip olan filmler için belirlenen pik pozisyonlarının literatürde verilen değerlerle uyumlu olduğu gözlemlendi [4]. Dislokasyon yoğunluğu (δ), n 'nin bir faktör olduğu, birliğe eşit olduğunda minimum dislokasyon yoğunluğu veren bir faktör olduğu ilişki ile tanecik büyüklüğü (D) değerlendirilebilir [73]. Bu bilgi dahilinde $k = 0,9$ ve $n = 1$ ve $\lambda = 1,5405 \text{ Å}$ olarak alınarak elde edilen tüm yapısal parametreler Çizelge 5.3’de sunuldu.

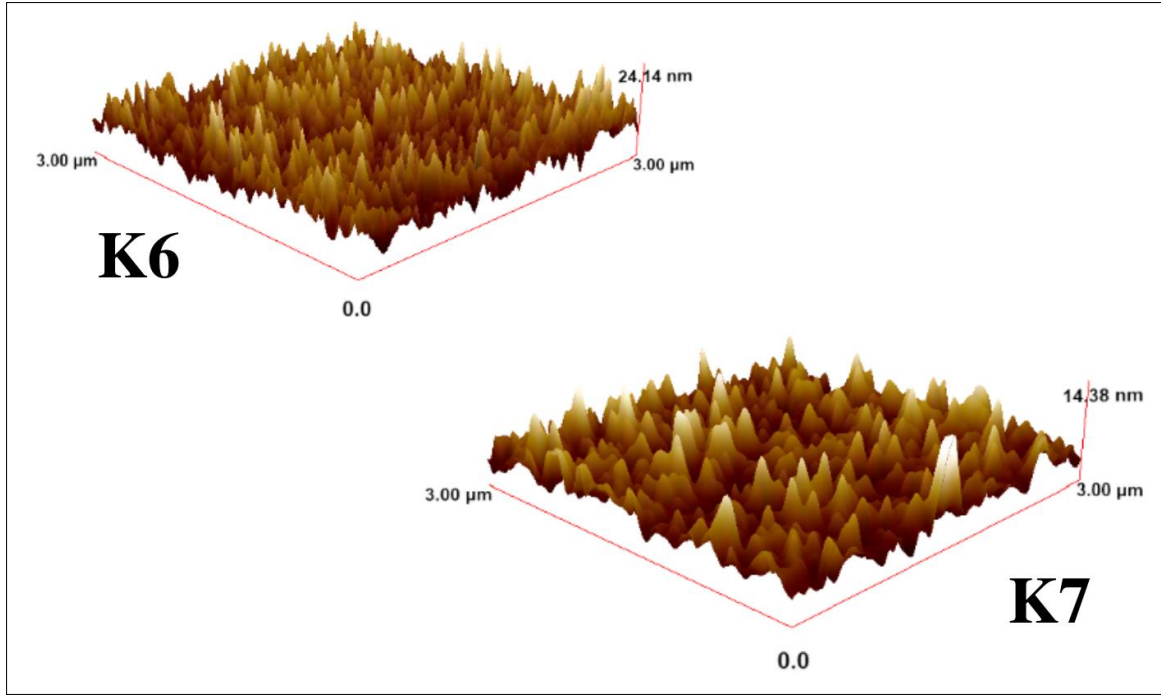
Çizelge 5.3. SnO₂ ince filmleri için X-ışını kırınım desenleri yardımıyla elde edilen yapısal parametreler [D (tanecik büyüklüğü), δ (dislokasyon yoğunluğu) ve ε (noktasal gerilim)]

Numune	h	k	l	2θ (°)	β (°)	D (nm)	δ ($\times 10^{11} \text{cm}^{-2}$)	ε (10^{-3})
K6	1	1	0	26,67	0,6265	13,03224	5,887919	5,125041
K7	1	1	0	26,63	0,6105	13,37308	5,591612	5,002135

Daldırma ile üretilen numunelerden K6, 400 °C’de tavlandı ve K7, 200 °C’de tavlandı. Çizelge 5.3’den yola çıkarak. Filmin noktasal gerilme ve dislokasyon yoğunluğunun tavlama sıcaklığı değiştiği görüldü [73].

AFM analizi

Nem algılama mekanizmasında yüzey etkileşimlerini anlamak büyük önem taşıdığından bahsedildi. SnO₂ aktif katmanı için üretilen kalibrasyon numunelerinin yüzey görüntüleri 3 μm^2 alanda AFM sistemi ile alındı. Kaplanan numunelerin Atomik Kütle Mikroskopunda ki analizleri Şekil 5.9’de gösterildi. AFM ölçümleri sonucunda rms değerlerinin K6 ve K7 numuneleri için sırasıyla 1,80 ve 2,85 nm olduğu belirlendi. Parçacık boyutunun küçük olması, nem sensörlerinin algılayıcı katmanının nem ile temas yüzeyini arttırdığından bahsedildi, bu analiz sonucunda SnO₂ D kullanılarak yapılan iki daldırma işlemde tavlama sıcaklığı değişken parametremiz oldu, yüksek sıcaklıkta tavlanan algılayıcı katmanın yani K6 numunesinin nem sensörü kullanımına daha uygun olduğu görüldü.

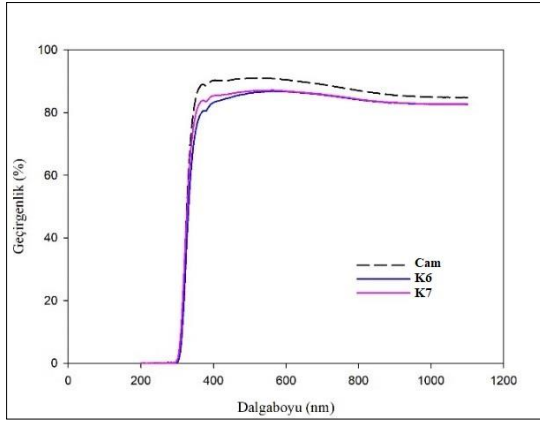


Şekil 5.9. K6 ve K7 için AFM görüntüleri

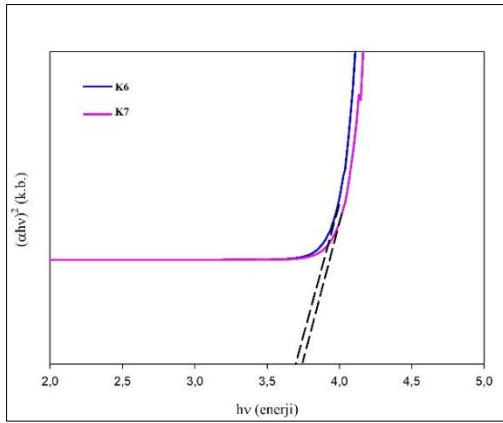
UV-VIS analizi

SnO₂ geniş bant aralığına sahip n-tipi bir yarı iletkenidir. Tetragonal rutil yapıda olan örgü yapısının mükemmel olmayışı ve oksijen boşlukları sebebiyle iletkenlik özelliği gösterir. 3.5–4.2 eV gibi geniş bir bant aralığına sahip olan SnO₂ ince film elektromanyetik spektrumun görülebilir bölgesinde büyük bir geçirgenliğe sahiptir. UV-vis spektrometresi kullanılarak 200nm ile 1100nm dalga boyu aralığında ısıya dayanıklı cam üzerine vakumsuz tekniklerle kaplanan SnO₂ için % Geçirgenlik ölçüldü. Şekil 5.10'de K6 ve K7 kodu ile belirtilmiş nem sensörlerinin algılayıcı katmanı ile boş cam alttaşın ölçülen dalgaboylarına karşılık gelen optik geçirgenlik ölçümleri gösterildi. Tauc teorisi (eşitlik 15) kullanılarak hesaplamalar yapıldı. Doğrudan bant aralıklı bir yarıiletkenin $(\alpha h\nu)^2$ 'nin foton enerjisi $h\nu$ 'a göre olan grafiği çizildiğinde, eğriye alınan teğetin enerji eksenini kestiği nokta E_g yasak enerji aralığını verir.

Geçirgenlik spektrumlarından direkt bant aralığına sahip SnO₂ ince filmlerin enerji bant aralığı değerleri K6 için 3,72 eV ve K7 için 3,74 eV olarak tespit edildi (Şekil 5.11). Genel olarak optik yasak enerji aralığında meydana gelen değişimler stokiyometri kayması, faz geçişi ve kuantum boyutu etkisinden kaynaklanabilmektedir.



Şekil 5.10. K6 ve K7 numuneleri için geçirgenlik grafikleri

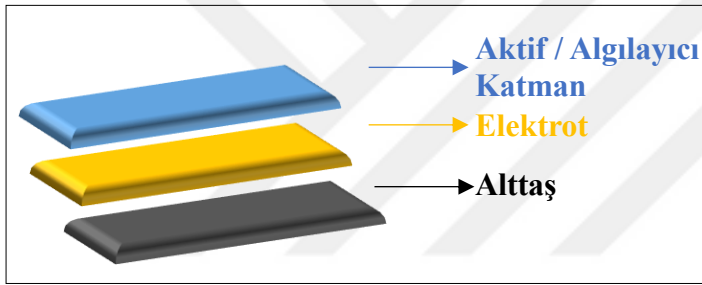


Şekil 5.11. K6 ve K7 numuneleri için Tauc grafikleri



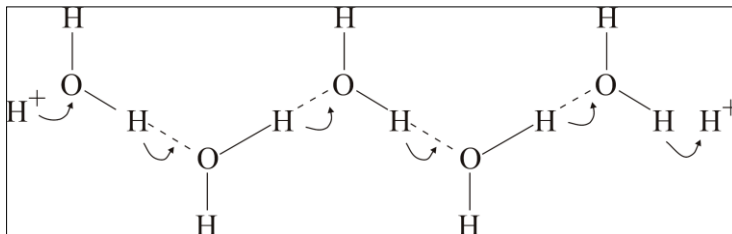
6. NEM SENSÖRÜ FABRİKASYONU VE SENSÖR ÇIKTI PARAMETRELERİ

Nem sensörleri genel olarak alttaşı, elektrot ve aktif katman olmak üzere 3 katmandan oluşur (Şekil 6.1). Alttaşı olarak 2 farklı alttaşı kullanıldı; esnek alttaşı olarak kapton film, esnek olmayan alttaşı olarak Al_2O_3 seçildi. Nem ölçümü yapılabilmesi için elektrot tasarlandı ve 2 farklı desende elektrot üretildi. İnterdijital elektrot deseni ağırlıklı olarak kullanılmakla beraber “s” şeklinde üretilen elektrot desenide kullanıldı. Eş-püskürtme, daldırma, doktor bıçağı ve ultrasonik banyo yöntemleriyle üretilen ve daha sonrasında karakterizasyonları yapılan kalibrasyon numunelerinin parametreleri kullanılarak nem sensörlerinin aktif katmanları oluşturuldu. Oluşturulan nem sensörlerinin çıktı parametreleri bu bölümde sunuldu.



Şekil 6.1. Nem sensörü katmanları

Nem sensörü suyun absorbe edilmesi ile çalışır. Absorbe edilen su yüzeyde yoğunlaşır ve oluşan su katmanlarında protonlar iletilir. İletim, protonların bir su molekülünden diğerine sıvı fazda bulunan hidrojen bağıyla tünel açtığı Grotthuss mekanizmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 6.2) [45].



Şekil 6.2. Grotthuss mekanizması [46]

Nem seviyesi artarsa, iletkenlik azalır ve geçirgenlik artar. Üretilen sensörler de nem seviyesi arttıkça kontaklar arasında ölçülen direncin azalması beklenir.

6.1. Alttaşların Belirlenmesi

Nem sensörleri kullanım alanları açısından farklılık gösteren sensör tiplerindendir bu yüzden alttaş seçimi önemlidir. Nem sensörlerinin farklı alanlarda kullanılabilmesi için bu tez kapsamında esnek ve esnek olmayan alttaşlar üzerine nem sensörü üretildi. Esnek olmayan alttaş olarak alümina ve esnek alttaş olarak kapton alttaş seçildi. Bu bölümde seçilen alttaşlardan bahsedildi.

6.1.1. Alümina (Al_2O_3)

Al_2O_3 , çeşitli seramik türleri arasında Al_2O_3 , 25 °C'den 85 °C'ye kadar sıcaklıktan bağımsız olması nedeniyle en popüler olanıdır. Polimerlerle karşılaştırıldığında yüksek mekanik dayanıma sahiptir ve yüksek nano-gözenek yoğunluğu, düşük nem tespiti için uygun hale getirir. Al_2O_3 dahil olmak üzere yaygın olarak kullanılan iki Al_2O_3 türü vardır. Birincisi, yüksek gözenekliliğı nedeniyle daha hassastır, ikincisi ise termal olarak daha kararlıdır. Tüm bunların yanında Al_2O_3 ısıya dayanıklıdır ve yüksek ısı karşısında yapısı bozulmaz. Esnek olmayan nem sensörü üretirken Al_2O_3 kullanıldı.

6.1.2. Kapton

PET gibi diğeri esnek alttaşlar yerine Kapton filmin tercih edilmesinin temel sebebi; bu filmin oldukça geniş çalışma sıcaklığıdır. Kapton HN -269 °C ile 400 °C arasındaki sıcaklıklarda yapısını koruyabilmektedir. Maksimum tavlama sıcaklığının 250°C seçilmesinden dolayı Dupont firmasının ürettiğı 75µm kalınlığa sahip Kapton HN poliimid film bu tez kapsamında esnek alttaş olarak kullanıldı.

6.2. Elektrot Deseni Tasarlanması ve Üretimi

Mikro boyutlardaki elektronik cihazlar; küçük boyut, düşük maliyet, düşük güç tüketimi ve entegrasyon gibi çeşitli avantajları nedeniyle giderek daha popüler hale gelmektedir [40]. Mikro fabrikasyon teknolojisi ile oluşturulan iç içe geçmiş, interdiijital elektrotlar (IDE'ler), nem sensörü için avantaj sunmaktadır. Bu avantajlar kısaca;

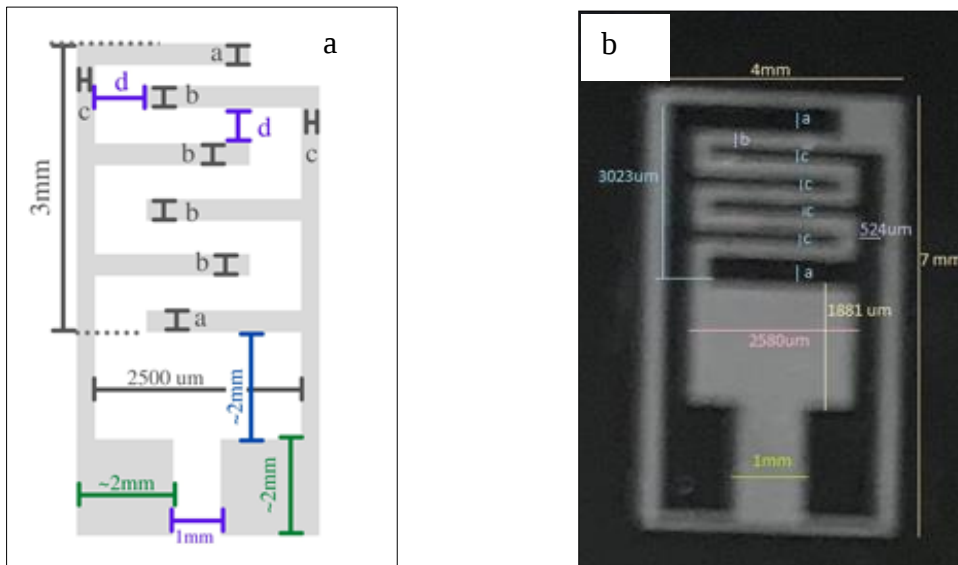
- Elektrotlar ve algılama malzemesi arasındaki temas alanını artırabilir ve bu da nem sensörünün hassasiyetini artırabilir.

- İmalat karmaşıklığını ve maliyetini azaltabilecek basit bir yapıya sahiptir.
- Nispeten düzlemsel bir yüzey sağlar (örneğin, 200 nm pürüzlülük). Yapının düşük en-boy oranı, özellikle lazer ablasyon işlemi sırasında gelecekteki imalat adımlarını daha basit hale getirebilir.

Bahsedilen bu sebeplerden dolayı IDE, nem sensörü için kullanılmak üzere seçildi. IDE'nin gerçekten bir avantaj olduğunu gözlemek için Tablo 6.1 de belirtilen NS5 ve NS6 numuneleri "S" şeklinde oluşturulan elektrot deseni ile üretildi.

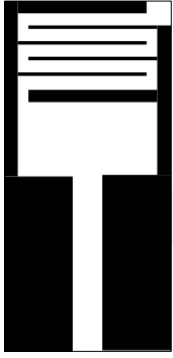
IDE için malzeme olarak platin, altın ve gümüş kullanıldı S desen için sadece altın kullanıldı. Altın mikrofabrikasyonda sıklıkla kullanılır. Öte yandan Altın pahalı olduğundan üretim maliyetini artırır. Ag ve lehim malzemesi arasındaki yapışma iyi değildir. Bu nedenle, telleri Ag pedlerine yapıştırmak için gümüş iletken epoksi kullanılır. Gümüş iletken epoksi, iyi elektriksel ve termal iletkenliğe sahip bir elektronik epoksidir.

Elektrotlardan platin ve altın malzemesine sahip olanlar lazer ablasyon ile işlendi. Yaklaşık olarak 1000nm kalınlığına sahip Al_2O_3 üzerine büyütülen platin ve altın elektrotlar Bölüm 3 'de bahsedilen Lazer ablasyon cihazı ile Visual Laser Marker yazılımı kullanılarak tasarlanan ve Şekil 6.3 de belirtilen ölçüler ile işlendi ve işlenmiş elektrotlar gösterildi.



Şekil 6.3. (a) Tasarlanan IDE deseni ve ölçüleri ($a=520 \mu m$, $b=220 \mu m$, $c=520 \mu m$ ve $d=210 \mu m$) ve (b) Lazer ablasyon ile işlenmiş IDE deseni ve ölçüleri ($a=524 \mu m$, $b=215 \mu m$, $c=225 \mu m$)

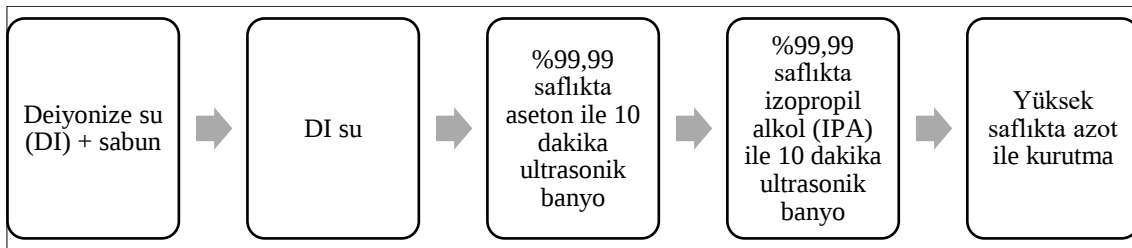
Bu tez kapsamında seçilen esnek alttaş kapton üzerine üretilen nem sensörlerinin elektrot deseni inkscape programında çizildi ve gümüş mürekkebi kullanılarak ink-jet tekniği ile oluşturuldu. İnkscape programında tasarlanan IDE deseninin görüntüsü Şekil 6.4 de verildi. Ag mürekkep alkol ve glikol karışımı içinde 100 nm'den küçük Ag nano parçacıkların çözülmesi ile üretilmiştir. Genes' Ink firmasına ait Smart'Ink S-CS01520 kodlu Ag mürekkep üretici firma tarafından esnek alttaşlar üzerinde yapılacak olan ve yüksek iletkenliğe ihtiyaç duyulan çalışmalar için önerilmektedir.



Şekil 6.4. Inkscape programı ile çizilmiş IDE deseni

6.3. Aktif Katmanın Nem Sensörü Üzerine Üretilmesi

Nem sensörü üretimi için kullanılan alttaşların (Al_2O_3 ve kapton) temizliği yapıldı. Bu alttaş temizleme işlemi için Şekil 6.5'de ki adımlar izlendi ve her alttaş için bu işlem ayrı ayrı uygulandı.



Şekil 6.5. Alttaşlar için temizleme işlemi

Temizlenen alttaş üzerine elektrotlar bölüm 6.2'de bahsedildiği gibi oluşturuldu. Üretilen nem sensörleri rezistif nem sensörleridir. Rezistif nem sensörlerinde elektrotların pet (kontak) bölgesinden direnç ölçümü yapılır. Pet bölgesinin aktif katman ile kaplanması

istenilen bir durum değildir. Bu yüzden aktif katman kaplanırken kontak bölgesi için belirli adımlar izlendi.

- İlk olarak elektrotların kontak bölgesi, eş-püskürtme yöntemi, Dr.Bıçağı ve Ultrasonik kaplama yöntemi için asetonla temizlenebilen kimyasal boyar madde ile kapatıldı. Aktif katman kaplandıktan bölüm 5’de sunulduğu şekilde kaplandıktan sonra kimyasal boyar madde dikkatli bir şekilde aseton ile temizlendi.
- Daldırma yöntemi için kontak dışında kalan bölge karışıma daldırıldı (Bölüm 5 de detaylı bir şekilde anlatılan daldırma metodu aynı şekilde uygulandı).
- Elektrotların alttaşa tutunması ve daha doğru sonuçlar alabilmek adına RTA, CTA ya da sıcak tabla (hot plate) üzerinde numuneler tavlandı.

Üretilen on bir (11) farklı nem sensörünün ayrıntılı bilgileri Çizelge 6.1’de verildi.

Çizelge 6.1. Üretilen nem sensörleri

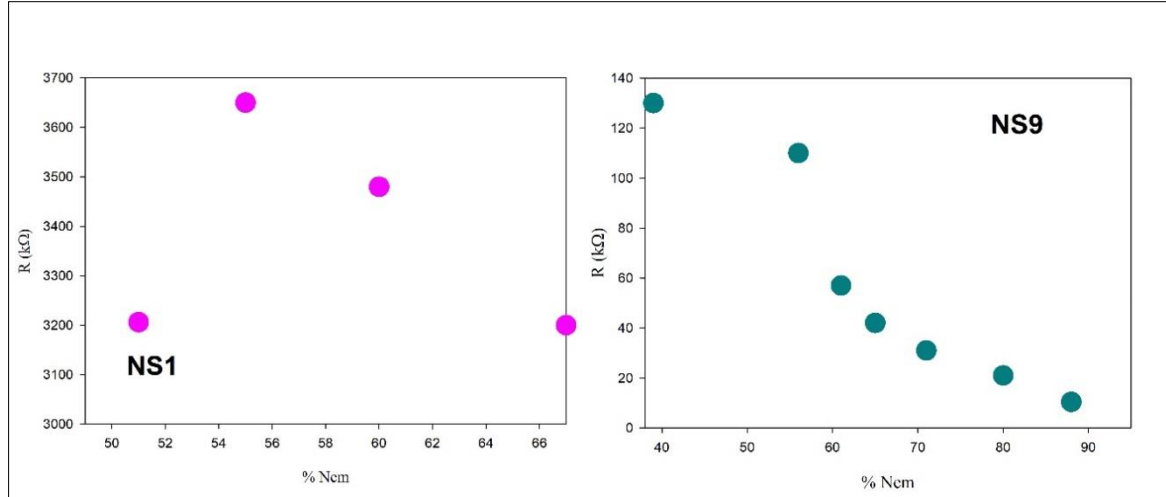
<i>Numune numarası</i>	<i>Alttaş</i>	<i>Elektrot</i>	<i>Elektrot üretim yöntemi</i>	<i>Elektrot deseni</i>	<i>Algılayıcı/Aktif Katman</i>	<i>Algılayıcı Katman üretim yöntemi</i>
NS1	Al ₂ O ₃	Pt	Eş-püskürtme yöntemi ve lazer ablasyon	IDE	TiO ₂	Eş-püskürtme yöntemi
NS2	Al ₂ O ₃	Au	Eş-püskürtme yöntemi ve lazer ablasyon	IDE	TiO ₂	Eş-püskürtme yöntemi
NS3	Al ₂ O ₃	Au	Isıl buharlaştırma yöntemi ve lazer ablasyon	IDE	TiO ₂	Eş-püskürtme yöntemi
NS4	Al ₂ O ₃	Au	Isıl buharlaştırma yöntemi ve lazer ablasyon	IDE	TiO ₂ D	Daldırma ile kaplama
NS5	Al ₂ O ₃	Au	Isıl buharlaştırma yöntemi ve lazer ablasyon	S desen	TiO ₂ D	Daldırma ile kaplama
NS6	Al ₂ O ₃	Au	Isıl buharlaştırma yöntemi ve lazer ablasyon	S desen	SnO ₂ D	Daldırma ile kaplama
NS7	Al ₂ O ₃	Au	Isıl buharlaştırma yöntemi ve lazer ablasyon	IDE	SnO ₂ D	Daldırma ile kaplama
NS8	Al ₂ O ₃	Au	Isıl buharlaştırma yöntemi ve lazer ablasyon	IDE	TiO ₂ pasta (az alkol)	Dr. Bıçağı yöntemi ile Kaplama
NS9	Al ₂ O ₃	Au	Isıl buharlaştırma yöntemi ve lazer ablasyon	IDE	TiO ₂ pasta (çok alkol)	Ultrasonik Banyo ile Kaplama
NS10	Kapton	Ag	Mürekkepli Baskı Tekniği	IDE	TiO ₂ D	Daldırma ile kaplama
NS11	Kapton	Ag	Mürekkepli Baskı Tekniği	IDE	SnO ₂ D	Daldırma ile kaplama

6.4. Sensör Çıktı Parametreleri

Nem sensöründeki hassasiyet, bağıl nemdeki direnç değişimi ile ölçülür [4]. Üretilen nem sensörlerinin %70 ve %40 bağıl nem aralığındaki direnç değişimleri nem sensörü test

sisteminde ölçüldü ve direnç değişimi Çizelge 6.2’de gösterildi. Çizelge 6.2’de bahsedilen ΔR olarak bahsedilen %70 nemde ki direnç ile %40 nemde ki direnç arasında ki farktır, bu fark ne kadar fazla ise sensörün hassasiyeti aynı oranda artar.

Hassasiyetleri iyi olan bazı numunelerin, nem karşısındaki direnç değerleri Şekil 6.6’da verildi.



Şekil 6.6. NS1 ve NS9 için nem ölçüm sonuçları

Çizelge 6.2. Nem ölçüm sonuçları

<i>Sensör Adı</i>	<i>Direnç $\Delta R = (R_{\%70} - R_{\%40})_{nem}$ (kΩ)</i>
NS1	346
NS2	542
NS3	3715
NS4	4990
NS5	3551
NS6	973
NS7	402
NS8	1379
NS9	120
NS10	3800
NS11	4500

Nem sensörünün katmanlarından birisi olarak kullanılan alttaş, sensör kullanım alanına göre seçilmelidir. Buna göre, Bölüm 6.1’de bahsedilen alümina esnek olmayan alttaş olarak, kapton ise esnek alttaş olarak seçildi. TiO₂ algılayıcı katman kullanılarak üretilen NS4 sensöründe alttaş olarak alümina, benzer şekilde TiO₂ algılayıcı katman kullanılarak üretilen NS10 sensöründe ise alttaş olarak kapton kullanıldı. Nem sensörü çıktı parametreleri incelendiğinde, alümina alttaş kullanılarak üretilen nem sensörünün, kapton alttaş kullanılarak üretilen nem sensöründen daha yüksek duyarlılık değerlerine sahip olduğu tespit edildi.

SnO₂ algılayıcı katman kullanılarak üretilen NS7 sensöründe alttaş olarak alümina, benzer şekilde TiO₂ algılayıcı katman kullanılarak üretilen NS11 sensöründe ise alttaş olarak kapton kullanıldı. Nem sensörü çıktı parametreleri incelendiğinde, kapton alttaş kullanılarak üretilen nem sensörünün, alümina alttaş kullanılarak üretilen nem sensöründen daha yüksek duyarlılık değerlerine sahip olduğu tespit edildi. Kapton alttaş kullanıldığında, SnO₂ algılayıcı katmanın TiO₂ algılayıcı katmana göre nem sensörü üretimine daha uygun olduğu

tespit edildi. Alümina alttaş kullanıldığında ise nem sensörü üretimi için TiO_2 'nin seçilmesinin daha uygun olduğu bulundu.

Çizelge 6.1'de görüldüğü üzere NS1 ve NS2 sensörlerinde elektrotlar farklı malzemeler ile üretildi. NS1 sensörü üretilirken platin elektrot, NS2 sensörü üretilirken altın elektrot kullanıldı. Elektrot malzemesinin farklı olmasının nem sensörü hassasiyeti üzerindeki etkisi incelendi. Bu inceleme sonucunda altın elektrotun platin elektrota göre daha hassas olduğu bulundu.

NS2 ve NS3 sensörlerin elektrotları üretilirken farklı üretim teknikleri kullanıldı. NS2 sensör numunesi eş-püskürtme yöntemi kullanılarak altın kaplanırken NS3 sensör numunesi ısı buharlaştırma yöntemi ile altın kaplandı. Elektrot üretim yönteminin farklı olmasının nem sensörü hassasiyetine etkisi incelendi ve ısı buharlaştırma ile üretilen elektrotun nem hassasiyetinin eş-püskürtme yöntemine göre daha iyi olduğu tespit edildi. Bölüm 4'de bahsedilen teknikler doğrultusunda incelendiğinde ısı buharlaştırma ile üretilen elektrotların iletkenliklerinin daha fazla olduğu gözlemlendi.

NS5 ve NS6 numuneleri farklı algılayıcı katmanlar ile üretildi. NS5 numunesi TiO_2 D ile üretilirken NS6 numunesi SnO_2 D ile üretildi. Bölüm 5'de bahsedilen karakterizasyonların analizleri incelendiğinde TiO_2 ve SnO_2 'nin AFM ölçüm sonuçlarından elde edilen RMS değerlerine bakıldığında TiO_2 'nin neme duyarlılığının daha yüksek olması gerektiği görüldü. XRD sonuçlarından hesaplanan tanecik boyutlarına bakıldığında SnO_2 , TiO_2 'ye göre daha küçük tanecik boyutuna sahip olduğu hesaplandı. Tanecik büyüklüğü arttıkça hassasiyetin arttığı bilinmektedir [76]. XRD sonuçlarına göre TiO_2 'nin daha hassas olması beklendi. Nem sensörü çıktı parametrelerine bakıldığında da sonuçların AFM ve XRD ölçüm sonuçlarını ile paralel bir şekilde TiO_2 'nin SnO_2 'ye göre daha hassas olduğu görüldü.

NS10 ve NS11 numuneleri farklı algılayıcı katmanlar ile üretildi. NS10 numunesi TiO_2 D ile üretilirken NS11 numunesi SnO_2 D ile üretildi. Bölüm 5'de bahsedilen karakterizasyonların analizleri incelendiğinde TiO_2 ve SnO_2 'nin AFM ölçüm sonuçlarından elde edilen RMS değerlerine bakıldığında SnO_2 'nin neme duyarlılığının daha yüksek olması gerektiği görüldü. XRD sonuçlarından hesaplanan tanecik boyutlarına bakıldığında SnO_2 , TiO_2 'ye göre daha büyük tanecik boyutuna sahip olduğu hesaplandı. XRD sonuçlarına göre SnO_2 'nin daha hassas olması beklendi. Nem sensörü çıktı parametrelerine bakıldığında da

sonuçların AFM ve XRD ölçüm sonuçlarını ile paralel bir şekilde SnO₂'nin TiO₂'ye göre daha hassas olduğu görüldü.

NS5-NS6 ile NS10-NS11 sensör parametreleri incelendiğinde alümina altta kullanılan nem sensörlerinde TiO₂'nin neme daha duyarlı olduğu ve kapton altta kullanıldığında ise SnO₂'nin nem duyarlılığının daha fazla olduğu görüldü.

NS8 numunesi Dr. Bıçağı tekniği ile üretilirken NS9 numunesi ultrasonik banyo ile kaplama tekniğiyle üretildi. Bu algılayıcı katman üretim yöntemlerinin nem sensörü hassasiyeti üzerindeki etkisi incelendi. Bölüm 5'de bahsedilen karakterizasyonlar incelendiğinde NS8 sensörünün neme daha duyarlı olması beklendi ve nem sensörü çıktı parametreleri beklenen sonucu doğruladı.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, TiO_2 ve SnO_2 algılayıcı katmana sahip direnç ölçüm metoduna dayalı nem sensörlerinin üretimi tartışıldı. Direnç ölçüm temelli RH nem sensörleri, geniş bir bağıl nem aralığında doğrusallıkları nedeniyle yaygın olarak kullanıldı. Direnç temelli sensörlerinin çalışması, çevredeki ortamdaki RH'nin bir fonksiyonu olarak hassas bir malzemenin iletkenlik sabitinin değişmesine dayanır [46]. TiO_2 , duyarlılığı, doğrusal davranışı ve geniş bir sıcaklık aralığında kararlılığı nedeniyle tezde algılama malzemesi olarak kullanıldı. TiO_2 bağıl nem değişikliklerine karşı iyi bir hassasiyet sergiledi. TiO_2 ayrıca iyi bir kararlılık gösterir, bu da elektronik endüstrisinde koruyucu bir tabaka olarak yaygın bir şekilde uygulanmasına yol açmıştır.

Direnç ölçüm temelli RH sensörleri, TiO_2 ve SnO_2 katmanlarının farklı iki alttaş esnek olmayan Al_2O_3 ve esnek kapton üzerine interdigital elektrot deseni oluşturularak modellendi. Birbirine bağlı basit yapı, daha fazla temas alanı ve nispeten düzlemsel yüzey gibi avantajları nedeniyle kullanıldı. Temel olarak algılayıcı katman için kullanılan daldırma yöntemi, geleneksel kaplama yöntemlerinin aksine bir temiz odanın dışına da taşınabilir. Daldırma işlemi ve ultrasonik banyo yöntemi esnektir ve baskılı devre kartı (PCB) üzerine RH sensörleri oluşturmak için kullanılabilir, böylece bu tür sensör sistemlerinin üretim maliyetlerini düşürür. RH sensörlerinin performansını iyileştirmek için birçok daldırma parametresi çalışıldı. Dr. Bıçağı ve ultrasonik banyo tekniği ile yapılan sensörlerin performansı da karşılaştırıldı. Sonuç olarak, daha yüksek film yoğunluğunun daha yüksek doğrusallık ve hassasiyetle sonuçlandığı sensöre kıyasla benzer bir hassasiyet ve doğrusallık seviyesi sergilediği görüldü.

DeneySEL sonuçlar, bu tezde önerilen nem sensörlerinin, nemi artırıp düşürürken düşük duyarlılık ile kısa sürede kararlı veriler sağladığını da gösterdi. RH sensörünün çıkışını test etmek için basit bir nem sensörü test cihazı kullanıldı. Nem sensörü test cihazı devresi hassastır ve geniş bir direnç aralığını kapsayabilir.

Tezdeki başarılarla dayanarak, ileride yapılacak çalışmaları önermek şunları içerir:

1. RH sensörü, %40-%70 Bağıl Nem aralığında iyi doğrusallık gösterir, ancak direnç değişikliği çok küçük ve hızlıdır. Daha kolay tespit için hassasiyeti artırmanın bir yolunu bulmalıyız.
2. RH sensörü, TiO_2 ve SnO_2 ile iyi sonuçlar sağlar. Sonraki adım, RH sensörünün performansını ve hassasiyetini artırabilecek TiO_2 ve SnO_2 bir RH sensörü üretmektir.



KAYNAKLAR

1. Stanislav, K. Z., Kolpakov A., and Neil T. (2014). Toward a new generation of photonic humidity sensors, *Sensors*, 14, 3986–4013.
2. Selin, H. (2008). Encyclopaedia of the history of science, technology, and medicine in Non-Western cultures (2. ed.), Berlin: Springer, 736.
3. Knowles Middleton, W. E. (1966). A history of the thermometer and it's uses in meteorology. ABD Maryland: Johns Hopkins University Press, 10-40.
4. Hamidon, M. N. (2014). Humidity sensors principle, mechanism, and fabrication technologies: A comprehensive review, *Sensors*, 14, 7881–7939.
5. Connolly, E. J., O'Halloran, G. M., Pham, H. T. M., Sarro, P. M. and French, P. J. (2002). Comparison of porous silicon, porous polysilicon and porous silicon carbide as materials for humidity sensing applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 99(1-2), 25–30.
6. Goldberg, H. D., Brown, R. B., Liu, D. P., and Meyerhoff, M. E. (1994). Screen printing: A technology for the batch fabrication of integrated chemical-sensor arrays, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 21(3), 171–183.
7. Krutovertsev, S. A., Tarasova, A. E., Krutovertseva, L. S., Chuprin, M. V., Ivanova, O. M., and Sazhinev, Y. S. (2011, June). *Technology and characteristics of microhumidity sensors*. 16th International Solid-State Sensors, Actuators Microsystems Conference Beijing, China, 621–624.
8. Yang, B., Aksak, B., Lin, Q., and Sitti, M. (2006). Compliant and low-cost humidity nanosensors using nanoporous polymer membranes, *Sensor Actuators B: Chemical*, 114, 254–262.
9. Hu, H. C. and Dai, C. L. (2014). Titanium dioxide nanoparticle humidity microsensors integrated with circuitry on-a-chip. *Sensors*, 14, 4177–4188.
10. Dubourg, G., Katona, J., Rodović, M., Savić, S., Kitic, G., Niarchos, G., and Crnojević-Bengin, V. (2017). Flexible and highly sensitive humidity sensors using screen-printed TiO₂ nanoparticles as sensitive layer, *Journal Physic Conference Series*, 939(1), doi: 10.1088/1742-6596/939/1/012008.
11. Green, J. and Dyer, I. (2009). Measurement of humidity, *Anaesth Intensive Care Medical*, 10, 45–47.
12. Chen, Z. and Lu, C. (2005). Humidity sensors: A review of materials and mechanisms, *Sensor Letter*, 3, 274–295.
13. Rittersma, Z. (2002). Recent achievements in miniaturised humidity sensors - a review of transduction techniques, *Sensors Actuators A Physic*, 96, 196–210.
14. Mohan, V. (2010). *EI 602 Process Control Instrumentation - I*, Australia: IDC Technologies, 53-72.

15. Ritsche, M. T. (2005). *Chilled mirror dew point hygrometer*. USA: U. S. Department of Energy, 1-9.
16. Gu, L., Huang, Q. A., and Qin, M. (2004). A novel capacitive-type humidity sensor using CMOS fabrication technology. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 99(2-3), 491-498.
17. Kiasari, N. M., Soltanian, S., Gholamkhass, B. and Servati, P. (2012). Room temperature ultra-sensitive resistive humidity sensor based on single zinc oxide nanowire, *Sensors and Actuators A: Physical*, 182, 101-105.
18. Corres, J. M., Matias, I. R., Hernaez, M., Bravo, J., and Arregui, F. J. (2008). Optical fiber humidity sensors using nanostructured coatings of SiO₂ nanoparticles, *IEEE Sensors Journal*, 8(3), 281–285.
19. Wang, B., Zhang, F., Pang, F., and Wang, T. (2011, November). An optical fiber humidity sensor based on optical absorption. In *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition* (83112A). Optical Society of America.
20. Urrutia, I. M. A., Rivero, P., and Goicoechea, J. (2011). Optical sensor based on polymer electrospun nanofibers for sensing humidity, *Fifth International Conference Sensor Technology*, 380–383.
21. Pascal-Delannoy, F., Sorli, B., and Boyer, A. (2000). Quartz crystal microbalance (QCM) used as humidity sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 84(3), 285-291.
22. Yang, Y. L., Lo, L. H., Huang, I. Y., Chen, H. J. H., Huang, W. S., and Huang, S. R. S. (2002, June). Improvement of polyimide capacitive humidity sensor by reactive ion etching and novel electrode design. In *Sensors, 2002 IEEE* (1, 511-514). IEEE.
23. Juhász, L., Vass-Vamai, A., Timár-Horváth, V., Desmulliez, M. P., and Dhariwal, R. S. (2008, April). Porous alumina based capacitive MEMS RH sensor. In *2008 Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS* (381-385). IEEE.
24. Golonka, L. J., Licznarski, B. W., Nitsch, K., and Teterycz, H. (1997). Thick-film humidity sensors. *Measurement Science and Technology*, 8(1), 92.
25. Fraden, J. (2003). *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. Berlin: Springer Verlag, 53-145.
26. Steele, J. J., Fitzpatrick, G. A., and Brett, M. J. (2007). Capacitive humidity sensors with high sensitivity and subsecond response times. *IEEE Sensors Journal*, 7(6), 955-956.
27. Qu, W., and Meyer, J. U. (1997). A novel thick-film ceramic humidity sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 40(2-3), 175-182.
28. Tetelin, A., and Pellet, C. (2006). Modeling and optimization of a fast response capacitive humidity sensor. *IEEE Sensors Journal*, 6(3), 714-720.
29. Tetelin, A., Pellet, C., Achen, A., and Toepper, M. (2005, October). Capacitive humidity sensors based on oxidized PhotoBCB polymer films: enhanced sensitivity and response time. In *Sensors, 2005 IEEE* (4). IEEE.

30. Kim, J. H., Hong, S. M., Lee, J. S., Moon, B. M., and Kim, K. (2009, January). High sensitivity capacitive humidity sensor with a novel polyimide design fabricated by MEMS technology. In *2009 4th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems* (703-706). IEEE.
31. Lee, H., Jung, S., Kim, H., and Lee, J. (2009, June). High-performance humidity sensor with polyimide nano-grass. In *TRANSDUCERS 2009-2009 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference* (1011-1014). IEEE.
32. Kiasari, N. M., Soltanian, S., Gholamkhash, B., and Servati, P. (2012). Room temperature ultra-sensitive resistive humidity sensor based on single zinc oxide nanowire. *Sensors and Actuators A: Physical*, 182, 101-105.
33. Kum-Pyo, Y., Lee-Taek, L., Nam-Ki, M., Myung, J. L., Chul, J. L., and Chan-Won, P. (2010). Novel resistive-type humidity sensor based on multiwall carbon nanotube/polyimide composite films. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 145, 120-125.
34. Wilson, J. (2005). *Sensor technology handbook*. Boston: Elsevier, 252-275.
35. Hajjaji, A., Amlouk, M., Gaidi, M., Bessais, B., and El Khakani, M. A. (2014). *Chromium doped TiO₂ sputtered thin films: synthesis, physical investigations and applications*. New York: Springer, 302-315.
36. Eranna, G. (2011). *Metal oxide nanostructures as gas sensing devices*. USA: CRC Press, 13-26.
37. Öztürk, S. (2011). TiO₂ İnce filmlerin üretilmesi ve fotovoltaiik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 29-50.
38. Sertel, B. C. (2020). Metal katkılı TiO₂ ince filmlerin geliştirilmesi ve sensör uygulamaları. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 27-47.
39. Chatterjee, S. (2008). Titania–germanium nanocomposite as a photovoltaic material. *Solar Energy*, 82(2), 95-99.
40. Cronmeyer, D. C. (1952). Electrical and optical properties of rutile single crystals. *Physical Review*, 87(5), 876.
41. Sinner-Hettenbach, M. (2000). *SnO₂ (110) and nano-SnO₂: characterization by surface analytical techniques*. Doctoral Dissertation, der Fakultät für Chemie und Pharmazie der "Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Tübingen, 56-62.
42. Alaf, M. (2007). *Kalay (Sn) ve kalayoksit (SnO₂) ince filmlerin üretim ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 39.
43. Javier Yusta, F. (1997). CVD preparation and characterization of tin dioxide films for electrochemical applications. *Journal of Materials Chemistry*, 7(8), 1421-1427.

44. Sinner-Hettenbach, M. (2000). *SnO₂ (110) and nano-SnO₂: characterization by surface analytical techniques*. Doctoral Dissertation, der Fakultät für Chemie und Pharmazie der Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Tübingen, 52-71.
45. Bunshah, R. F., and Weissmantel, C. (Eds.). (2001). *Handbook of hard coatings*, New Jersey: Noyes Publications, 253-381.
46. Kaplan, H. (2020). CdTe/CdS güneş hücresinin yapısal, optik ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 33-38.
47. Toygun, Ş., Köneçoğlu, G., and Kalpaklı, Y. (2013). Sol-Jel yöntemi genel prensipleri. *Sigma*, 31, 456-476.
48. Kenar, Y. (2019). *Daldırma yöntemiyle böhmitik alümina kaplanmış gözenekli paslanmaz çeliklerin özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 39.
49. Özler, F. B. (2007). *Titanyum ve alaşımlarının Sol-Jel daldırma yöntemiyle yüzey modifikasyonu*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 29.
50. Türhan, İ. (2000). *TiO₂ ve Katkılı TiO₂ ince filmlerin hazırlanması ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 25-40.
51. Sönmezoğlu, S., Koç, M., and Akın, S. (2012). İnce film üretim teknikleri. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 28(5), 389-404.
52. Bayram, A. B. (2018). *Ultrasonik sprej piroliz yöntemi ile biriktirilmiş titanyum dioksit(TiO₂) ince filmlerin üretimi ve karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 35.
53. Ebin, B. (2008). *Demir nano-partiküllerinin ultrasonik sprej piroliz ve hidrojen redüksiyonu yöntemi ile üretimi*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 45.
54. Özer, T. (2012). *Ultrasonik kimyasal püskürtme tekniği ile elde edilen Cd_{1-x}Sn_xS filmlerinin bazı fiziksel, yapısal ve yüzeysel özelliklerinin incelenmesi*, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 37.
55. Ceylan E. (2012). *Ultrasonik kimyasal püskürtme tekniği ile elde edilen Cd_{1-x}B_xS filmlerinin bazı fiziksel ve yüzeysel özelliklerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 9.
56. Köse, S. (1993). *Sprej piroliz metodu ile elde edilen Cd_{1-x}Zn_xS filmlerinin bazı fiziksel özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 33-35.
57. Atay, F. (2001). *Cd_{1-x}Ni_xS filmlerinin elektriksel, optik, yapısal ve yüzeysel özelliklerinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 47-53.

58. Ayтуğ, C. (2020). *Fiziksel buhar biriktirme yöntemi ve Doktor Blade kaplama tekniği ile üretilen CuInSe₂ ince filmlerin özelliklerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 66.
59. Aegerter, M. A. and Mennig, M. (2004). *Sol-Gel technologies for glass producers and users*, Berlin: Springer, 37-48.
60. Bunshah, R. F. (1994). *Handbook of deposition technologies for films and coatings*. New Jersey: Noyes Publications, 135-253.
61. Mattox, D. M., and Mattox, V. H. (2003). *Vacuum coating technology*. New York: William Andrew Publishing, 11-19.
62. Ahmed, S., Tahir, F. A., Shamim, A., and Cheema, H. M. (2015). A compact kapton-based inkjet-printed multiband antenna for flexible wireless devices. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14, 1802-1805.
63. Yaman, A. D. (2020). *Gümüş ince filmlerin nanomürekkepli baskı tekniği ile geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-34.
64. Bityurin, N., Luk'Yanchuk, B. S., Hong, M. H., and Chong, T. C. (2003). Models for laser ablation of polymers. *Chemical Reviews*, 103(2), 519-552.
65. Le Harzic, S. V. R., Huot, N., Audouard, E., Jonin, C., Laporte, P. and Fraczkiewicz, R. F. A. (2002). Comparison of heat-affected zones due to nanosecond and femtosecond laser pulses using transmission electronic microscopy, *Application Physic*, 80, 3886–3888.
66. Chichkov, B. N., Momma, C., Nolte, S., Von Alvensleben, F., and Tünnermann, A. (1996). Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids. *Applied Physics A*, 63(2), 109-115.
67. Küper, S., Brannon, J., and Brannon, K. (1993). Threshold behavior in polyimide photoablation: Single-shot rate measurements and surface-temperature modeling. *Applied Physics A*, 56(1), 43-50.
68. Srinivasan, R. (1986). Ablation of polymers and biological tissue by ultraviolet lasers. *Science*, 234(4776), 559-565.
69. Srinivasan, R., and Braren, B. (1989). Ultraviolet laser ablation of organic polymers. *Chemical Reviews*, 89(6), 1303-1316.
70. Suryanarayana, C., and Grant Norton, M. (1998). *X-Ray Diffraction: a practical approach*. New York: Springer, 3-19.
71. Karunagaran, D. M. B., Rajendra Kumar, R. T. and Narayandass, G. M. R. (2002). Influence of thermal annealing on the composition and structural parameters of DC magnetron sputtered titanium dioxide thin films, *Crystal Technology*, 37(12), 1285–1292.

72. Ito, S., Chen, P., Comte, P., Nazeeruddin, M. K., Liska, P., Péchy, P., and Grätzel, M. (2007). Fabrication of screen-printing pastes from TiO_2 powders for dye-sensitised solar cells. *Progress in photovoltaics: research and applications*, 15(7), 603-612.
73. Samat, S. F. A., Sarah, M. S. P. and Idros, M. F. M. (2019). Effect of band gap on TiO_2 thin film with different layer using dip coating technique, *International Journal of Electrical and Electronic Systems Research*, 3, 2–7.
74. Cheng, F. T., Shi, P., and Man, H. C. (2004). A preliminary study of TiO_2 deposition on NiTi by a hydrothermal method. *Surface and Coatings Technology*, 187(1), 26-32.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : FERRUH, Karen Cansu
Uyruk : Türkiye Cumhuriyeti (T.C.)



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/Fizik	Devam ediyor
Lisans	Hacettepe Üniversitesi/Fizik Mühendisliği	2018
Öğretmenlik Sertifika Programı	Ankara Üniversitesi Eğitim Fakültesi	2018
Önlisans	Anadolu Üniversitesi/Laborant ve Veteriner Teknikerliği	2021
Lise	Mudanya Sami Evkuran Anadolu Lisesi	2010

İş Deneyimleri

Yıl	Yer	Görev
2018-Halen	Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi	Bursiyer Araştırmacı

Yabancı Dil

İngilizce, Almanca, Yunanca

Yayınlar

1. Ferruh, K. C., Yaman, A. D. Yıldız, O., and Özçelik, S. (2020). *Development Of TiO₂ Humidity Sensors On Flexible Substrate By Ink-Jet Printing And Dip Coating Techniques*, Sözlü Sunum, ICMATSE 2020 International Conference on Advanced Materials Science and Engineering and High Tech Device Applications.
2. Ferruh, K. C., Yıldız, O., Özçelik, S. (2019, Aralık). *Elektrokimyasal Karbon Monoksit Gaz Sensörü Geliştirilmesi*, Poster Sunumu, 25. Yoğun Madde Fiziği – Ankara Toplantısı, Hacettepe Üniversitesi.

Hobiler:

Kayak, Okçuluk, Piyano, Masa Tenisi, Seyahat etmek





GAZİ GELECEKTİR..