



**ÇİNKO OKSİT GAZ SENSÖRÜNÜN
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Yüksek Lisans Tezi

Seçkin AKINCI

Eskişehir 2023

ÇİNKO OKSİT GAZ SENSÖRÜNÜN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Seçkin AKINCI

Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Fiziğı Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Evren TURAN

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ocak 2023

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Seçkin AKINCI'nin ÇİNKO OKSİT GAZ SENSÖRÜNÜN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU başlıklı çalışması 25/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği”nin ilgili maddeleri uyarınca, Fizik Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye

: Prof. Dr. Ahmet Şenol AYBEK

Üye

: Prof. Dr. Evren TURAN

Üye

: Doç. Dr. Salih KÖSE

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

25/01/2023

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ęrencisi Seçkin AKINCI, INKO OKSİT GAZ SENSÖRÜNÜN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun grlmştir.

Tez Daniřmanı

Prof. Dr. Evren TURAN

ÖZET

ÇİNKO OKSİT GAZ SENSÖRÜNÜN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Seçkin AKINCI

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Fiziği Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2023

Danışman: Prof. Dr. Evren TURAN

Yarıiletken gaz sensörleri iç ve dış mekanlarda hava kalitesi belirlenmesinden, yanıcı veya zehirli gazların tespitine kadar birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Çinko oksit tabanlı gaz sensörleri, hızlı yanıt, düşük algılama limiti, yüksek seçicilik ve güvenilir performans nedeniyle metal oksit gaz sensörleri içerisinde öne çıkmaktadır. Enerji verimliliği ve üretim maliyetleri gözetildiğinde mikrofabrikasyon yöntemleri ile üretilen gaz sensörleri büyük artılar ortaya koymaktadır. Aktif malzemenin oksijen adsorbe etmesi sonucunda elektriksel direncinin değişimi prensibinden yola çıkılarak elde edilen bu sensörlerde, sensör malzemelerinin yapı ve boyutları yanı sıra sensör tasarımı ile minimum alana sığdırılabilecek aktif mikro yapılar sensör verimliliğini etkileyen ana faktörlerden birisidir.

Bu çalışmada mikro fabrikasyon yöntemleri ile üretilen çinko oksit tabanlı yarıiletken gaz sensörlerinin, aynı mikrometre kare alan içerisinde farkı elektrod mesafeleri ve tasarımları ile karbonmonoksit algılama performansları incelenmiştir. Aktif malzeme olarak kullanılan çinko oksit ince filmi DC saçırma yöntemi ile pasivizasyon gerçekleştirilmiş silisyum alttaş üzerine kaplanarak SEM, EDS, Elipsometre ve XRD ile karakterize edilmiştir. Elektriksel bağlantı için krom üzerine altın elektrotlar dairesel, paralel ve karesel tasarımlar 600X600 mikrometre kare içerisinde tasarlanıp fotolitografi yöntemi ile şekillendirilmiştir. Karbonmonoksit atmosferi altında yapılan elektriksel ölçümlerde elektrot arası mesafe ve tasarımlara bağlı olarak algılama hızı ve doyum süresi değişimleri incelenmiştir. 2 mikronluk elektrodlar ve mesafesi ile aynı birim alana sahip sensörler içerisinde en düşük direnç ve en hızlı doyum süresi elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Çinko Oksit, Gaz sensörü, mikro fabrikasyon, ince film, DC saçırma

ABSTRACT

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF ZINC OXIDE GAS SENSOR

Seçkin AKINCI

Department of Physics

Programme in Solid state Physics

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, January 2023

Supervisor: Prof. Dr. Evren TURAN

Semiconductor gas sensors are widely used in many areas from indoor and outdoor air quality determination to the detection of flammable or toxic gases. Zinc oxide-based gas sensors stand out among metal oxide gas sensors due to their fast response, low detection limit, high selectivity, and reliable performance. When energy efficiency and production costs are considered, gas sensors produced with microfabrication methods display great advantages. In these sensors, which are obtained based on the principle of changing the electrical resistance as a result of the active material adsorbing oxygen. The structure and the dimensions of the sensor materials, as well as the active microstructures that can be fit into the minimum area with the sensor design, are the main factors effecting the sensor efficiency.

In this study, carbon monoxide detection performances of zinc oxide-based semiconductor gas sensors, which were produced by microfabrication methods with different electrode distances and designs under the same square micrometer area, were performed. As the active material, zinc oxide thin film was coated on a passivated silicon substrate by DC sputtering method. SEM, EDS, Ellipsometer, and XRD characterization techniques were performed to analyze the ZnO thin films. For electrical connection, gold on chromium electrodes are designed in circular, parallel, and square designs within 600x600 micrometer square and shaped by photolithography method. The effects of the distance between the electrodes and the designs were on detection rate and saturation time were investigated by electrical measurements under a carbon monoxide atmosphere. The lowest resistance and the fastest saturation time were obtained by the sensors which has 2-micron electrode widths and the electrode gaps.

Keywords: Zinc Oxide, Gas Sensor, micro-fabrication, Thin Film, DC Sputtering

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamda bana öncülük eden ve lisans eğitimimin başından beri her daim yol gösteren ve destek olan değerli akademik danışmanım Prof. Dr. Evren Turan'a en içten dileklerimle teşekkür ederim. Lisans ve yüksek lisans eğitimimde her zaman yapıcı geri bildirimleri ve katkılarıyla vermiş oldukları destek için Prof. Dr. Ahmet Şenol Aybek ve Prof. Dr. Metin Kul'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez jürimde yer alan Doç. Dr. Salih Köse'ye değerli katkılarından ötürü teşekkür ederim. Koç Üniversitesi n²STAR yönetim kuruluna ve her zaman desteklerini esirgemeyen saygıdeğer çalışma arkadaşlarıma teşekkür eder, yüksek lisans eğitimimin her aşamasında yanımda olup beni destekleyen saygıdeğer eşim Pınar Akıncı'ya minnettarlığımı sunarım.

Seçkin AKINCI

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Seçkin AKINCI

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
GÖRSELLER DİZİNİ	XIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XV
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Çinko Oksit	2
1.3. Amaç.....	4
2. TEMEL BİLGİLER	5
2.1. Gaz Sensörü ve Metal Oksit Yarıiletken Tabanlı Gaz Sensörleri	5
2.1.1. Fiziksel sensörler	5
2.1.2. Kimyasal sensörler	6
2.1.3. Biyokimyasal sensörler	6
2.2. Gaz Sensörü Performansını Belirlenmesi	6
2.3. Metal Oksit Gaz Sensörlerinin Temel Çalışma Prensibi.....	7
2.3.1. Metal oksit sensörlerin duyarlılığını etkileyen faktörler	8
2.3.1.1. Tane boyutu	8
2.3.1.2. Katkılama	9

2.3.1.3. Sıcaklık.....	9
2.3.1.4. Film kalınlığı etkisi.....	9
2.4. Mikro Yapılandırılmış Metal Oksit Gaz Sensörleri	10
3. MİKRO FABRİKASYON TEKNİKLERİ.....	11
3.1. İnce Film Kaplama.....	11
3.1.1. Plazma-destekli kimyasal buhar biriktirme	11
3.1.2. Saçtırma (Sputtering) yöntemi.....	12
3.1.3. Elektron demeti ile buharlaştırma.....	13
3.2. Fotolitografi	14
4. KARAKTERİZASYON TEKNİKLERİ	17
4.1. Elipsometre Ölçüm Sistemi	17
4.2. Profilometre Ölçüm Sistemi	18
4.3. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)	19
4.4. EDS Analiz Sistemi	20
4.5. X ışını Difraktometresi	20
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	21
5.1. Sensör Tasarımı.....	21
5.2. Sensör Üretim Basamakları	23
5.2.1. Örnek hazırlama ve temizlik prosedürü	23
5.2.2. Silikon dioksit kaplaması.....	25
5.2.3. ZnO ince film kaplaması.....	28
5.2.4. Fotorezist kaplanması	32
5.2.4.1. HMDS kaplaması.....	32
5.2.4.2. Fotorezist serme işlemi	33
5.2.5. UV pozlama.....	33
5.2.6. Banyolama.....	34
5.2.7. Kontak kaplaması.....	35
5.2.8. Lift-Off metodu ile kontakların açığa çıkarılması	36
6. SENSÖR KARAKTERİZASYONU	40
6.1. ZnO Gaz Sensörü Karakterizasyon Deney Düzeneği	40
6.2. Gaz Sensörü Karakterizasyon Sonuçları.....	41

7. SONUÇ 45

KAYNAKÇA..... 46

ÖZGEÇMİŞ



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 5.1. Tasarım ölçü tablosu	22
Tablo 5.2. SiO ₂ Kaplama Reçetesi	26
Tablo 5.3. SiO ₂ elipsometre ölçüm Sonuçları	28
Tablo 5.4. ZnO elipsometre ölçüm Sonuçları	30



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Mekanik kimyasal işleme yolu ile ZnO nano parçacık üretim şeması.....	3
Şekil 1.2. Çinko oksit kristal yapıları	3
Şekil 2.1. Oksijen gazı tutunumu ile metal oksit yarıiletkende tükenme bölgesi ve taneler arası kontak direncinin oluşumu (Madou & Morrison, 1989).	8
Şekil 3.1. (a) PECVD ve (b) ICP-PECVD şematik gösterimi.....	12
Şekil 3.2. Pozitif ve negatif UV ışığa duyarlı reçine (Fotorezist) davranış özelliklerinin gösterimi	15
Şekil 4.1. Elipsometre polarize ışığın yansıma sonrasında değişimi (https://www.jawoollam.com/)	17
Şekil 4.2. Işığın farklı ortamlar arası kırınım sınır koşulları	17
Şekil 4.3. Profilometre çalışma prensibi.....	18
Şekil 4.4. Paras(a)Taramalı elektron mikroskobu şematik gösterimi (Shawky, Elsayed, & Ahmed, 2016), (b) Elektron demetinin numune etkileşimi sonucu ortaya çıkan elektron ve x-ışınları	19
Şekil 4.5. X-ışınlarının atomlar arası kırınım ve yansıması	20
Şekil 5.1. Tasarım çeşitleri	22
Şekil 5.2. Fabrikasyon şematiği.....	23
Şekil 5.3. SiO ₂ elipsometre Psi (Ψ) ve Delta (Δ) parametreleri	28
Şekil 5.4. ZnO XRD analiz sonucu	32
Şekil 6.1. ZnO karesel tasarım direnç değişim grafiği ve sensor doyum zamanları	42
Şekil 6.2. ZnO paralel tasarım direnç değişim grafiği ve sensor doyum zamanları.....	43
Şekil 6.3. ZnO gaz sensörü doyum süreleri karşılaştırılması	43

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 4.1. Bruker DEKTAK XT ölçüm görseli	19
Görsel 5.1. L-Edit programında gerçekleştirilen sensör tasarımı	21
Görsel 5.2. Disco DAD810 cihazı ile alttaş dilimlenmesi	24
Görsel 5.3. Temizlik yapılmış silisyum pul alttaşlar.....	25
Görsel 5.4. Sentech ICP-PECVD cihazında silisyum pulların SiO ₂ kaplanması.....	26
Görsel 5.5. Elipsometre cihazı	26
Görsel 5.6. Elipsometre ölçüm ekranı görseli	27
Görsel 5.7. Sentech SENresearch4.0 elipsometre modelleme ekranı görseli	27
Görsel 5.8. Saçtırma sisteminde numune tutucusu	29
Görsel 5.9. Numunelerin sputter sistemine yüklenmesi ve plazma ile kaplama görseli.....	29
Görsel 5.10. ZnO elipsometre Psi (Ψ) ve Delta (Δ) parametreleri.....	31
Görsel 5.11. ZnO ince film kalınlığı profilometre ölçüm sonucu.....	31
Görsel 5.12. HMDS kaplama vakum haznesi içerisine pul yerleşimi.....	32
Görsel 5.13. POLOS Spin 150i cihazı ile fotorezit kaplama işlemi.....	33
Görsel 5.14. Heidelberg UMLA maskesiz litografi cihazı	33
Görsel 5.15. Banyolama işlemi sonrasında numunelerin görseli	34
Görsel 5.16. UV ışığa duyarlı fotorezist kalınlığı ölçümü	34
Görsel 5.17. Banyolama sonrası desenlerin konfokal mikroskop görseli 1	35
Görsel 5.18. Banyolama sonrası desenlerin konfokal mikroskop görseli 2.....	35
Görsel 5.19. E-Beam evaporasyon sistemine numunelerin yerleştirilme görseli	36
Görsel 5.20. E-Beam evaporasyon cihazı ile krom üzerine altın kaplı numunelerin görseli.....	36
Görsel 5.21. Tamamlanmış örnek görüntüsü	37
Görsel 5.22. Sensör SEM görüntüsü 1	37
Görsel 5.23. Sensör SEM görüntüsü 2	38
Görsel 5.24. Sensör paralel yapıların EDS analizi	38
Görsel 5.25. Sensör dairesel yapıların EDS analizi	39
Görsel 5.26. Sensör kare yapıların EDS analizi	39
Görsel 6.1. Sensör ölçüm haznesi	40
Görsel 6.2. Sensör elektriksel ölçüm görseli.....	41

Görsel 6.3. ZnO gaz sensörü elektriksel karakterizasyon deney düzenneđi	41
--	----



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ZnO	: Çinko Oksit
SnO ₂	: Kalay Oksit
ZnS	: Çinko sülfür
CdS	: Kadmiyum sülfür
SiO ₂	: Silisyum dioksit
CeO ₂	: Seryum oksit
ZnCl ₂	: Çinko klorür
Na ₂ CO ₃	: Sodyum karbonat
ZnCO ₃	: Çinko karbonat
CH ₄	: Metan
C ₃ H ₈	: Propan
H ₂	: Hidrojen
CO	: Karbon monoksit
CO ₂	: Karbon dioksit
H ₂ S	: Hidrojen sülfür
NaCl	: Sodyum klorür
TiO ₂	: Titanyum dioksit
Au	: Altın
Pt	: Platin
Ag	: Gümüş
Pd	: Paladyum
Fe	: Demir
Ru	: Rubidyum
TMA	: Trimetilamin
DMA	: Dimetilamin
HMDS	: Heksametildisilazan
MEMS	: Mikro Elektrik Mekanik Sistemler
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
PECVD	: Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme
RIE	: Reaktif iyon aşındırma

ICP-PECVD	: İndüksiyon eşlemeli plazma destekli kimyasal buhar biriktirme
ICP-RIE	: İndüksiyon eşlemeli plazma ile reaktif iyon aşındırma
RIE	: Reaktif iyon aşındırma
HOMO	: En Yüksek Dolu moleküler Orbital
LUMO	: En Düşük Dolu Olmayan Moleküler Orbital
MCP	: Mekanik Kimyasal İşleme
PVS	: Fiziksel Buhar Sentezi
DC	: Doğru akım
RF	: Radyo frekansı
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscope)
TEM	: Geçirimli Elektron Mikroskobu (Transmission Electron Microscope)
EDS	: Enerji Dağılım Spektroskopisi
XRD	: X-Işını Kırınım yöntemi
GC	: Gaz kromatografisi
MS	: Kütle spektrometresi
FT-IR	: Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
Ψ	: Genlik oranı
Δ	: Faz farkı
θ_t	: Malzemenin içine giren ışık açısı
θ_i	: Gelen ışının normal ile yapmış olduğu açı
θ_r	: Yansıyan ışının normal ile yapmış olduğu açı
Q_s	: Yüzey yükünü
N_D	: İyonize donör sayısı
K	: Dielektrik sabiti
ϵ_0	: Uzayın geçirgenliğini
$\Delta\phi_s$	: Potansiyel bariyerin büyüklüğü
LVDT	: Lineer Değişken Diferansiyel Transformatör
UV	: Ultraviole
RCA	: Amerikan radyo şirketi (Radio Corporation Of America)
GDS	: Grafi data sistem formatı (Graphic Data System)
DXF	: Çizim vektör dosya formatı (Drawing Exchange Format)

1. GİRİŞ

1.1. Giriş

1953 yılında Germanyum kullanarak yapılan bir çalışmada ilk defa bir yarı iletkenin gaza duyarlı olduğu gösterilmiştir (Brattain, 1953). 1954'te ise Heiland oksijenin ve benzeri diğer gazların basınçlarındaki değişimin çinko oksidin (ZnO) yarıiletken özelliklere etki ederek, değiştirebildiğini ortaya koymuştur (Heiland, 1954). Benzer şekilde 1962'de Seiyama ve arkadaşları çinko oksit (ZnO) ince filmle üzerinde, malzemelerin yüzeyine etki eden gaz moleküllerinin ince filmin elektriksel direncini etkilediği göstermişlerdir (Seiyama, Kato, Fujiishi, & Nagatani, 1962). Benzer çalışmalar kalay oksit (SnO₂) gibi farklı oksit bileşenler ile de yapılmış ve aynı şekilde gaz etkileşimi sonrasında malzemelerin direnç değişimleri gözlemlenmiştir (Yamauchi, 1992).

Metal oksit gaz sensörleri, sanayide toksik gazların denetlenmesi, açık ve kapalı ortamlardaki hava kalitesinin tespiti, tarım için zararlı kimyasalların tespiti gibi uygulamalarda ve çeşitli evsel kullanım alanlarında kullanılabilecek, eski tip pahalı gaz sensörlerine, daha uygun maliyetli bir alternatif oluşturmaktadırlar. (Nikolic, Milovanovic, Vasiljevic, & Stamenkovic, 2020). Gaz sensörleri ilk olarak tüp tipi sensörlerle kırk yıl önce piyasaya çıkışından sonra, önce ekran baskı tekniğiyle, son olarak da günümüzde mikro üretim teknikleri kullanılarak yapılan mikro elektromekanik sistemlerle (MEMS) geliştirilmeye devam etmektedirler (Chowdhury & Bhowmik, 2021). Özellikle mikroelettronik devre üretimlerinde kullanılan üretim tekniklerinin MEMS uygulamaları için geliştirilmesi sayesinde çok sayıda ve birim maliyeti çok düşük olarak seri şekilde üretilebilen metal oksit sensörlerin üretimi mümkün olmuştur. Silisyum fabrikasyon teknolojisi kullanımı düşük üretim maliyeti avantajı getirmesinin yanında, mikro fabrikasyon tekniklerinin gelişimi bütünleşmiş devre ile üretilebilen sensörlerin, boyutlarının küçülmesine ve önceki nesillere göre çok daha az enerji ile çalışabilen sensörlerin taşınabilir cihazlarda kullanılabilmesini de mümkün hale getirmiştir. (Eranna, Joshi, Runthala, & Gupta, 2004).

Bu tez çalışmasında gaz sensörü uygulaması için kullanılabilecek ZnO metal oksit ince filmlerin silisyum mikro fabrikasyon yöntemleri ile üretimi, karakterizasyonu ve farklı tip ve boyutlarda mikro elektrot bağlantılıları ile kullanıldıklarında sergiledikleri performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Üretim basamaklarında fotolitografi, plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD), elektron demeti kullanarak

buharlaştırma (e-beam evaporation), saçtırma (sputter), indüksiyon eşlemeli plazma ile reaktif iyon aşındırma (ICP-RIE) gibi mikro üretim teknikleri kullanılmıştır. Üretim esnasında malzeme karakterizasyonunda elipsometre, SEM, EDS, XRD gibi analiz teknikleri kullanılmıştır.

1.2. Çinko Oksit

Çinkonun atom numarası 30'dur ve elektronik yapısı ise $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 3d^{10}, 4s^2$ dir. Dış kabuk elektronları tamamen dolu olan 3d ve 4s orbitallerindedir. Oksijenin atom ağırlığı ise 8 ve elektronik yapısı $1s^2, 2s^2, 2p^4$ tür. Oksijendeki dış kabuk elektronları 2s ve 2p orbitalleridir. Çinko oksitte, en yüksek dolu moleküler orbital (HOMO) valans bandı d orbitallerinden oluşur. İletim bandı veya en düşük dolu olmayan moleküler orbital (LUMO) yalnızca s ve p orbitallerinden oluşur. HOMO ve LUMO'nun ("farklı parite") doğasına bağlı olarak uyarılmış elektronun valans banda dönüşü yavaşlamaktadır. Dolayısıyla uyarılmış elektron durumu daha uzun süreceğinden dolayı korunarak sıralı reaksiyonun başlamasında etkilidir.

ZnO nanoparçacıklarının ticari olarak üretimleri şu anda iki ana yöntemle elde edilmektedir. İlki mekanik kimyasal işleme yöntemi (MCP), bir diğeri ise fiziksel buhar sentezi (PVS) metodudur (Casey, 2006). Ancak diğer çalışmalarda ise kimyasal reaksiyonlar gibi farklı öncüler ve sentez yöntemleri olarak çökeltme, termal ayrışma ve hidrotermal sentez yöntemleri de kullanılmıştır.

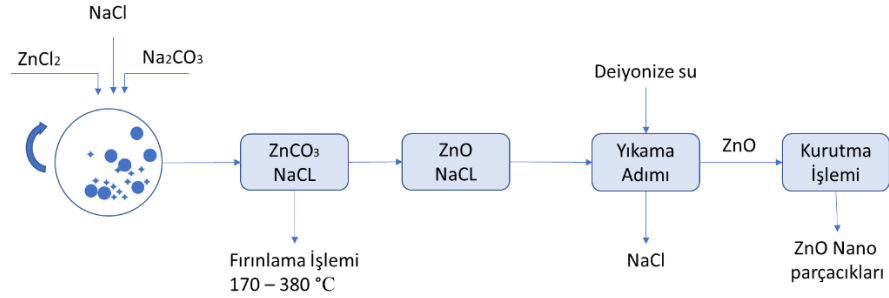
Mekanik Kimyasal işleme;

Bu metot kullanılarak birçok farklı yapıda nanoparçacıklar üretmek mümkündür. Bunlara örnek olarak ZnS, CdS, ZnO, SiO₂ ve CeO₂ verile bilinir (Aghababazadeh, Mazinani, Mirhabibi, & Tamizifar, 2006). Bu yöntem fiziksel boyut küçültme işlemi yanı sıra kimyasal reaksiyon yöntemini aynı anda barındıran bir yöntemdir (Şekil 1.1). Bu yöntem ile ZnO üretim sürecinde öncü materyaller çinko klorür (ZnCl₂) ve sodyum karbonat (Na₂CO₃) dır. Bu ile malzemelere ek olarak sodyum klorür NaCl ile, öğütücü olarak adlandırılan kap içerisinde birbirlerine çarparak öğütülür. Bu esnada gerçekleşen kimyasal reaksiyon sonrasında ZnCO₃ ve NaCl ürün olarak ortaya çıkar.



Elde Edilen ZnCO₃ ve NaCl materyalleri ısı iyileştirmesi adımı ile 170-380 °C de fırınlanarak, ısınan ZnCO₃ partikülleri ayrışır ve ZnO partikülleri meydana gelir. Daha sonrasında ZnO ve NaCl partikülleri deiyonize su ile yıkanarak ortamdan NaCl

uzaklaştırılır. Kurutma işlemi sonrasında ZnO nano partikülleri elde edilmiş olunur (Casey, 2006).

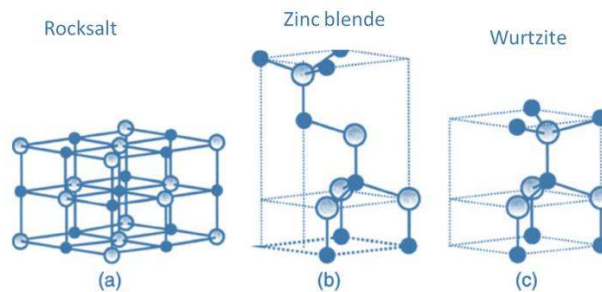


Şekil 1.1. Mekanik kimyasal işleme yolu ile ZnO nano parçacık üretim şeması

Fiziksel Buhar Sentezleme metodu;

Fiziksel Buhar Sentezleme işleminde, plazma ark enerjisi bir katıya uygulanır. Yüksek sıcaklıkta buhar üretmek için öncü plazma arkı, indüklemek için gereken enerjiyi sağlar. Aşırı doygunluğa ve parçacık çekirdeklenmesine yol açan reaksiyonlar sonucunda tamamen atomlarına ayrılan materyaller reaksiyona girebilir hale gelir ve oluşan reaksiyon sonrasında ise malzemeler üretilmiş olunur. Nano parçacıklar haline getirmek için ise aniden soğutulularak katı formuna geri döndürülürler (Swihart, 2003).

ZnO üç farklı kristal yapı şeklinde bulunabilmektedir. Bunlar: Wurtzite, zinc blende and rocksalt kristal yapı şeklindedir (Şekil 1.2). Normal ortam koşulları altında, termodinamik açıdan en kararlı faz Wurtzie kristal yapısıdır. Wurtzie kristal yapısında her çinko atomu dört oksijen atomu ile tetrahedral koordinasyon göstermektedir. Bu tetrahedral kordinasyon tipik olarak s p3 kovalent bağ doğasına özgüdür, ancak bu materyaller önemli bir iyonik karaktere sahip olduklarından dolayı, standart kovalent bağdan farklı olarak daha yüksek enerji aralığına sahiptirler.



Şekil 1.2. Çinko oksit kristal yapıları

Bu üç kristal formunda da ZnO yarıiletken materyali direkt geçişli bant aralığı enerjisi $\sim 3.3\text{eV}$ dur (Schmidt-Mende & MacManus-Driscoll, 2007).

Çinko oksit (ZnO), büyük bağlama enerjisine (60eV) sahip geniş bant aralığı (3.37eV) bir yarı iletken olduğundan dolayı güneş pilleri, katı hal optoelektronik cihazlar vb. uygulamalar için son derece önemli bir malzemedir (Leschkies, ve diğerleri, 2007). En eski keşfedilen ve en yaygın olarak uygulanan gaz algılama malzemelerinden biri olan ZnO gaz algılama özelliklerinin iyi olması, iletken elektronların yüksek hareketliliğinden, iyi kimyasal ve termal kararlılığa sahip olması, düşük maliyetinden dolayı metal oksit gaz sensörleri içerisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. ZnO gaz sensörleri, birçok avantajı olduğu için, iç ve dış mekanlarda olduğu gibi yanıcı gazların (CH_4 , C_3H_8 , H_2 , vb.) ve zehirli gazların (CO , H_2S , vb.) tespiti için yaygın olarak kullanılmaktadır (Nikolic, Milovanovic, Vasiljevic, & Stamenkovic, 2020).

1.3. Amaç

Bu çalışmanın amacı, Çinko Oksit tabanlı gaz sensörü üretiminde, çinko oksit ince filminin bütün yüzey boyunca kalınlık ve partiküllerinin homojen dağılımını sağlamak için saçtırma yöntemi kullanılarak ince film kaplaması gerçekleştirilecektir. Oluşturulan ince filmler XRD ve SEM analizleri ile özellikleri incelenecektir. Oluşturulacak olan gaz sensörü mikrofabrikasyon yöntemleri kullanılarak üretilecek olup, daha düşük alanda daha fazla verim elde etme amacıyla, gaz sensörünün elektrod kalınlıkları ve aralarındaki mesafeler değiştirilerek oluşturulacak farklı elektrot geometrileri ile gaz sensörünün aynı koşullar altındaki tepkisi elektriksel olarak incelenecektir.

2. TEMEL BİLGİLER

2.1. Gaz Sensörü ve Metal Oksit Yarıiletken Tabanlı Gaz Sensörleri

Gaz sensörleri, bir gaz ya da gaz bileşiğinin düşük konsantrasyondaki örneğinin kimyasal bilgisini harici bir algılayıcı tarafından kullanılabilecek bir sinyale dönüştüren kimyasal sensörlerdir. Bahsi geçen kimyasal bilgiler, gerçekleşen bir reaksiyon sonucundan elde edilebileceği gibi, sensörün fiziksel bir özelliğinin değişmesi sonucunda da elde edilebilir (Bochenkov & Sergeev, 2010). Gelişen teknoloji ile hayatımızın birçok alanında ihtiyaç duyduğumuz gaz sensörleri; tıbbi tanı, gıdaların işlenmesi ve taşınması, açık ve kapalı alanlardaki hava kirliliğinin takibi, tehlikeli gazların kontrolü gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tip uygulamalar için geliştirilen sensörlerin hassas ölçümleri tekrarlanabilen şekilde hızlıca sonuç verebilen ve aynı zamanda üretim maliyetinin düşük seviyede olması istenmektedir. Endüstriyel uygulamalarda uzun zaman boyunca yüksek algılama kapasiteleri ve hızlı yanıt süreleri sayesinde gaz kromatografisi/kütle spektrometresi (GC/MS) ve fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) gibi gaz algılama sistemleri kullanılmıştır (Miekisch, Schubert, & Noeldge-Schomburg, 2004). Ancak bu yöntemleri kullanan cihazlar taşınabilir olmayan, pahalı, yüksek sıcaklık ortamlarında kullanımları mümkün olmayan, gaz örnekleme gibi ön işlemler ve periyodik bakım ihtiyaçları olan sistemlerdir. Tüm bu dezavantajlar sebebiyle son dönemde yüksek mobilite sunan, daha geniş bir sıcaklık bandında ölçüm alabilen, yüksek hassasiyette ve seçicilikte, hızlı yanıt ve toparlanma süresi (recovery time) sunan gaz sensörlerin geliştirilmesi için birçok çalışma yapılmıştır (Nasiri & Clarke, 2019). Mevcut gaz sensör teknolojileri arasından, yarıiletken metal oksit tabanlı rezistif gaz sensörleri özellikle tehlikeli yanıcı, patlayıcı gazların algılanması gereken uygulamalarda öne çıkmaktadırlar (Dey, 2018).

Gaz sensörleri çalışma ilkeleri baz alındığında fiziksel ya da kimyasal gaz sensörleri olarak sınıflandırılabilirler.

2.1.1. Fiziksel sensörler

Fiziksel sensörlerde algılayıcı üzerinde kimyasal bir reaksiyon meydana gelmemektedir. Sensörden elde edilen sinyal sıcaklık, iletkenlik, kütle, kırılma indisi veya absorbans gibi malzemenin bazı fiziksel özelliklerinin değişimi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Ancak her koşulda bir sensörü fiziksel sensör ya da kimyasal sensör olarak kategorize etmek mümkün olmayabilir. Fiziksel yapıdaki bir gaz sensörünün oluşturduğu

sinyaller, etkileşim halindeki gazların kimyasal karakteri sonucunda algılanan gaz tutunumunun (chemisorption) bir ürünüdür (Bochenkov & Sergeev, 2010).

2.1.2. Kimyasal sensörler

Kimyasal sensörler ise, ölçülmek istenen örnek molekülleri ve reseptörlerin etkileşimi sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonların sonucunu algılayan cihazlardır. Kimyasal sensörler, aktif malzemenin cinsine göre inorganik, polimerik ya da metal oksit olarak sınıflandırılabilir. Üretim tekniğine göre ya da kullanım alanlarına göre farklı sınıflandırılmalarda önerilmektedir (Bochenkov & Sergeev, 2010).

2.1.3. Biyokimyasal sensörler

Biyokimyasal sensörler, kimyasal sensörlerin alt kategorisi olarak da adlandırılmaktadır. Biyokimyasal sensörlerde meydana gelen reaksiyonlar biyokimyasaldır (Göpel, Jones, Kleitz, Lundstrom, & Seiyama, 1991).

2.2. Gaz Sensörü Performansını Belirlenmesi

Sensör performansını karşılaştırabilmek adına literatürde belli başlı parametreler tanımlanmıştır. En sık kullanılan parametreler duyarlılık, seçicilik, kararlılık, toparlanma zamanı, yanıt zamanı ve toparlanma zamanıdır (Kim, Rothschild, & Tuller, 2013).

Duyarlılık: Örnek konsantrasyonunun değişimine karşılık, elde edilen sinyalde meydana gelen değişimdir.

Seçicilik: Sensörün analiz edilecek örnek içerisinde tek bir ya da belirli bir grup gaz için sinyal oluşturabilme özelliğidir.

Kararlılık: Sensörün belli bir süre içerisinde aynı şartlarda yapılan ölçümlerde edilebilir sinyaller üretebilme kabiliyetidir.

Yanıt zamanı: Sıfır konsantrasyondan, örnek gazın herhangi bir konsantrasyonuna maruz kaldığında sinyal üretebilme süresidir.

Toparlanma zamanı: Örnek gazın herhangi bir konsantrasyondan sıfıra inmesi sonrasında, sensörün boş hali için ilk başta ürettiği sinyale geri dönme süresidir.

Bu ana parametreler içerisinde halen en önemli iki parametre duyarlılık ve seçicilik olarak öne çıkmaktadır. Literatürdeki birçok çalışma daha yüksek hassasiyette ve daha iyi seçiciliğe sahip sensörler için kullanılabilecek aktif malzemeler üzerine yoğunlaşmıştır (Bochenkov & Sergeev, 2010). Aktif malzemenin türü, kristal yapısı, morfolojisi, gibi yapısal özellikler sensör performansını direk olarak etkilemektedir. Gaz sensörlerinde aktif malzeme olarak metal oksit yarıiletkenler veya iletken polimerler kullanılabilmektedir (Nikolic, Milovanovic, Vasiljevic, & Stamenkovic, 2020).

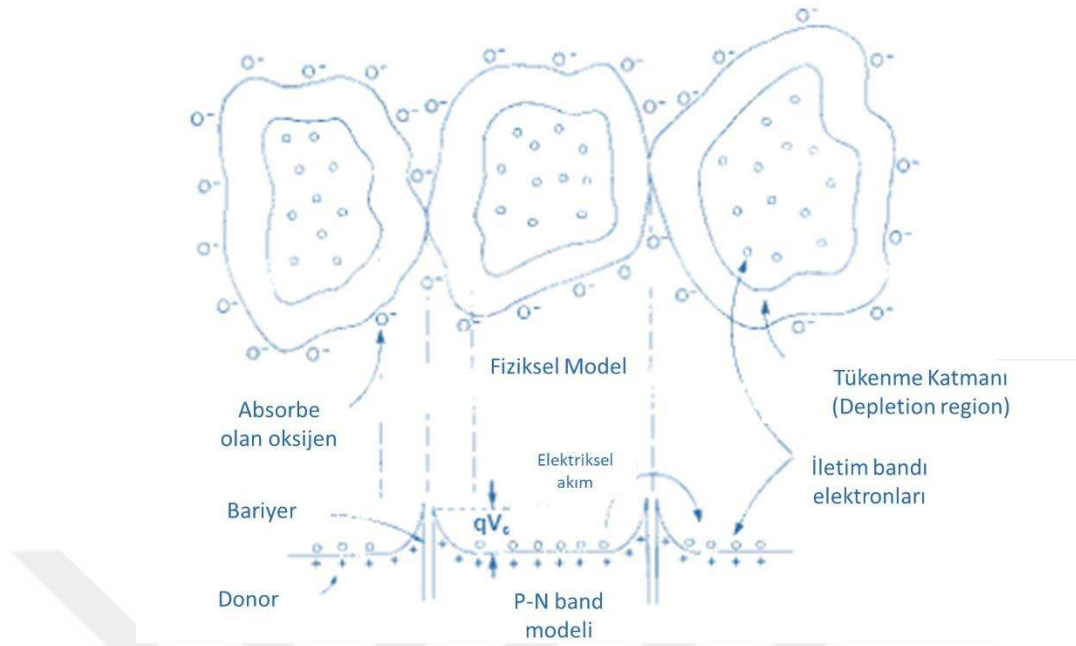
Elektrik direnci ölçümü ilkesiyle çalışan metal oksit yarıiletken gaz sensörleri geniş bir kullanım alanına sahip olup üzerinde en çok araştırma yapılan sensör tiplerinin başında gelmektedirler. Bu tip sensörlerde metal oksit yüzeyindeki oksijen ile incelenecek gaz arasında meydana gelen kimyasal tepki sonucunda metal oksit yarıiletken tipine (n ya da p tipi) ve örnek gazın bağ sonrası indirgeyici ya da yükseltgen oluşuna bağlı olarak malzemenin direncinde artış ya da azalma meydana getirir. Metal oksitler, yüksek dielektrik sabitleri, geniş bant aralıklarına ve farklı optik sabitleri gibi elektriksel özellikleri sebebiyle oldukça aktif bir araştırma alanı oluşturmaktadırlar (Ji, Zeng, & Li, 2019). Bu elektriksel özelliklerine ek olarak küçültülebilir tane boyutları, çeşitli yüzey morfolojileri ve yüksek yapısal kararlılıkları sayesinde metal oksitleri gaz sensör uygulamaları için de kullanışlı kılmaktadır (Korotcenkov & Cho, Metal oxide composites in conductometric gas sensors: Achievements and challenges, 2017). Metal oksitlerin kimyasal duyarlılığından faydalanılarak yapılmış sensörler ticari olarak hali hazırda kullanımdadır. Özellikle ZnO, TiO₂ gibi geçiş metal oksitleri enerji depolama çözümleri, kimyasal ve biyolojik sensörler, optik cihazlar ve çeşitli elektronik devre elemanları gibi birçok uygulamada kullanılır (Chavali & Nikolova, 2019).

2.3. Metal Oksit Gaz Sensörlerinin Temel Çalışma Prensibi

Gaz sensörlerinde kullanılan ZnO, SnO₂ gibi metal oksit yarıiletkenlerin örnek gaz ile temasında elektriksel direncinde oluşan değişim gazın malzeme yüzeyine tutunum/salınım mekanizmasına dayanır ve yüzey veya tane sınırı (grain boundary) iletkenliğine bağlıdır (Min, 2003). Metal oksit yarıiletken sensörlerin malzeme yüzeyinde gerçekleşen oksijen tutunumu sonucunda oluşan potansiyel bariyerden olayı elektriksel direnci yüksektir. Kıtık bölgesi derinliği şu denklem ile ifade edilebilir (Moseley & Tofield, Solid State Gas Sensors, (Adam Hilger Series on Sensors), 1987).

$$W = \frac{Q_s}{e \cdot N_D} = \left(\frac{2 \cdot K \cdot \varepsilon \cdot \Delta\phi_s}{e \cdot N_D} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Burada, Q_s yüzey yükünü, N_D iyonize donör sayısını, K malzemenin dielektrik sabitini, ε₀ uzayın geçirgenliğini ve Δφ_s yüzeydeki potansiyel bariyerin büyüklüğünü göstermektedir. Ortalama değerler kullanıldığında kıtlık bölgesi derinliği 1-100 nm arasında oluşmaktadır.



Şekil 2.1. Oksijen gazı tutunumu ile metal oksit yarıiletkende tükenme bölgesi ve taneler arası kontak direncinin oluşumu (Madou & Morrison, 1989).

Şekil 2.1’de metal oksit yarıiletken taneleri ve aralarındaki temas noktaları gösterilmektedir. Elektron transferi sebebiyle temas noktalarında oluşan kıtlık bölgesi malzemenin bulk(hacim) kısmına göre daha düşük iletkenlik gösterecektir. Altta bant modelinde tane arası temas noktalarında oluşan potansiyel bariyer gösterilmektedir. Kıtlık bölgesi derinliğinin tane büyüklüğüne oranı metal oksit yarıiletkenin elektriksel direncini dolayısıyla da gaz algılama performansını belirlemektedir. Kıtlık bölgesi derinliği tane boyutunun yarısına ulaşacak olursa tane direnci malzemenin genel direnç davranışını arttıracığından sensörün duyarlılığı da artacaktır. Bu sebeple tane boyutu küçüldükçe duyarlılık artar (Çiftyürek, Sabolsky, & Sabolsky, 2016) (Bochenkov & Sergeev, 2010).

2.3.1. Metal oksit sensörlerin duyarlılığını etkileyen faktörler

Gaz sensörü tasarımındaki esas amaç en az miktarda hedef gaz ile sinyal üretebilecek en yüksek duyarlılığa sahip algılayıcı elde etmektir. Metal oksit yarıiletken malzemeleri kullanan sensörlerin duyarlılığını arttırabilmek için, tane boyutunu küçültmek, farklı metal ya da başka malzemelerle katkılamak veya reaksiyona girecek yüzey alanını arttırmak gibi yöntemler uygulanabilir.

2.3.1.1. Tane boyutu

Metal oksit yarıiletken kullanan sensörlerinin duyarlılığını arttırabilmek için en iyi yöntemlerin başında malzemenin tane boyutunun nano ölçeğe küçültülmesi gelmektedir

(Miller, Akbar, & Morris, 2014). Nano düzeydeki taneler çok daha geniş bir yüzey alanı oluşturarak örnek gazın tutunabileceği alanı arttırmakta dolayısıyla da sensörün duyarlılığını yükseltmektedir. Ayrıca tane yüzeyinde oluşan kıtlık bölgesi derinliğinin tane boyutuna oranı arttıkça malzemenin direnci dolayısıyla da duyarlılığı büyük oranda yükselecektir (Sun, ve diğerleri, 2012).

2.3.1.2. Katkılama

Metal oksit yarıiletken gaz sensörlerinde kullanılan ZnO, TiO₂ gibi aktif malzemelerin katalitik aktiviteleri nispeten düşük olduğundan, malzeme içerisine eklenecek altın (Au), platin (Pt), gümüş (Ag) gibi katalitik aktivitesi yüksek soy metaller ile sensörün duyarlılığı artırılabilir bileneceği gibi farklı hedef gazlarla olan duyarlılığı da geliştirilir (Wang, Yin, Zhang, Xiang, & Gao, 2010). Metal oksit yarıiletkenleri katkılamak için sol-gel metodu, nanoparçacık karışımları elde etme ya da saıtırma veya evaporasyon ile yüzey modifikasyonu gibi farklı metotlar kullanılabilir. ZnO materyali farklı malzemelerle katkılaması ile duyarlılık değışimin yanı sıra, farklı tip gazları algılaması da sağlanabilir. Alüminyum katkısı ile hidrojen, TMA, DMA ve amonyak gazlarını algılayabildiği (Nanto, Sokoosh, & Usuda, 1993) (Nanto, Minami, & Takata, 1986). Paladyum (Pd), demir (Fe), rubidyum (Ru) katkıladığında ise amonyak gazına karşı algılaması belirlenmiştir (Rao & Rao, 1999).

2.3.1.3. Sıcaklık

Çalışma sıcaklığı metal oksit yarıiletken gaz sensörleri için oldukça önemli bir parametredir. Aynı koşullarda sensörün sinyali sıcaklık ile önce artar daha sonra maksimum noktaya ulaştıktan sonra hızla düşer (Nikolic, Milovanovic, Vasiljevic, & Stamenkovic, 2020). Düşük sıcaklıklarda ölçülmek istenen gazın moleküllerinin malzeme ile etkileşime girebilmek için yeterli enerjisinin olmayışı sebebiyle sinyal seviyesi düşük olacaktır. Yüksek sıcaklıklarda ise sensörün sinyali gaz moleküllerinin artan difüzyon hızı ile düşecektir. Optimum sıcaklık değeriinde bu iki mekanizma dengelenerek maksimum sensör sinyali elde edilecektir (Shinde, Gujar, & Lokhande, 2007).

2.3.1.4. Film kalınlığı etkisi

Metal oksit yarıiletken gaz sensörlerinde malzemenin film kalınlığı doğrudan yüzey morfolojisini ve ısı kapasiteyi değıştireceğinden sensör performansını doğrudan etkilemektedir (Korotcenkov & Cho, Metal oxide composites in conductometric gas sensors: Achievements and challenges, 2017). Film kalınlığının düşmesi sensörün daha

hızlı ısı dengeye ulaşmasını sağlayarak sensörün tepki süresini kısaltacaktır. Düşük çalışma sıcaklıklarında ise kalın filmler daha yüksek hassasiyet sağlamaktadırlar.

2.4. Mikro Yapılandırılmış Metal Oksit Gaz Sensörleri

Mevcut üretim teknikleri ile yapılan gaz sensörleri ile karşılaştırıldığında, mikro üretim yöntemleri ile yapılacak metal oksit yarıiletken gaz sensörleri çok daha düşük enerji tüketimi, daha düşük tepki süreleri ve daha yüksek hassasiyet sunmaktadırlar. Yarım asırdır geliştirilen mikroelektronik üretim tekniklerinin sensör ve benzeri Mikro Elektrik Mekanik Sistemler (MEMS) uygulamalarına uyarlanması ile mikron ve nanometre boyutlarında yapıların elde edilebilmesi sayesinde, makro tasarımlarda karşımıza çıkan büyük kütleli ve ısı kapasiteli malzemeler yerine çok daha düşük enerji gerektiren çok hızlı sensörler üretilebilmektedir. Taşınabilir boyutlarda ve günlük kullanılan cihazlara entegre edilebilecek sensörlerin üretilebilmesi de aynı üretim yöntemleri sayesinde mümkün olmaktadır. Maskeli ve maskesiz litografi teknikleri sayesinde esnek tasarım olanağı sunulmakta ve yüksek yoğunluklu çipler seri olarak üretilebilmektedir (Manginell, Smith, & Ricco, 1997).

3. MİKRO FABRİKASYON TEKNİKLERİ

Mikro fabrikasyon üretim teknikleri mikro boyutta fiziksel nesneler ve yapılar oluşturmak için geliştirilmiş yöntemlerdir. İlk örnekleri tümleşik devreler üzerinde geliştirildiğinden ötürü, yarıiletken üretim teknikleri olarak da adlandırılmaktadır. 30 yılı aşkın süredir bilimsel ve ticari olarak üretilmiş mikrofabrikasyon cihazları piyasada bulunmaktadır. Mikro-fabrikasyon üretim süreçlerinde birbirini tekrar eden döngüler yer alır ve bu döngüleri; kaplama (Deposition), desenleme (Patterning), katkılama(Dopping) ve aşındırma (Etching) olarak belirtile bilinir (Hierlemann, Brand, Hagleitner, & Baltes, 2003). Mikrofabrikasyon üretiminde, geleneksel yollar (mekanik işleme) mikron boyutlarına inildiğinde yetersiz kaldığından dolayı, patern oluşturmak için ışıktan faydalanılmaktadır. Mikrofabrikasyon Genellikle 365nm ve 405nm dalgaboyuna sahip ışık kaynakları ve bu dalgaboyuna duyarlı reçineler ile gerçekleştirilirler. Desenleme işlemi için istenilen bölgeleri geçirgen, diğer bölgeleri ise geçirgen olmayan maskelerden faydalanılmaktadır. Son yıllarda ise maskesiz desenleme yöntemleri daha yaygın hale gelmişlerdir. Maskesiz desenlemede ise UV lazer kullanılarak, lazer demetinin istenilen bölgelere odaklanması ise maskeye ihtiyaç duymadan desenleme yapmak mümkün hale gelmiştir. Mikro fabrikasyon ile üretim ise sıcaklık, nem, ve parçacık kontrolü süreli yapılan Temiz Oda (Cleanroom) laboratuvarlarında gerçekleştirilmektedir.

3.1. İnce Film Kaplama

3.1.1. Plazma-destekli kimyasal buhar biriktirme

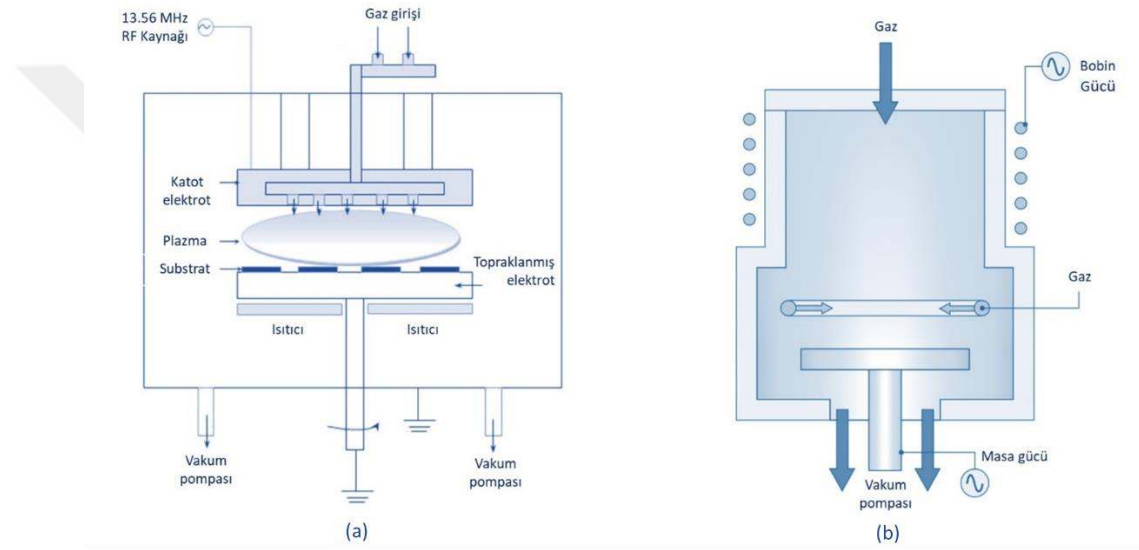
Geleneksel kimyasal buhar biriktirme (Chemical Vapor Deposition) CVD tekniklerinde gazların ayrışıp tepkimelere girmeleri için substrat sıcaklıklarının çok yüksek seviyelere çıkması gerekmektedir. Maddenin dördüncü hali olarak da bilinen plazma için gaz halindeki maddeye enerji verilmesi sonucunda açığa çıkar. Elektronlar, pozitif yüklü iyonlar ve atomlar ile moleküller gibi nötrler içerir.

Doğada yüksek sıcaklıklar ya da yüksek enerji radyasyonu ile açığa çıkan plazma hali laboratuvar ortamlarında ise yüksek elektriksel alanlar ile elde edilmektedir. Geleneksel CVD’de yüksek sıcaklıklar ve termal enerji aracılığıyla gazlar bozunurken plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD) yönteminde elektron çarpışmaları sayesinde bu bozunmaya daha düşük sıcaklıklarda ulaşılabilir.

Plazma için DC ve AC kaynaklar kullanılabilir de günümüzde en yaygın teknoloji Kapasitif RF kuplajı kullanılmaktadır. Şekil 3.1(a)’da görülebileceği üzere reaktörde iki paralel plaka elektrot bulunur. Kaplama yapılmak istenilen örnek topraklanmış elektrot

üzerine yerleştirilir. Diğer elektrot ise en yaygın olarak 13.56 MHz'lık bir RF kaynağa bağlıdır. Elektrotlar arası gazla doldurulur. Elektromanyetik enerji sayesinde elektron kopmaları ile gaz iyonlaşır. Buradaki çarpışmaların da etkisiyle ortaya çıkan radikaller substrat yüzeyinde tepkimelerle bir film haline gelir. Reaksiyonlar sonucu açığa çıkan istenmeyen ürünler reaktör dışına pompalanır.

Bu çalışmada SENTECH marka SI 500D model ICP-PECVD cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yukarıda bahsedilen kapasitif RF kuplajının yanı sıra bu cihazda ek olarak indüksiyonla birleşmiş plazma kullanılmaktadır. Kapasitif metottun yanı sıra plazma oluşturmak için bir bobin ve elektromanyetik indüksiyon kullanılır (Şekil 3.1(b)).

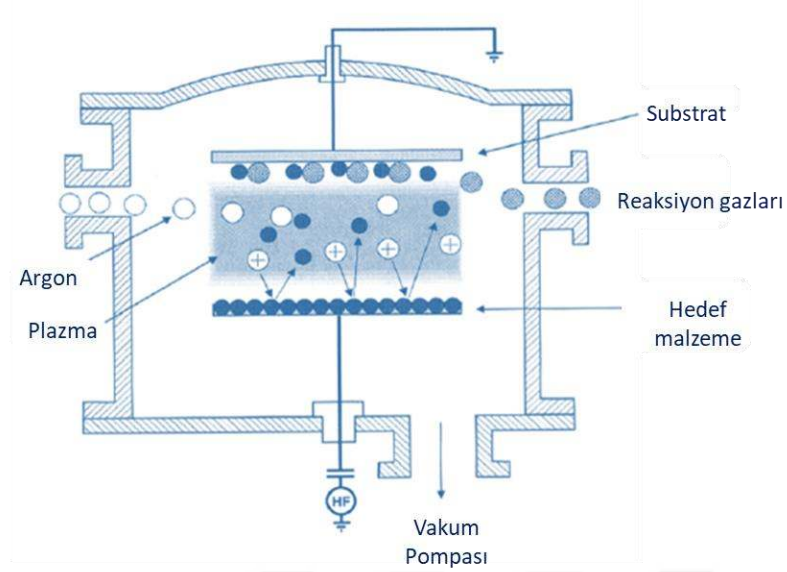


Şekil 3.1. (a) PECVD ve (b) ICP-PECVD şematik gösterimi

3.1.2. Saçırma (Sputtering) yöntemi

Kaplayıcı malzemenin iyonlarla bombardıman edilmesi sonucu koparılan atomların numune yüzeyinde film tabakası oluşturmaya dayanan tekniktir. Şekil Saçırma biriktirme tekniğinde haznede bir DC ya da RF kaynaklar kullanılıp bir plazma yaratılarak elde edilen soy gaz iyonları (genellikle pozitif argon iyonları) negatif potansiyelde olan kaplayıcı malzemenin yüzeyine çarptırılır. Bu sayede kaplayıcı malzemenin yüzeyinden atomlar saçılır. Saçılan atomlar anottaki substratın üzerinde birikerek bir film oluşturur.

Bu çalışmada Kurt J. Lesker marka PVD 75 model magnetron saçırma sistemi kullanılmıştır. Bu teknolojiye yüksek mıknatıslar kullanılarak plazmada açığa çıkan elektronlar kaplayıcı hedef malzemenin etrafında belirli yörüngelerde toplanılır. Bu hem kaplanmak istenilen numuneyi olası çarpışmalardan korur hem de hedef malzemenin etrafındaki plazma yoğunluğunu arttırmaya ve kaplama hızı arttırmaya yardımcı olur.

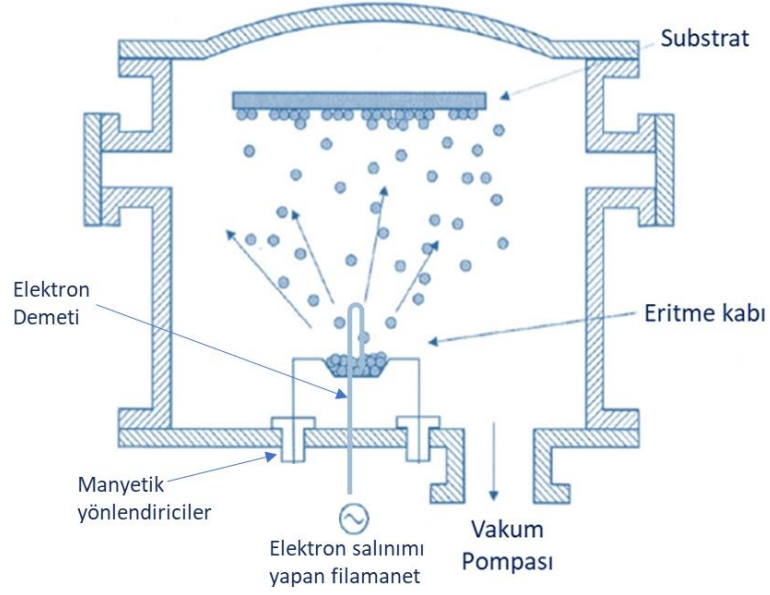


Şekil 3.2. Saçırma sistemi şematiği

3.1.3. Elektron demeti ile buharlaştırma

Termal buharlaştırmaya benzer şekilde bir elektron demetinin kaplayıcı malzemenin yüzeyindeki atomları koparmasıyla ve bu atomların alttaş üzerinde bir film oluşturmasıyla elde edilen kaplamadır. Termal buharlaştırma ile kıyaslandığında ise; daha yüksek erime noktasına sahip olan materyalleri buharlaştırmaya imkân sağladığı gibi buharlaştırma sırasında sadece pota içerisinde bulunan malzeme lokal olarak ısıtılabilirdiğinden ötürü daha saf (kontamine olmamış) kaplamalar yapmak mümkündür.

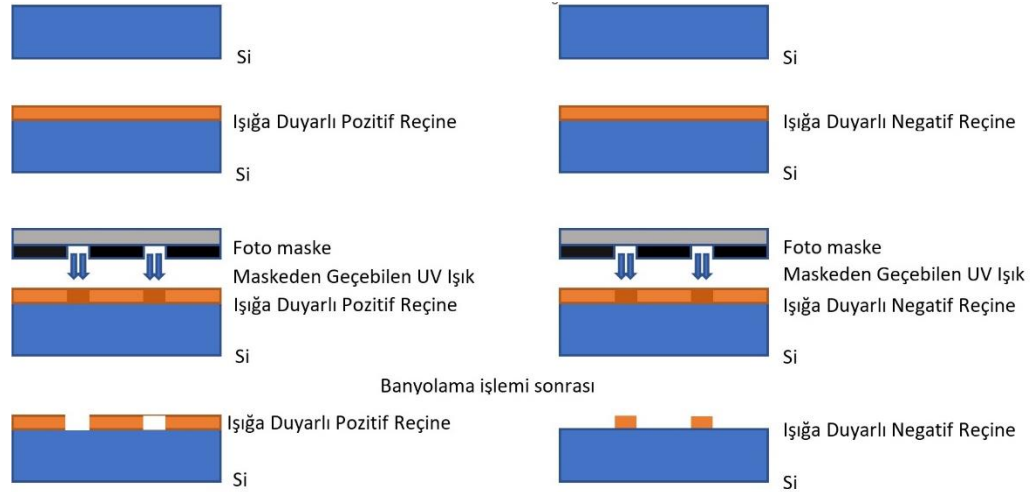
Prosesin yapılacağı hazne 10^{-5} Torr vakum seviyelerine getirilir. Genelde termoiyonik emisyonla yararlanılarak bir tungsten Flaman telin üzerinden akım geçirilerek elektronlar koparılır. Manyetik alanlar yardımıyla kaplayıcı malzemenin üzerine yönlendirilen elektron demetinin sahip olduğu kinetik enerji çarpışma ile ısı enerjisine dönüşerek kaplayıcı malzemenin bölgesel olarak erimesine sebep olur. Eritilen madde buhar basıncına bağlı olarak buharlaşır ve soğuk olan hazne duvarları ile alttaş üzerinde yoğunlaşarak ince bir film oluşturur. Şekil 3.3’de elektron demeti ile buharlaştırma sisteminin şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 3.3. Elektron demeti buharlaştırma sistemi şematiği

3.2. Fotolitografi

Litografi sözcüğü Yunancada taş baskı anlamına gelmektedir. Bu teknik ile kireç taşı üzerine yağlı mürekkeple oluşturulan geometrik çizim hedef yüzeye aktarılmış olur. Yüzyıllar sonra sanatsal amaçlar için kullanılan bu teknik geliştirilerek Fotolitografi adı ile ilk kez elektronik parça üretiminde kullanılmıştır. Yarıiletken endüstrisinin ve MEMS üretiminin temelindeki proses ince filmleri belirli yapılar haline getirmekte kullanılan fotolitografidir. Fotolitografideki temel amaç, genelde ultraviyole ışınlar ve bir maske kullanılarak bilgisayar ortamındaki tasarımı ışığa duyarlı fotorezist kaplı yonga plakasına aktarmaktır. Bu tasarımın fotoreziste aktarılması sayesinde bu prosesi takip edecek olan eklemeli ya da çıkarmalı prosesler ile yonga plakası üzerinde istenen yapıya ulaşılabacaktır. Birçok yapının maske aracılığıyla transferi sayesinde aynı anda birden fazla cihazın üretilmesi de mümkündür. UV Reçine; belirli dalgaboyundaki ışığa duyarlı olan organik yapıdır. Reçineler pozitif ve negatif olmak üzere ikiye ayrılırlar. Pozlama esnasında; UV ışığa maruz kalan bölgeler, UV ışığın taşıdığı enerji ile kimyasal yapısını değiştirir. Pozitif reçine ile yapılan fotolitografi işleminde pozlanan alanlar kimyasal banyolama işleminde çözünürken, negatif reçinenin kullanıldığı işlemlerde ise UV ışık gören alanlar sertleşir ve pozlanmamış alanlar kimyasal banyolama işleminde çözünmeye başlarlar, şekil 3.1 de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Pozitif ve negatif UV ışığa duyarlı reçine (Fotorezist) davranış özelliklerinin gösterimi

Fotolitografinin temel adımları aşağıdaki gibidir:

Temizlik: Kimyasal temizleme işlemi için Amerikan Radyo Şirketi'nin geliştirmiş olduğu (RCA, Radio Coporaiton Of America) prosedür, piranha çözeltisi ve aseton uygulama gibi yöntemlerle yüzeye yapışmış parçacıklardan kurtulma işlemidir. Yapıların beklendiği gibi oluşmasında yüzeyin istenmeyen parçalardan arınması çok kritik bir rol oynamaktadır.

Hazırlık: Yonga plakası ısıtılarak nemi alınır. Bu aşamada yonga plakasının yüzeyi hidrofilik olduğundan fotorezistin yüzeye yapışmasında sıkıntılar yaşanabilir. Bunu önlemek amacıyla yonga plakaları heksametildisilazan (HMDS) buharına tutulur ve daha hidrofobik bir yüzey elde edilir.

Fotorezist kaplama: HMDS buharından geçirilmiş yonga plakasının yüzeyi döndürmeli kaplama yöntemiyle fotorezist ile kaplanır. Fotorezistler ışık altındaki yapısal değişikliklerine göre pozitif ve negatif olarak ikiye ayrılır. UV ışığa maruz kalan fotorezist alanları eğer sonraki çözme (developlama) adımı kullanılarak çözücü (developer) ile yıkanabiliyorsa bu fotorezist pozitif olarak adlandırılır. Tam tersi olarak eğer UV ışığa maruz kalan alanlar dışındaki alanlardaki fotorezist çözücü ile yıkanabiliyorsa negatif fotorezist olarak adlandırılır. Pozitif fotorezistler ışık ile tetiklenen çözünürlük, negatif fotorezistler ile ışık ile tetiklenen polimerizasyona dayanır.

Ön pişirme: Kaplanan fotorezistin çözücüsünden kurtulmak amacıyla yonga tabakası belirli bir sıcaklıkta belirli bir süre boyunca ısıtılır.

Pozlama: Fotorezist kaplı yonga plakası UV ışınlarına maruz bırakılır. Pozlama süresi ve pozlama dozu gibi parametreler optimize edilir.

Banyolama (developlama): Tetrametilamonyum hidroksit gibi çözücüler kullanılarak pozitif fotorezistlerde UV ışınlarının etki ettiği alanlar negatif fotorezistlerde ise UV ışınlarının etki etmediği alanlar çözülür.

Son pişirme: Önceki adımlar sayesinde tasarım fotoreziste aktarılacak sonraki eklemeli ya da çıkarmalı proses için hazır hale gelir. Bu yapıyı daha dayanıklı hale getirebilmek için yapı yeniden belirli bir sıcaklıkta bir süre ısıtılabilir.

Eklemeli ya da çıkarmalı proses adımı: Üretimin şekil verme içeren her prosesinden önce takip edilmesi gereken yukarıdaki adımlar sonrasında yonga plakası buhar biriktirme gibi kaplama teknikleriyle eklemeli proseslere sokulabilir. Benzer şekilde malzeme kaldırmaya yönelik çıkarmalı prosesler tasarımlar ince filmlere aktarılabilir.

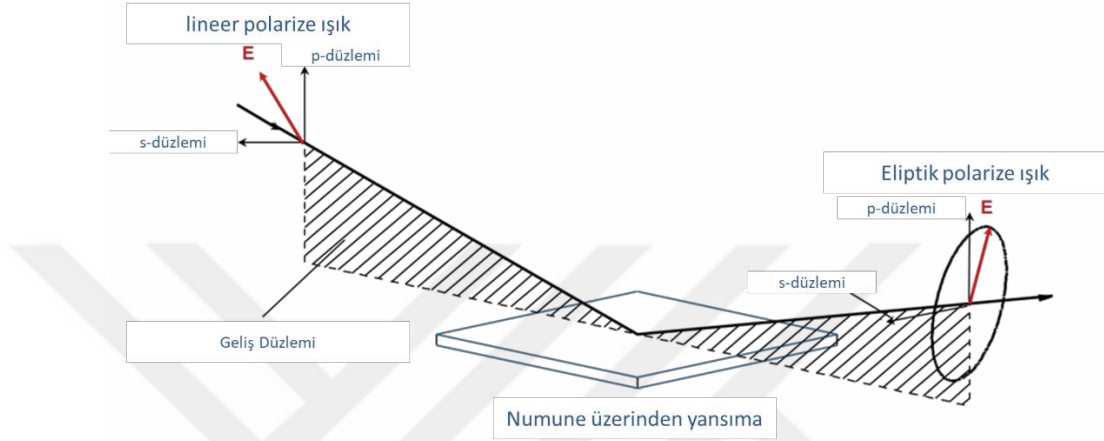
Rezist kaldırma: Ya eklemeli proses yardımıyla yeni bir malzeme katmanına istenen yapı verildikten sonra ya da çıkarmaları bir proses yardımıyla hali hazırda yonga plakasında bulunan bir malzeme katmanı belirli bir şekle sokulduktan sonra fotoreziste artık gerek kalmaz. Diğer yapılara ve malzemelere zarar vermeyecek bir çözücü yardımıyla fotorezist yonga tabakasından ayrılır.

Yukarıdaki anlatılanlar en yaygın olarak kullanılan maskeleme tekniklerine dayansa da bu tezde son zamanlarda özellikle üniversitelerin ilgisini çeken maskesiz litografi teknolojisi kullanılmıştır. Direkt lazer yazımı olarak geçen bu teknoloji mikro boyuttaki aynalar yardımıyla numunenin sadece istenen yerlerini pozlar. Bu tezde kullanılmış olan Heidelberg MLA cihazı tasarlanan maskeyi .gds ve .dxf gibi standart formatlarında okur ve tasarımı fotorezist kaplı yonga plakasına yansıtır.

4. KARAKTERİZASYON TEKNİKLERİ

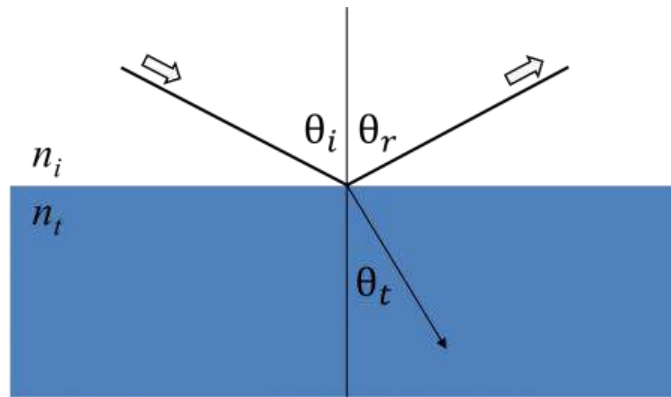
4.1. Elipsometre Ölçüm Sistemi

Elipsometre, polarize monokromatik ışık dalgasının belirli bir açı ile yüzeyle etkileşimi sonrası yüzeyden geçmesi/yansıtması durumunda polarizasyonunda meydana gelen değişimleri ölçen cihazdır. Şekil 4.1’de elipsometrenin temel çalışma prensibinin şematiği verilmiştir.



Şekil 4.1. Elipsometre polarize ışığın yansıma sonrasında değişimi (<https://www.jawoollam.com/>)

Monokromatik bir ışık dalgasının polarizasyonundaki genlik oranı Ψ ve faz farkı ise Δ olarak ifade edilir. Elipsometre ölçümü sonrasında elde edilen veriler, her bir malzemenin kalınlık ve optik sabitlerine bağlıdır. Elipsometre dolaylı bir ölçüm tekniği olup, malzemelerin özgün optik sabitleri ve kalınlıkları olduğundan ötürü, optik bir modelleme ile çözümlenmesi gerekmektedir.



Şekil 4.2. Işığın farklı ortamlar arası kırınım sınır koşulları

Şekil 4.2 ‘de gösterildiği üzere, ışık kırılma indeksi farklı olan ve sınır koşullarına yol açan bir malzeme ile etkileşiminden sonra ışığın davranış mekanizması Maxwell denklemleri ile ifade edilir.

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$

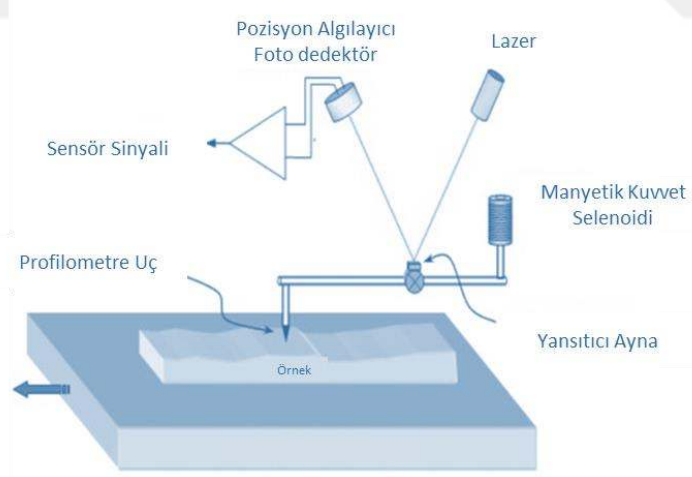
Snell yasasına göre; gelen ışının normal ile yapmış olduğu açı (θ_i), yansıyan ışının normal ile yapmış olduğu açıya θ_r eşittir. Malzemenin içine giren ışık ise θ_t açısı ile yansır. Yansıyan ve geçen ışınların doğru ölçümü ile elde edilen polarizasyonundaki değişiklikler sonrasında film faz kalınlığı şu şekilde ifade edilmektedir;

$$\beta = 2\pi \left(\frac{d_1}{\lambda} \right) n_1 \cos \theta_1$$

Bu denklem ile malzemelerin kalınlık ve optik sabitleri tayin edilebilmektedir.

4.2. Profilometre Ölçüm Sistemi

Yüzey profilometre sistemi, kullanıcının tayin etmiş olduğu tarama uzunluğu, hızı ve de ucun yüzeye yapacağı kuvvetine göre sisteme ait olan elmas ucu numune yüzeyinde hareket ettirerek elektromekanik olarak ölçümler alır. Profilometrenin çalışma prensibi Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Elmas uç, numunenin yüzey varyasyonlarına karşılık gelen hareketlerine istinaden elektrik sinyallerini üreten ve işleyen bir Lineer Değişken Diferansiyel Transformatöre (LVDT) bağlıdır. Dijital bir formata dönüştürüldükten sonra, bu yüzey varyasyonları görüntüleme ve analiz için saklanır. Profilometre ölçüm tablası ve mekanizması Görsel 4.1' de yer almaktadır.



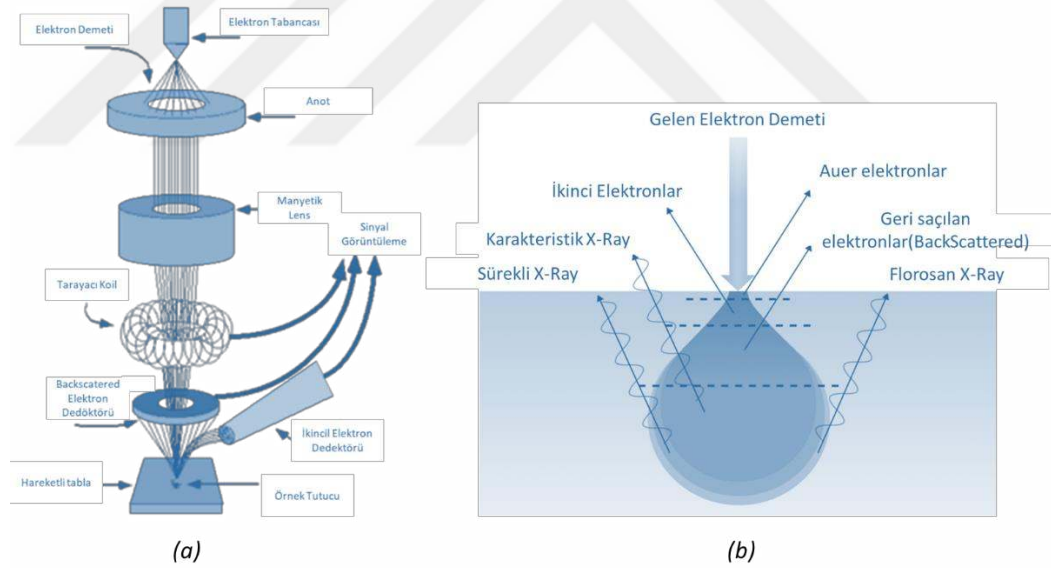
Şekil 4.3. Profilometre çalışma prensibi



Görsel 4.1. Bruker DEKTAK XT ölçüm görseli

4.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), bir elektron kaynağından çıkan elektron demetinin, manyetik yönlendiriciler ile odaklanarak incelenmek istenilen numune üzerine düşürülmesi sonrasında, örnek ile etkileşiminden sonra saçılan ikincil elektronların sensör ile algılanıp görüntü haline getirilmesi prensibi ile çalışmaktadır. Taramalı elektron mikroskobunun temel çalışma şematığı Şekil 4.4 (a)'da verilmiştir.



Şekil 4.4. Paras(a)Taramalı elektron mikroskobu şematik gösterimi (Shawky, Elsayed, & Ahmed, 2016),
(b) Elektron demetinin numune etkileşimi sonucu ortaya çıkan elektron ve x-ışınları

Taramalı elektron mikroskopisinde farklı metotlar ile görüntüleme yapmak mümkündür. Bu görüntüleme yöntemleri için farklı dedektörler kullanılmaktadır. İkincil saçılan elektronlar, geri saçılan elektronlar ve elektron etkileşimi sonrasında ortaya çıkan X-ray ışın demetleri toplanarak görüntüleme yapılmaktadır.

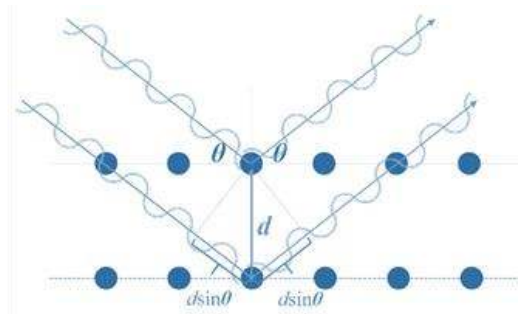
4.4. EDS Analiz Sistemi

EDS; Enerji dispersiv spektrum olarak adlandırılmaktadır. Bu analiz yöntemi SEM ve TEM cihazlarını ekstra bir dedektör olarak eklenerek, elementlerin kendine özgü enerjilerinden faydalanarak kantitatif kimyasal analiz yapmak amacıyla kullanılmaktadır.

Numunenin yüzeyine, yüksek potansiyel fark altında hızlandırılmış olan elektronlar gönderilerek numune ile etkileşimi sağlanır. Bu etkileşim sonrasında numune yüzeyinden elektronlar koparılır. Elektron koparma sırasında, numune yüzeyine gönderilen elektronlar yüksek enerjili elektronlar olduğundan dolayı, kopan elektronların bir kısmı çekirdeğe daha yakın orbitallerden koparak atom kararsız hale gelir. Atomlar tekrar karalı hale gelebilmek için dış orbitallerde yer alan elektronlar iç orbitallerdeki boşlukları doldururlar. Dış orbitallerde yer alan elektronların enerjisi, iç orbitallere göre daha yüksek olduğu için iç orbitallere geçerken fazla olan enerjiyi x-ışını olarak yayılım yaparlar. Oluşan x-ışınları, dedektör tarafından belirli şiddetlere sahip piklerden oluşan x-ışını enerji histogramı oluşturur. Her malzemenin karakteristik olarak kendine özgü x-ışını histogramı mevcut olduğundan ötürü, dedektör tarafından oluşturulan histogram ile karşılaştırılarak malzeme analizi gerçekleştirilir.

4.5. X ışını Difraktometresi

X ışını kırınım yöntemi katıların kristal yapısını incelemek amacıyla en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntem yardımıyla numunenin kristal yapısı, birim hücre boyutları ve örgü parametreleri hesaplanabilir. Yöntemin temeli 1915 yılında bu çalışmalarıyla Nobel Fizik Ödülü de almış Lawrence – Henry Bragg'e dayanır. O yıllarda x-ışınlarının kristal yapılarıyla olan ilişkisini anlamaya çalışan baba-oğul, x-ışınlarının kristal yapıdaki düzlemlerden yansıyarak belirli açılarda kırınımına sebep olduğunu göstermişlerdir.



Şekil 4.5. X-ışınlarının atomlar arası kırınım ve yansıması

İki komşu kristal düzlem arasındaki mesafe (d) nedeniyle kristale aynı açıyla yansıtılan iki farklı ışın demeti farklı miktarlarda yol kat ederler. Şekil 4.5’de görüleceği üzere alttaki düzleme giden ışın demeti toplamda $2d\sin\theta$ daha fazla yol almaktadır. Bragg kırınım yasasına göre eğer bu mesafe x-ışığının dalgaboyunun tam katıysa iki ışın demeti yapıcı bir girişim yapar:

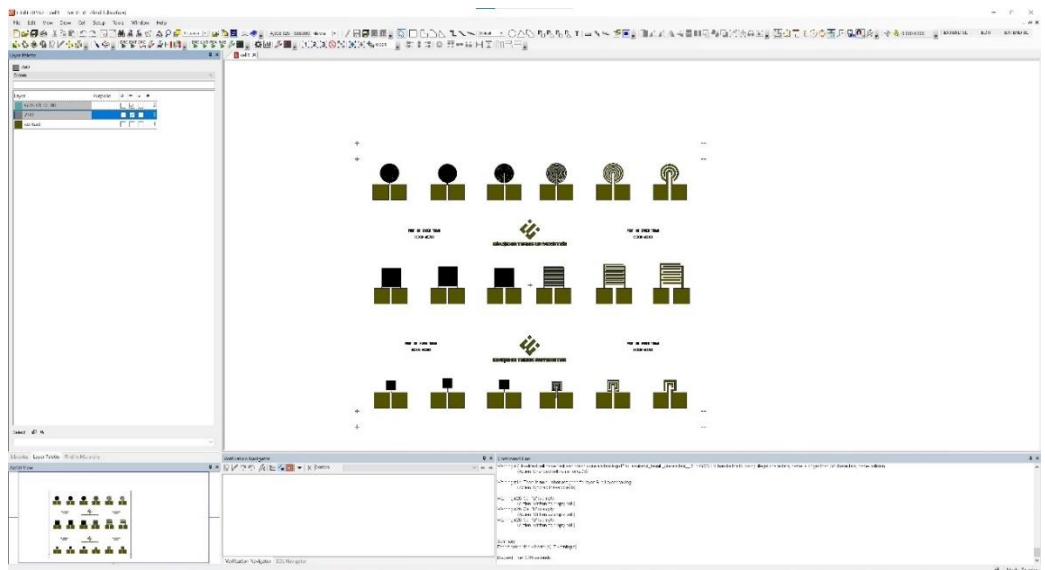
$$2d\sin\theta = n\lambda$$

Her malzeme farklı bir düzlemler arası mesafeye (d) sahip olduğu için ışın demetinin dalgaboyu ile yüzeyle yaptığı açı bilindiği takdirde bilinmeyen bir malzemenin ne olduğu bulunabilir. Bragg yasasının daha rahat uygulanabilmesi adına kristallerdeki düzlemler arası mesafelerin x-ışınlarının dalga boylarına yakın olması sebebiyle bu ölçümlerde x-ışınları kullanılmaktadır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

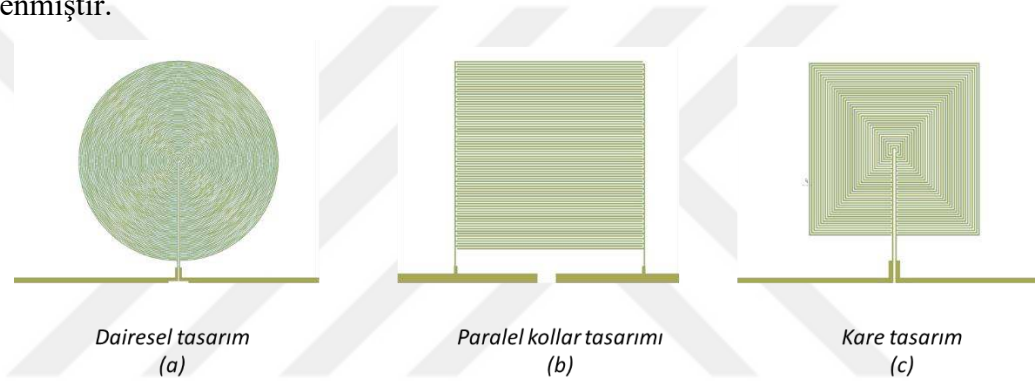
5.1. Sensör Tasarımı

Yapılan literatür çalışması sonucunda tasarlanan ZnO sensör, iki temel bileşenden oluşmaktadır. Hedef malzemeye duyarlı aktif malzeme ve elektrotlar arası değişken mesafe. Bu durum sensör üretimi için fotolitografi tekniğini ve farklı ince film kaplama tekniklerini zorunlu kılmaktadır. Fotolitografi tekniği ile aktif malzeme üzerine iletken yolların mikron düzeyinde şekillendirilecek olması, sensörlerin temel bileşenlerinden olan elektrot arası mesafe ve elektrotlar arasındaki toplam aktif malzeme yüzey alanını tanımlamaktadır. Bu çalışmada sensör tasarımı L-Edit programında çizilerek oluşturulmuştur.



Görsel 5.1. L-Edit programında gerçekleştirilen sensör tasarımı

Görsel 5.1’de çalışmamızda üretilen sensörün L-Edit programı ile tasarımı verilmektedir. Sensörün aynı mikron kare alan içerisinde oluşturulan farklı tasarımlarla, duyarlılığının tayinini gerçekleştirmek hedeflenmiştir. Bu tasarımlar aynı alandaki karşılıklı kontaklar arasındaki mesafe ve uzunlukları farklı olacak şekilde dairesel, kare ve paralel kollar olmak üzere üç farklı şekilde tasarlanmıştır. Her bir tasarımda yer alan sensör kollarının kalınlıkları ve aralarındaki mesafe değerleri Tablo 5.1’de verilmektedir. Bu değerler, mikro fabrikasyon tekniklerinin alt limiti olan mikrometre ile başlayarak doğrusal artış şeklinde tayin edilmiştir. Katkısız ZnO örneğinin ortalama kristal büyüklüğü 11.84 ile 24.82 nm aralığında yer almakta (Mustapha, ve diğerleri, 2019) ve ileriki nano yapılarla gerçekleştirilmesi planlanan çalışmalara en yakın değerlerle karşılaştırma yapmak hedeflenmiştir.

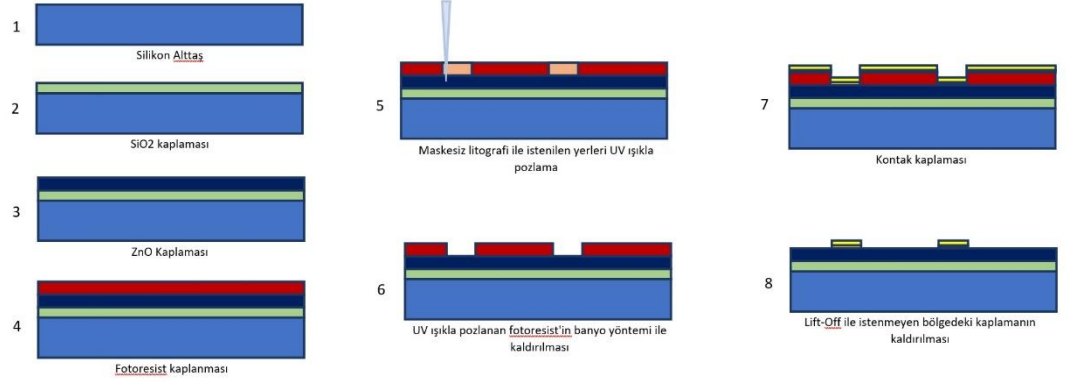


Şekil 5.1. *Tasarım çeşitleri*

Tablo 5.1. *Tasarım ölçü tablosu*

	Kontak kalınlıkları (μm)	Kontaklar arası mesafe (μm)
Tasarım 1 (Dairesel, Kare ve paralel)	2	2
Tasarım 2 (Dairesel, Kare ve paralel)	4	4
Tasarım 3 (Dairesel, Kare ve paralel)	6	6
Tasarım 4 (Dairesel, Kare ve paralel)	8	8
Tasarım 5 (Dairesel, Kare ve paralel)	16	16
Tasarım 6 (Dairesel, Kare ve paralel)	32	32
Tasarım 7 (Dairesel, Kare ve paralel)	48	48

Şekil 5.2’de fabrikasyon işleminin genel adımları ise sırasıyla; (1)temizlik, (2) SiO₂ kaplaması, (3) ZnO ince film kaplaması, (4) fotorezist Kaplanması, (5) UV pozlama, (6) banyolama, (7) kontak kaplaması, (8) Lift-off olarak verilir.



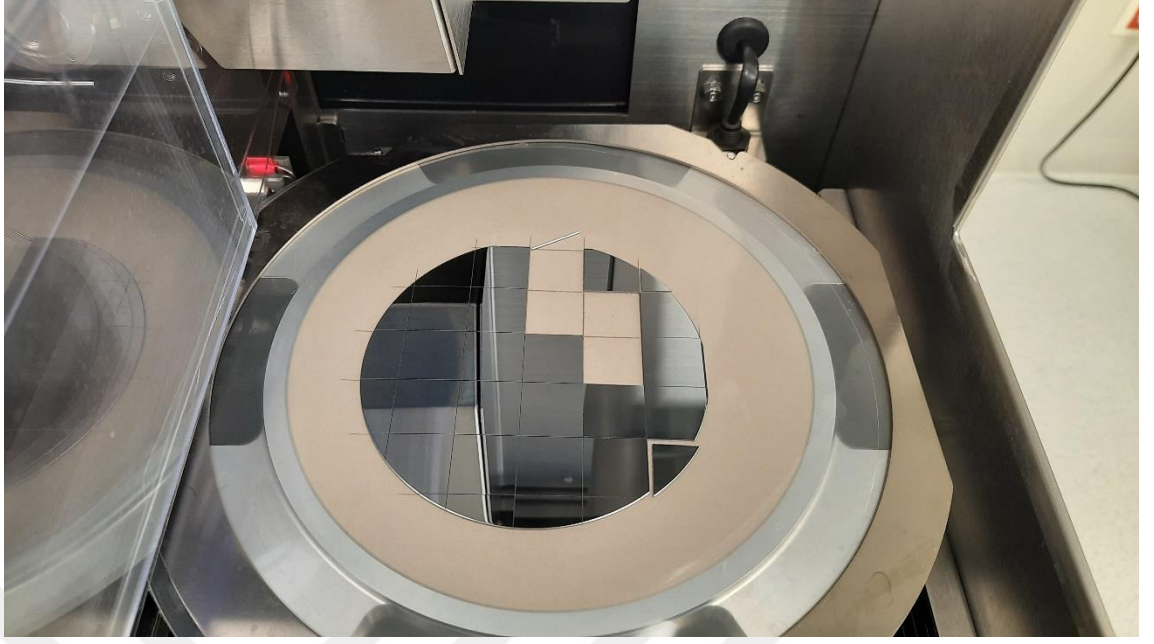
Şekil 5.2. Fabrikasyon şematığı

Bu üretim aşamaları aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

5.2. Sensör Üretim Basamakları

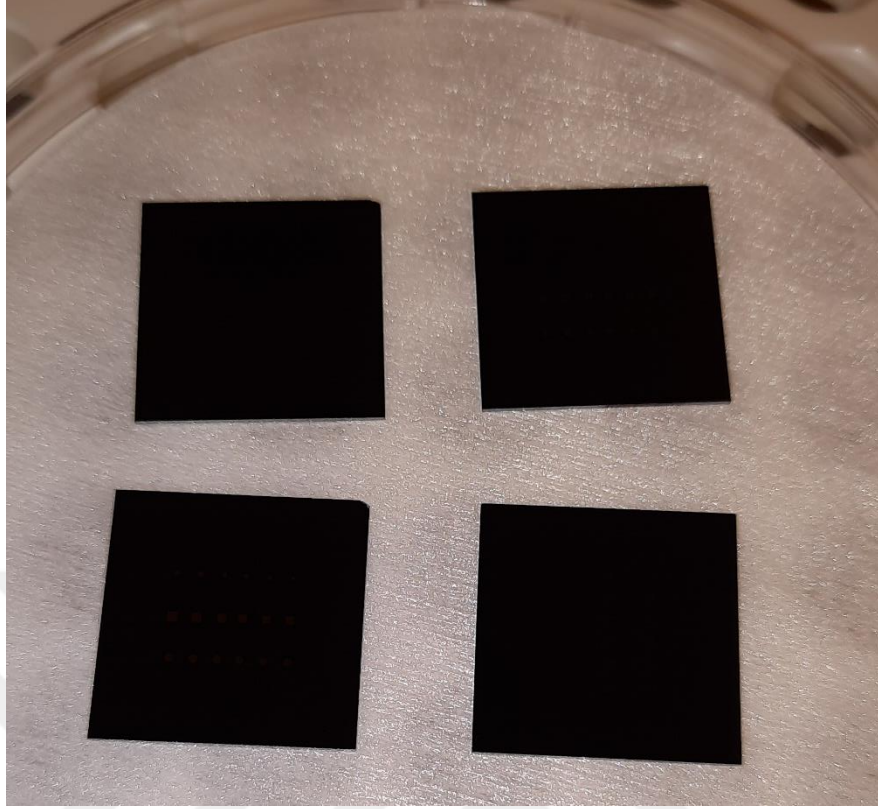
5.2.1. Örnek hazırlama ve temizlik prosedürü

Üretim yonga parçalar (bundan sonra pul olarak adlandırılacak) halinde gerçekleştirileceğinden dolayı ilk olarak dört inç silisyum alttaşı UV ışığa duyarlı yapışkan bant üzerine yerleştirilerek, Disco marka DAD820 model dilimleme cihazı ile 20mm x 20mm kareler halinde kesilmiştir. Kare şeklinde dilimlenen silisyum pullar Görsel 5.2’de verilmektedir.



Görsel 5.2. *Disco DAD810 cihazı ile alttaş dilimlenmesi*

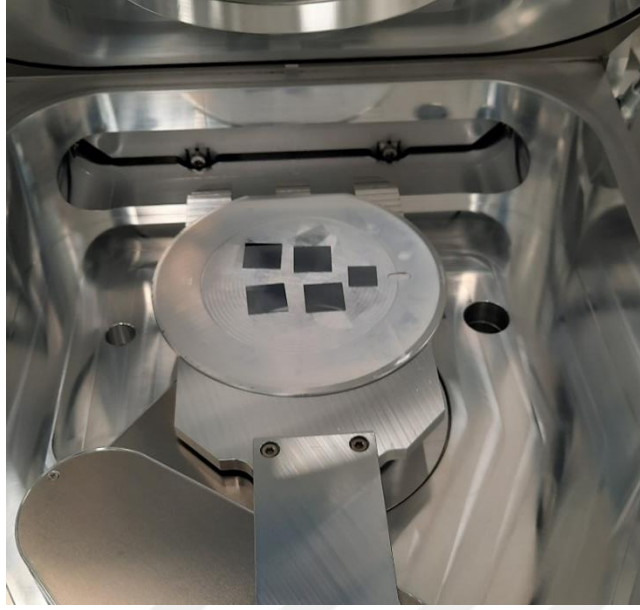
Kesilen silisyum pullar, ultrasonik banyoda 50 °C ye ısıtılmış asetonda 5 dakika ve ardından 50 °C ye ısıtılmış isopropanol ile hem mekanik hem de kimyasal temizlenmiştir. Kesilen silisyum pullar üzerinde atmosferik ortamda meydana gelen doğal oksit tabakasını kaldırmak amacıyla 3:1 oranında sülfirik asit ve %30 derişimli hidrojen peroksit kullanılarak piranha çözeltisi hazırlanmıştır. Hazırlanmış olan piranha çözeltisinde pullar 180 saniye boyunca temizlenerek, ardından deiyonize su ile yıkanmış ve temizlik işlemi tamamlanmıştır. Görsel 5.3'te temizlik aşamaları uygulanan silisyum pul alttaşlar verilmektedir.



Görsel 5.3. *Temizlik yapılmış silisyum pul alttaşlar.*

5.2.2. Silikon dioksit kaplaması

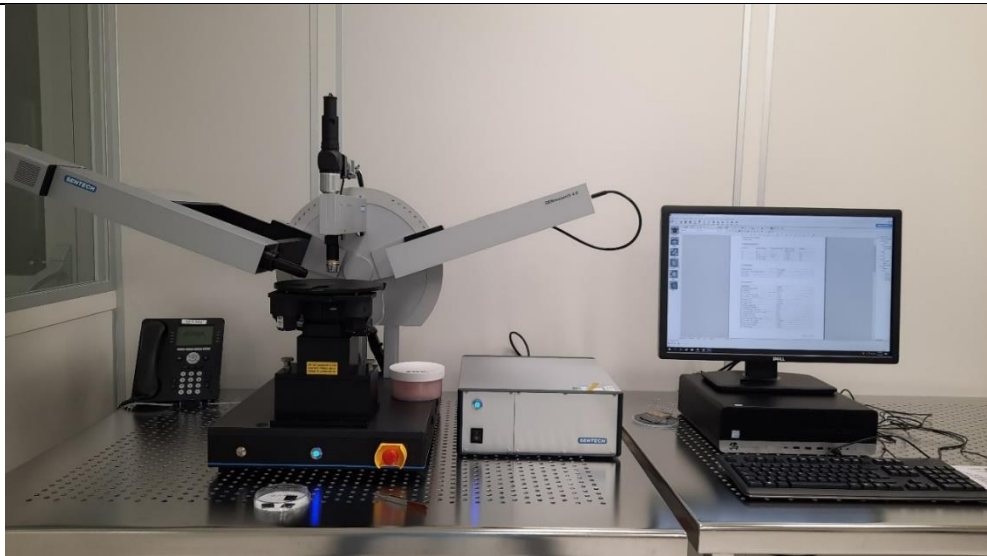
Silikon dioksit (SiO_2) ince filmi üretimi için Sentech marka ICP-PECVD cihazı kullanılmıştır (Görsel 5.4). ICP-PECVD cihazında SiO_2 kaplama reçetesi ve Tablo 5.2’de SiO_2 kaplama koşulları listelenmiştir. Verilen parametreler kullanılarak SiO_2 ince filmleri 21.5nm/dakika hız ile kaplanmıştır. Bu veri ışında 100 nm SiO_2 için 270 saniye ince film kaplaması yapılmıştır. Dielektrik katman olarak kaplanan SiO_2 ince filminin kalınlığı Sentech marka SENresearch4.0 model cihazı kullanılarak ölçülmüştür. İlk olarak numune elipsometre cihazı yüzeyine yerleştirilip, tutucu yüzeyin yüksekliği otomatik olarak hizalanır. Sonrasında ölçüm yapılmak istenilen açılar olan 50° , 60° , 70° ‘de ölçümler için, Görsel 5.5’de gösterilmiş olan elipsometre ışık kaynağı ve dedektör kolları aynı açılara manuel olarak ayarlandıktan sonra ölçüm gerçekleştirilmiştir.



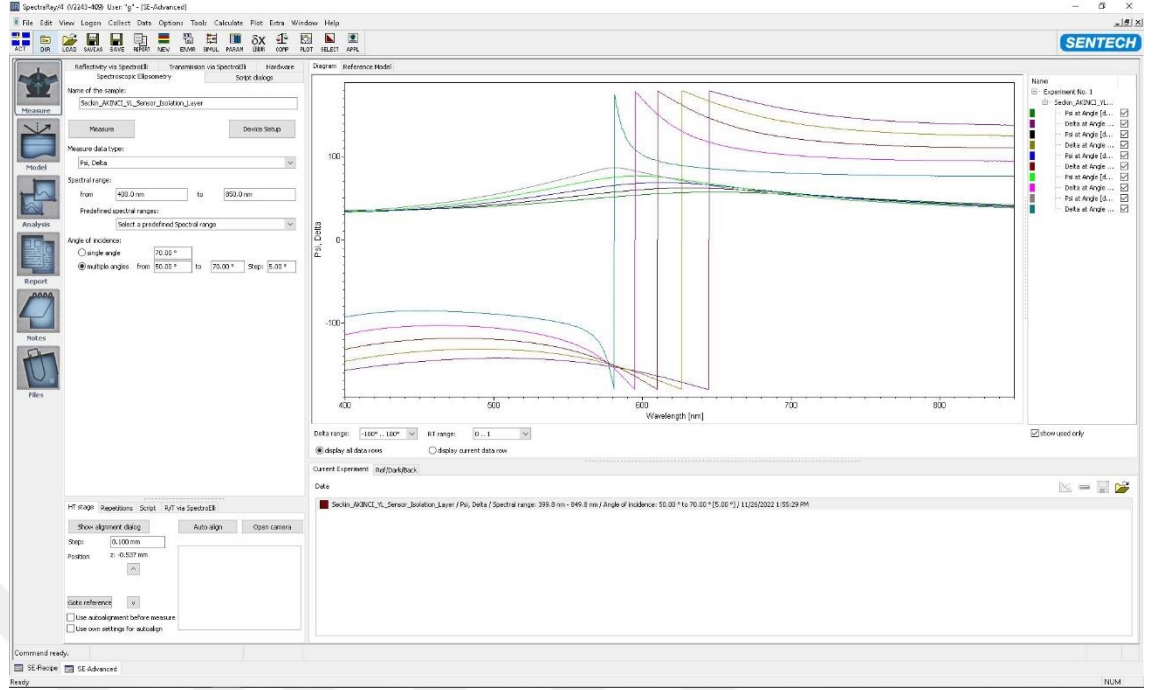
Görsel 5.4. *Sentech ICP-PECVD cihazında silisyum pulların SiO₂ kaplanması.*

Tablo 5.2. *SiO₂ Kaplama Reçetesi*

Düzy	SiO ₂ kaplama reçetesi
Sıcaklık	90°C
Basınç	1.46 pascal
O ₂ Gazı	13 sccm
SiH ₄ Gazı	130.5 sccm
ICP Gücü	450 Watt
RF Gücü	Kullanılmamıştır.



Görsel 5.5. *Elipsometre cihazı*



Görsel 5.6. Elipsometre ölçüm ekranı görseli

Görsel 5.7 ‘de verilen, uygulama üzerinde mevcut olan veri tabanındaki, malzeme özelliklerine göre oluşturulan model ile ölçüm sonrası elde edilen ölçüme ait Delta (Δ) ve PSİ (Ψ) verileri ile uyumlandırılarak ölçüm işlemi gerçekleştirilir.

Experiment Experiment No. 1 +

Model

Title	Thickness	State	Layer Type	Info [632.8 nm]
			NK layer	n=1.0000
	129.07 nm		Cauchy layer	n=1.4627
	0.00 nm		Cauchy layer	n=1.4610
			File layer	n=3.8739 k=0.01457

Görsel 5.7. Sentech SENresearch4.0 elipsometre modelleme ekranı görseli

Yapılan modelleme ve 3 farklı açı ile gerçekleştirilen ölçüm verilerinin optik modelleme verileriyle yapılan hesaplamalar sonucunda, Tablo 5.3 ve Şekil 5.3’de yer alan uyumlandırma verileri sonucunda %0.27 hata payı ile üretilen SiO₂ ince film tabakasının kırılma indisi 1.468 ve kalınlığı 96,7 olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.3. *SiO₂ elipsometre ölçüm Sonuçları*

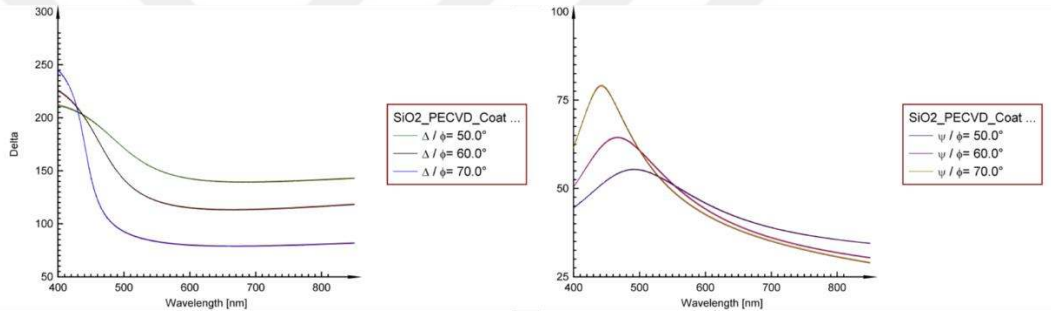
Number	Layer Name	Thickness [nm]	Refr. Index [632.8 nm]	Fitted
0	Air	-	1.000	no
1	SiO ₂	96.69	1.468	yes
2	Si DUV-NIR	-	3.874	no

Fit parameter

Fit parameter	Fit result
[1,1] SiO ₂ : Thickness [nm]	96.69
SiO ₂ : N0	1.464
SiO ₂ : N1	17.6

All parameter

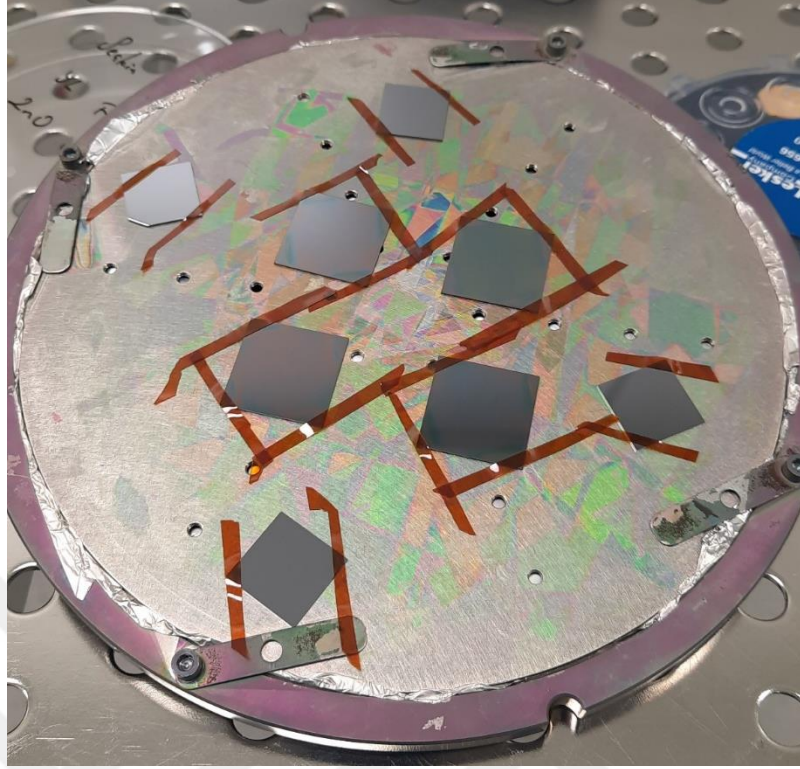
Parameter	Value
[1] Wavelength [nm]	632.8
[1] Angle [°]	70.00
[1] Time [s]	0.0
[1] Temperature [°C]	23.5
MSE	0.27350673



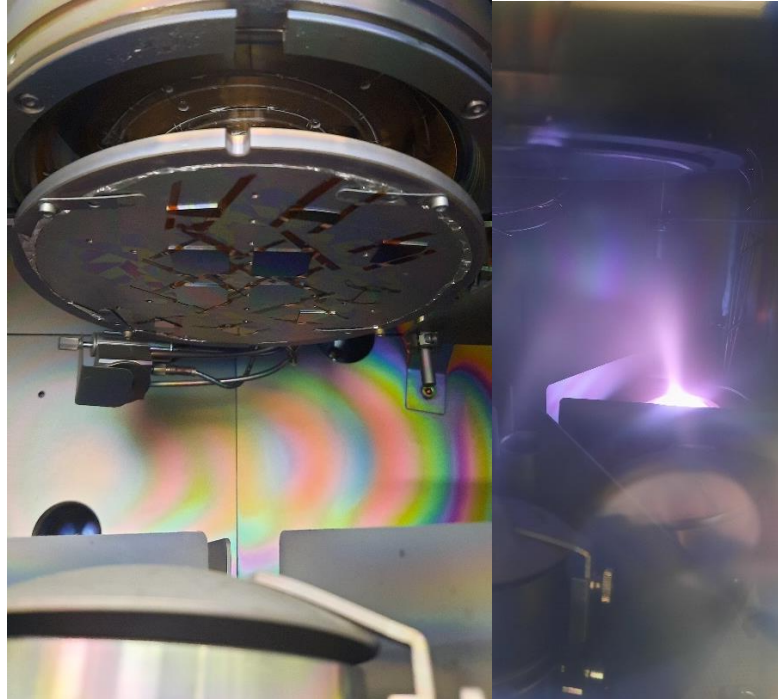
Şekil 5.3. *SiO₂ elipsometre Psi (Ψ) ve Delta (Δ) parametreleri*

5.2.3. ZnO ince film kaplaması

Bu çalışmada hedef gaza duyarlı aktif sensör malzemesi olarak ZnO saçtırma yöntemi ile üretilcektir. ZnO ince filmi kaplaması yapılmadan önce pullar ultrasonik banyoda 50 °C sıcaklıkta asetonda 5 dakika ve ardından 50 °C sıcaklıkla isoproponol ile temizlik yapılmıştır. Bu çalışmada ZnO ince film kaplama işlemi Kurt J. Lesker marka PRO Line PVD 75 model çok yönlü saçtırma cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Görsel 5.8’de hazırlanan alttaşların saçtırma sistemine yerleşimi gösterilmektedir. 2 x 2 cm boyutunda silisyum üzerine 96,76 nm SiO₂ kaplanarak pasive edilmiş sekiz adet numune saçtırma tutucusuna ısı dirençli polyamid film bant ile yapıştırılmıştır. Pullar tutucuya bantlandıktan sonra saçtırma sistemine Görsel 5.9’da gösterildiği gibi yüklenmiştir.



Görsel 5.8. *Saştırma sisteminde numune tutucusu*



Görsel 5.9. *Numunelerin sputter sistemine yüklenmesi ve plazma ile kaplama görseli*

Yüksek vakum altındaki sisteme ilk olarak plazma ateşleme seviyesi olan 15mTorr basınca ulaşıncaya dek 55 sccm Ar gazı akıtılarak sistemin istenilen vakum seviyesine ulaşması sağlanmıştır. Bu basınç hedef malzeme üzerinde oluşacak plazma ateşleme basıncıdır. DC sputter kaynağına 200 volt gerilim ve 75 Mhz frekans ile ilk olarak 20 watt gücünde plazma oluşması sağlanmıştır. Plazma oluşturulduktan sonra kontrol edilerek, ortamdaki saflık düzeyini daha iyileştirebilmek için hazne basıncı 7 mTorr'a düşürülmüştür. Uygulanan güç 0.2 watt/s olarak arttırılıp 40 watt'a kadar yükseltilmiştir. Plazma haznesini numune yerleştirmek için atmosfere açtığımızdan dolayı, ZnO target üzerinde oluşabilecek kirlilik ve doğal oksitlenmeyi bertaraf etmek amacıyla, numune kaplamasına başlamadan önce 60 s boyunca ön saçırma yapılmıştır. Numune yüzeyinin tek düze şekilde kaplanması amacıyla numune tutucusu 20 rpm hız ile döndürülmeye başlanarak, kaplama işlemi boyunca devam etmiş ve numune önünde yer alan koruyucu perde kaldırılarak kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir.

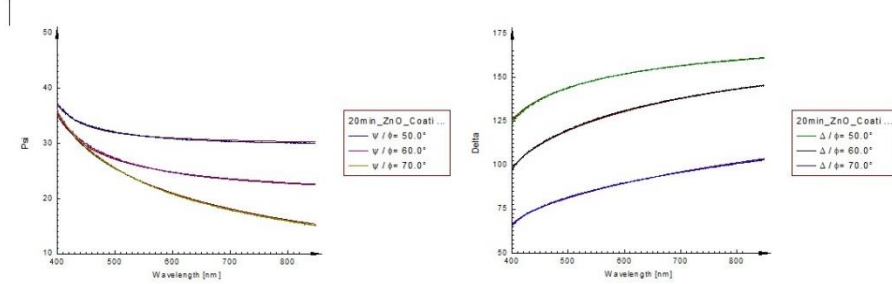
ZnO ince filmlerinin kalınlığı, Yapılan modelleme ve 50°, 60°, 70° açıları ile gerçekleştirilen ölçüm verilerinin optik modelleme verileriyle yapılan hesaplamalar sonucunda, Tablo 5.5 ve Görsel 5.10'da yer alan uyumlandırma verileri sonucunda %0.18'lik hata payı ile üretilen ZnO ince film tabakalarının kırılma indisi 1.86 ve kalınlığı 39 nm olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.4. ZnO elipsometre ölçüm Sonuçları

Number	Layer Name	Thickness [nm]	Refr. Index [632.8 nm]	Fitted
0	Air	-	1.000	no
1	ZnO - TL2	39.07	1.865	yes
2	Si DUV-NIR	-	3.874	no
<u>Fit parameter</u>				
Fit parameter		Fit result		
[1,1] ZnO - TL2: Thickness [nm]		39.07		
ZnO - TL2: Eg(0)		2.9385		
ZnO - TL2: A(0)		352.79		
ZnO - TL2: E0(0)		4.8439		
ZnO - TL2: C(0)		19.6883		
ZnO - TL2: Eg(1)		0.0004		
ZnO - TL2: A(1)		-,298.41		
ZnO - TL2: E0(1)		183.0101		
ZnO - TL2: C(1)		25.4925		
<u>All parameter</u>				
Parameter		Value		
[1] Wavelength [nm]		632.8		
[1] Angle [°]		70.00		
[1] Time [s]		0.0		
[1] Temperature [°C]		23.5		
MSE		0.18175120		

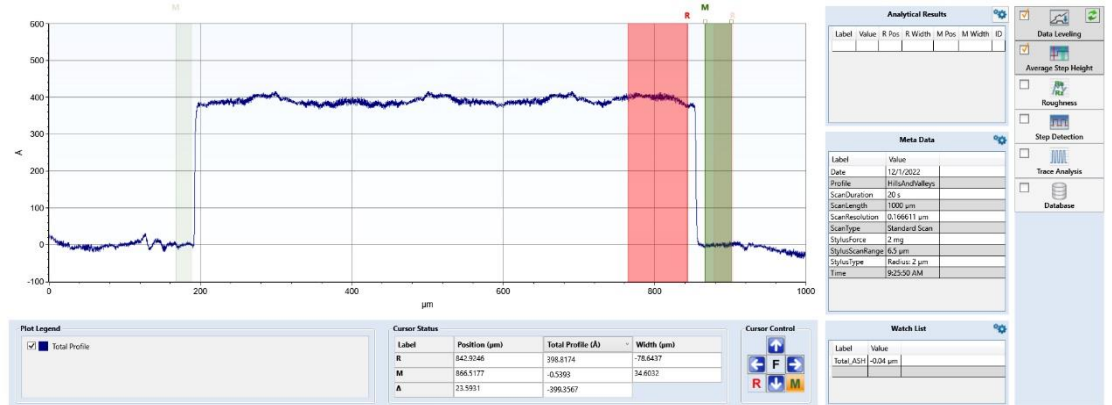
Measured Data

20min_ZnO_Coating / Psi, Delta / Spectral range: 399.8 nm - 849.8 nm /
Angle of incidence: 50.00 ° to 70.00 ° [10.00 °]



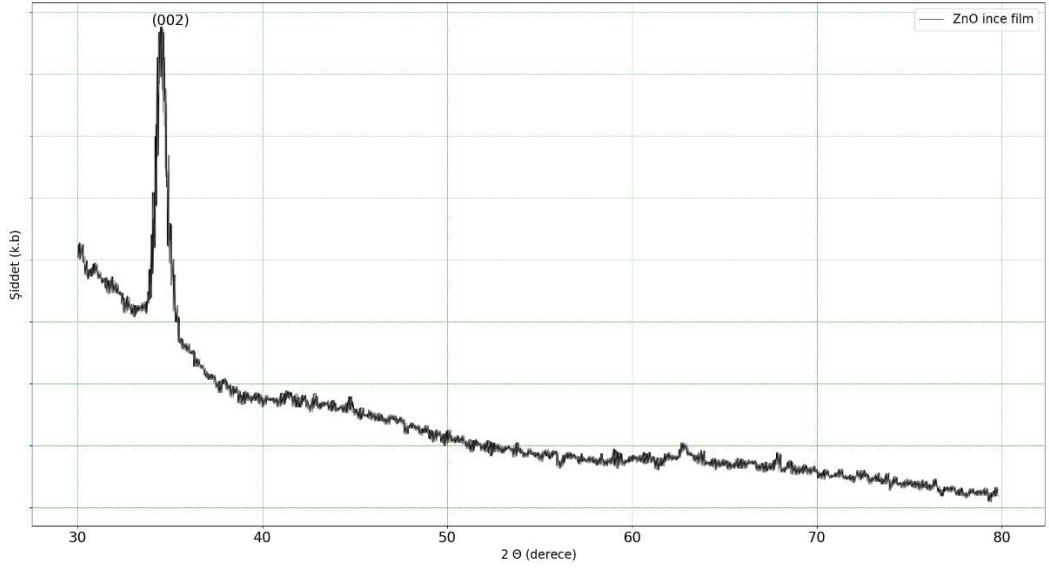
Görsel 5.10. ZnO elipsometre Psi (Ψ) ve Delta (Δ) parametreleri

Daha sonra kalınlık ölçümünün teyit edilmesi amacı ile Bruker DEKTAK XT Profilometre ile kalınlık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Görsel 5.11’de yapılan ölçüm sonrasında ZnO ince film kalınlığının 39 nm olduğu teyit edilmiştir.



Görsel 5.11. ZnO ince film kalınlığı profilometre ölçüm sonucu

Yapılan çalışmada ZnO’in kristal yapısını analiz etmek için, BRUKER Marka D8 ADVANCE model XRD cihazı ile yapısal karakterizasyon gerçekleştirilmiş ve (002) düzlemlerine ait 34.31° ’de gözlenen kırınım piklerinin wurtzite ZnO (JCPDS kart no: 36-1451) kristal yapısına ait olduğu belirlenmiştir. Şekil 5.4’te ZnO ince filminin XRD sonuç grafiği verilmektedir.

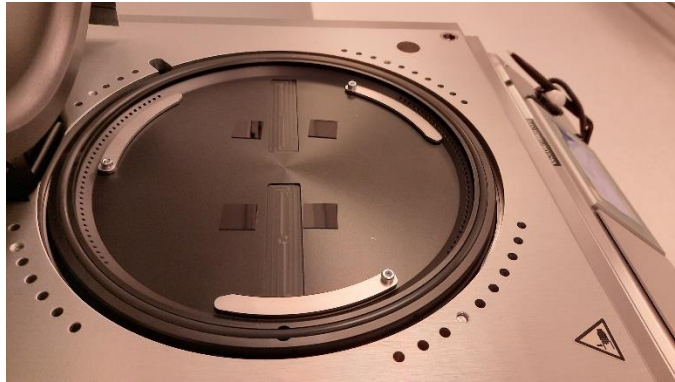


Şekil 5.4. ZnO XRD analiz sonucu

5.2.4. Fotorezist kaplanması

5.2.4.1. HMDS kaplaması

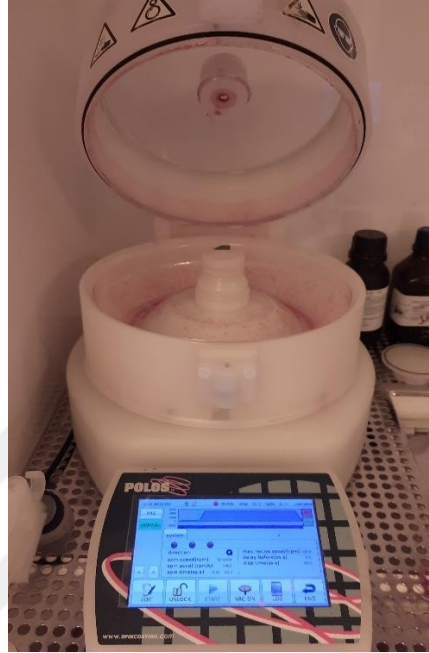
Fotolitografi adımlarında UV ışığa duyarlı reçine olarak MicroChemicals GmbH AZ5214E fotorezisti kullanılmıştır. İlk olarak kullanılan fotorezistin yüzeye yapışkanlığını arttırmak için buhar kaplama metodu ile numune yüzeylerine HMDS (Hexamethyldisilazane) kimyasalı kaplanmıştır. Bu kaplama işlemi Görsel 5.12’de gösterilmiş olan Karl SUSS marka VP8 model HMDS kaplama sistemi ile, vakum altına alınan 120 °C sıcaklıkta vakum haznesine HMDS buharı gönderilerek ve 120 saniye boyunca kaplama gerçekleştirilmiştir. Daha sonra vakum haznesi azot ile temizlenerek numuneler alınmıştır.



Görsel 5.12. HMDS kaplama vakum haznesi içerisine pul yerleşimi

5.2.4.2. Fotorezist serme işlemi

Görsel 5.13'te çalışmalarımızda POLOS marka 150i model spin kaplama cihazı kullanılmıştır. Numuneler ilk aşamada 20 sn 500 rpm de, ikinci aşamada 90 saniye 5000 rpm de döndürülerek yüzeye AZ5214E ışığa duyarlı fotorezist kaplanmıştır.



Görsel 5.13. POLOS Spin 150i cihazı ile fotorezist kaplama işlemi

5.2.5. UV pozlama

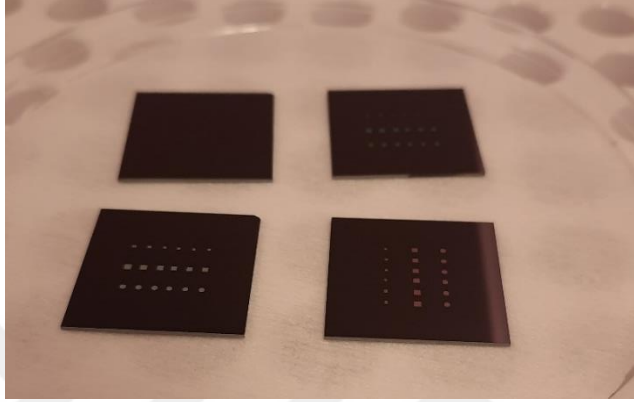
Bölüm 5.1'de anlatılan ve L-Edit programı ile tasarlanmış olan maske dosyası, Görsel 5.14'te yer alan Heidelberg marka UMLA model maskesiz UV pozlama cihazına aktararak numune pozlaması 135 mJoule/cm² UV doz ve -2 odak parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Görsel 5.14. Heidelberg UMLA maskesiz litografi cihazı

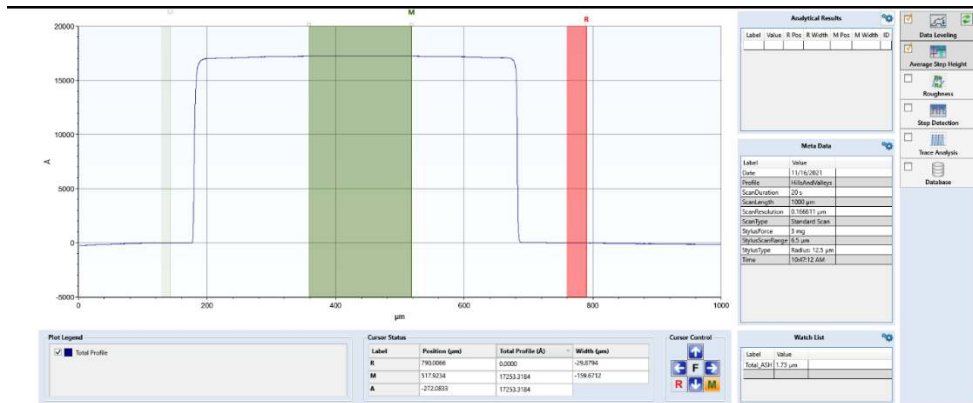
5.2.6. Banyolama

UV ışııkla pozlama sonrasında yapısı çözülebilir hale gelen fotorezist, 60 s boyunca MIF 726 developer kimyasalı içerisinde bırakılarak, UV ışıığa maruz kalan bölgelerin çözünenek uzaklaşması gerçekleştirilmiştir. Görsel 5.15'te banyolama işlemi sonrası tasarıma uygun olarak UV pozlanmış fotorezistlerin çözünenek, alttaş üzerinden kaldırıldığı görsel yer almaktadır.



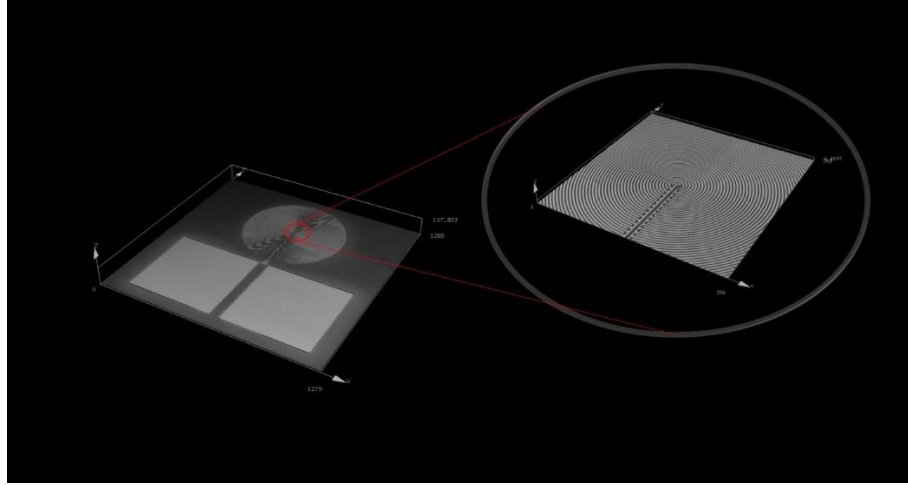
Görsel 5.15. Banyolama işlemi sonrasında numunelerin görseli

Banyolama işlemi sonrasında oluşan desenlerden faydalanılarak, Dektak XT profilometre ile serilen UV ışıığa duyarlı reçinenin kalınlığı ölçülmüştür. Görsel 5.16'da yer alan ve yapılan ölçüm sonrasında UV ışıığa duyarlı fotorezist kalınlığı 1725 nm olarak belirlenmiştir. Bu kalınlık daha sonra yapılacak olan kontak kaplama kalınlıkları için yeterlidir.

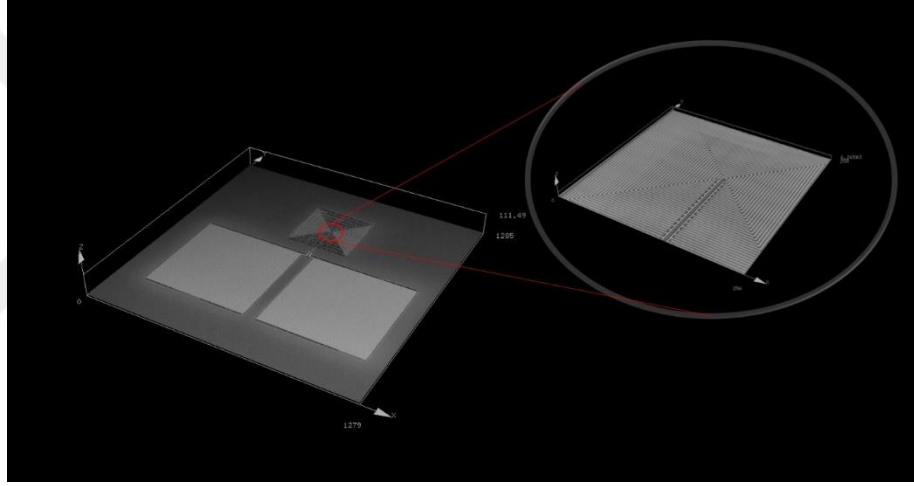


Görsel 5.16. UV ışıığa duyarlı fotorezist kalınlığı ölçümü

Aktarılan desenlerin düzgünlüğü ve banyo sonrası kalıntı olup olmadığı, Görsel 5.17 ve 5.18'de konfokal mikroskop ile görüntüler alınarak teyit edilmiştir.



Görsel 5.17. Banyolama sonrası desenlerin konfokal mikroskop görseli 1



Görsel 5.18. Banyolama sonrası desenlerin konfokal mikroskop görseli 2

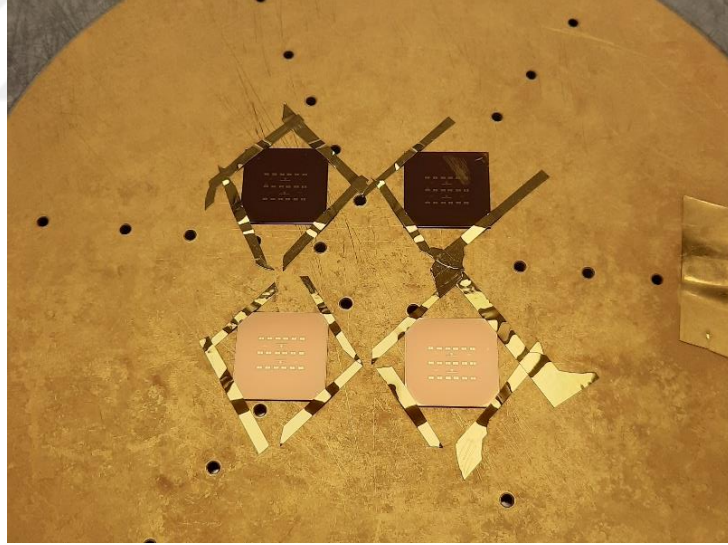
5.2.7. Kontak kaplaması

Bu çalışmada kontak kaplaması Kurt J. Lesker Company® PRO Line PVD 200 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Görsel 5.19’de verilen ve sekiz adet farklı malzeme haznesi bulunan cihaz sayesinde, sistemi atmosfere açmadan vakum altında farklı materyalleri kaplamaya imkân sağlamaktadır. Kontak kaplmasında kullanılan altının (Au) yüzeye tutunumunu arttırmak amacıyla ilk olarak krom (Cr) kaplaması planlandığından krom üzeri altın kaplama aynı vakum sisteminde ve aynı şartlarda gerçekleştirilmiştir. Fotolitografi sonrasında istenilen desenlerin aktarılmış olduğu alttaşlar, E-Beam evaporasyon cihazının tutucusuna kapton tape ile yapıştırılmıştır.



Görsel 5.19. *E-Beam evaporasyon sisteminde numunelerin yerleştirilme görseli*

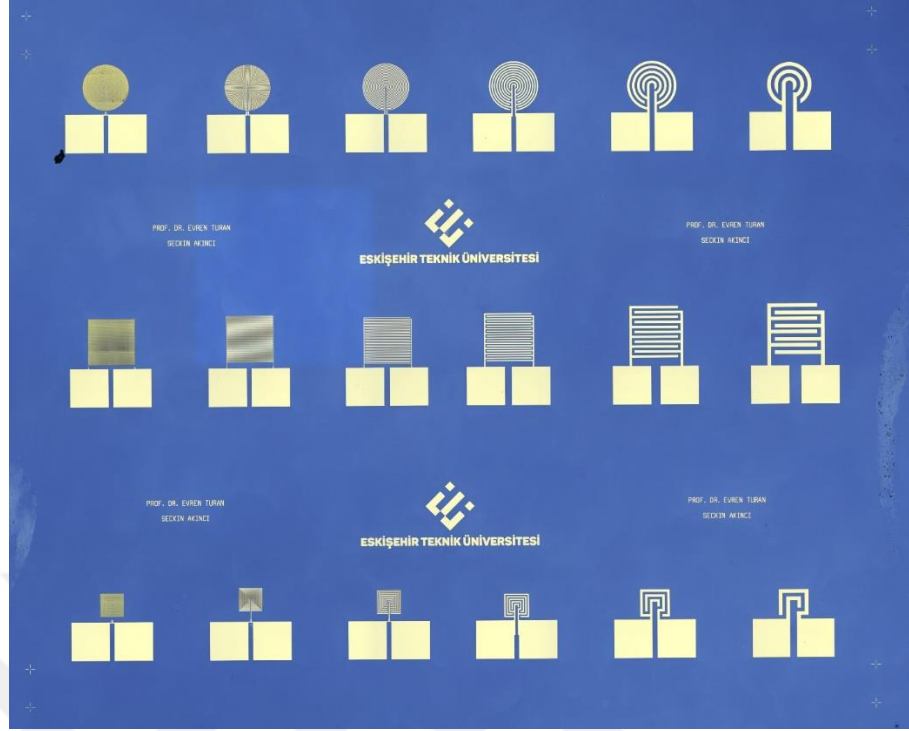
Sistem 10^{-7} mTorr vakum seviyesine kadar pompalandıktan sonra numune tutucu 20 rpm hızında döndürülürken 0.40 Å/s kaplama hızında 15 nm CR ve 0.30 Å/s kaplama hızında 100 nm altın kaplaması gerçekleştirilmiştir. Görsel 5.20’de elektrot kaplamaları tamamlanmış olan alttaşların görseli yer almaktadır.



Görsel 5.20. *E-Beam evaporasyon cihazı ile krom üzerine altın kaplı numunelerin görseli*

5.2.8. Lift-Off metodu ile kontakların açığa çıkarılması

Altın kaplanan numuneler üzerinde istenilmeyen gölgelerdeki altını kaldırmak için 65 C de ultasonik banyo içerisinde ısıtılan AZ100 remover içerisine yerleştirilen numuneler, 30 dk boyunca bekletilerek lift-off gerçekleştirilmiştir. Görsel 5.21’de lift-off işlemi tamamlanmış olan alttaşların, tamamlanmış sensör görseli verilmiştir.



Görsel 5.21. Tamamlanmış örnek görüntüsü

Gerçekleştirilen lift-off sonrasında, Görsel 5.22 ve Görsel 5.23’ de tamamlanmış sensörlerin SEM ve tasarım görüntüleri verilmiştir. ZnO gaz sensörleri SEM de incelenerek tasarlanan tasarım ile uyumu değerlendirilmiş ve yapılan tasarımlar ile üretim sonundaki ölçülerin tutarlı olduğu tespit edilmiştir.

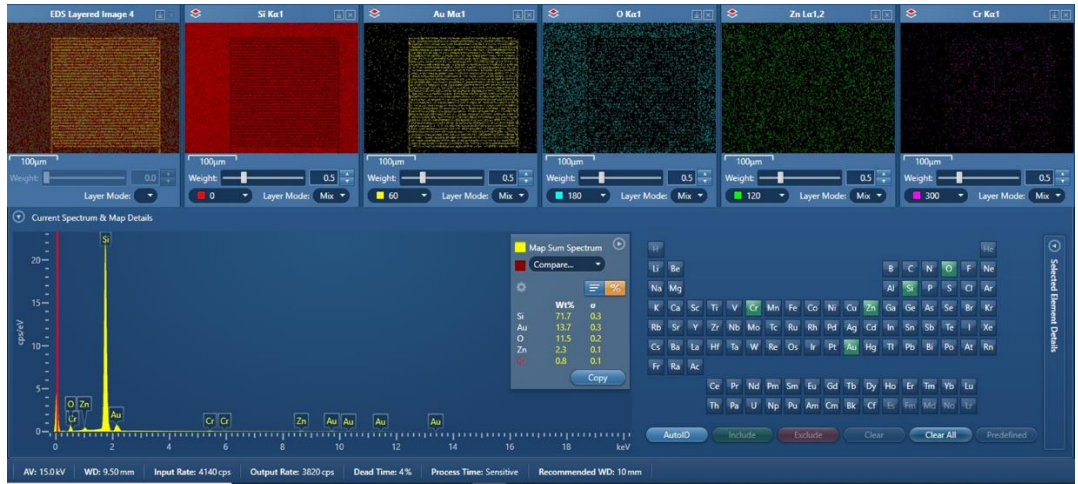


Görsel 5.22. Sensör SEM görüntüsü 1

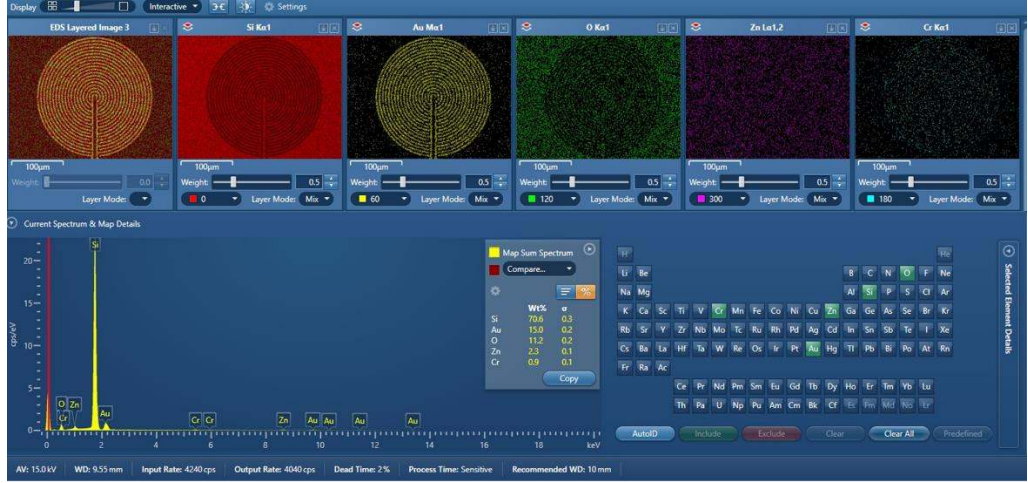


Görsel 5.23. *Sensör SEM görüntüsü 2*

Görsel 5.24, 5.25 ve 5.26’da üretilen gaz sensörlerinin SEM ile EDS analizleri gerçekleştirilerek malzeme analizi gerçekleştirilerek yapılan çalışma teyit edilmiştir



Görsel 5.24. *Sensör paralel yapıların EDS analizi*



Görsel 5.25. Sensör dairesel yapıların EDS analizi

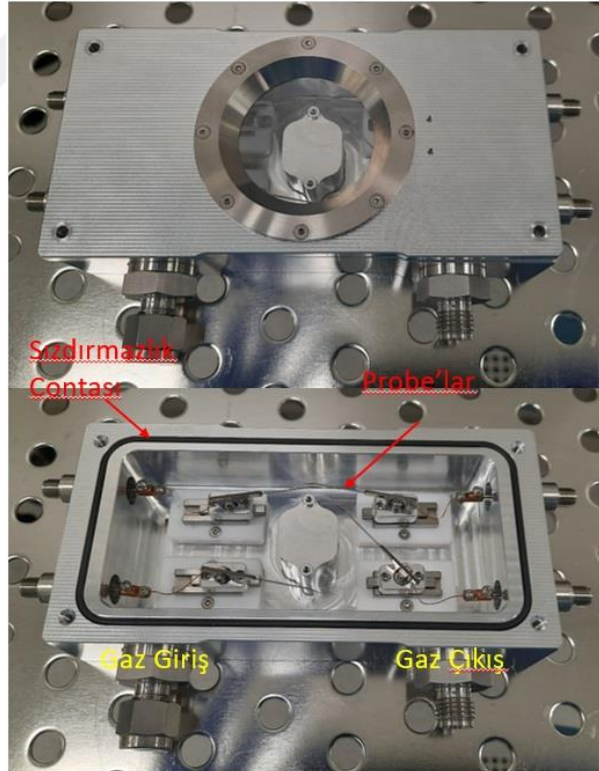


Görsel 5.26. Sensör kare yapıların EDS analizi

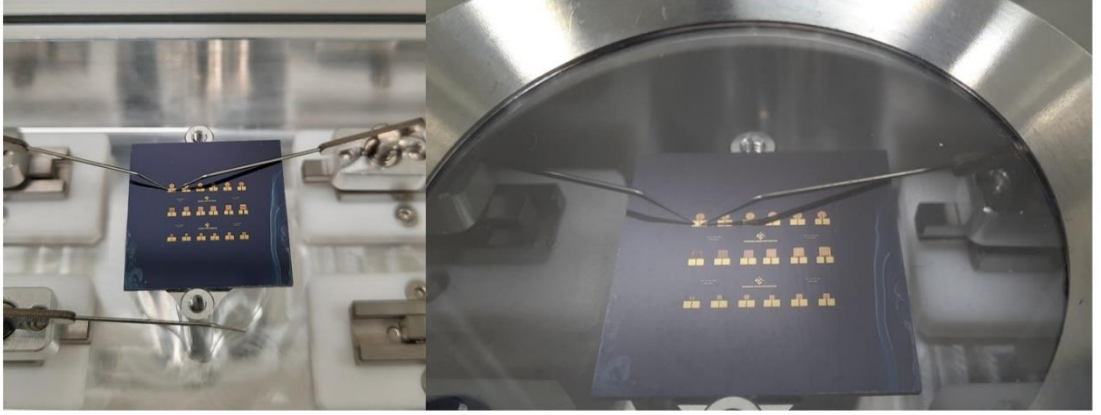
6. SENSÖR KARAKTERİZASYONU

6.1. ZnO Gaz Sensörü Karakterizasyon Deney Düzenegi

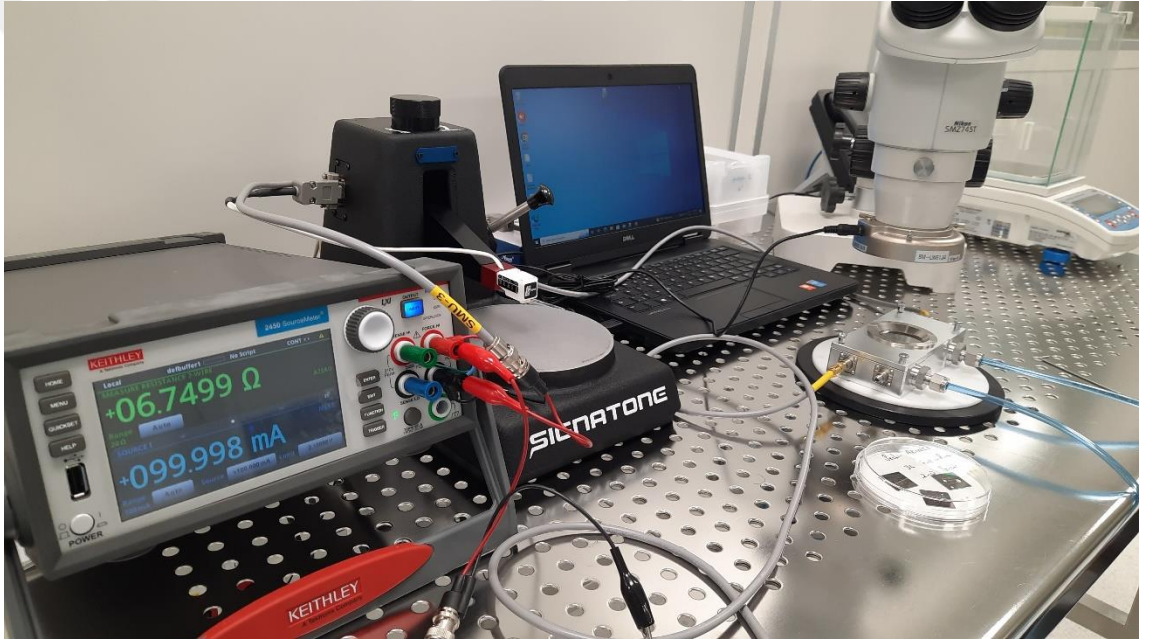
Çalışmamızda farklı elektrot mesafelerine ve uzunluklarına sahip, dairesel, kare ve paralel şekillerde tasarlanmış Si/SiO₂/ZnO/Au gaz sensörü aygıtlarının sensör özellikleri incelenmiştir. Üretilen sensörler elektriksel olarak test edilecek olup, bu test aşamalarında %99.999 saflıkta CO gazı kullanılacaktır. Sensör testlerinde ölçümlerin CO atmosferinde gerçekleşmesi gerektiğinden dolayı sızdırmaz bir hazne ve hazne içerisine konumlandırılmış prob uçlar kullanılmıştır. Görsel 6.1’de kullanılan numune haznesi verilmektedir. Elektriksel ölçüm için Keithley 2450 SourceMeter kullanılmıştır. Ölçüm yapılan sensör konumu ve problemlerin görseli ise görsel 6.2’de gösterilmektedir. Gaz akışı, kütle akış kontrolörü (Mass Flow Controller (MFC)) ile sağlanmış olup, ölçüm haznesi çıkışı ise egzoz hattına bağlanmıştır. Sensörlerin atmosfer ortamında baz direnci ölçülerek, 80 SCCM CO gaz akışı başlamasından sonra oluşan direnç değişimi incelenmiştir. Elde edilen ölçüm verileri anlık olarak bilgisayara aktararak kaydedilmiştir. Deney düzeneği genel görünümü Görsel 6.3’te gösterilmiştir.



Görsel 6.1. Sensör ölçüm haznesi



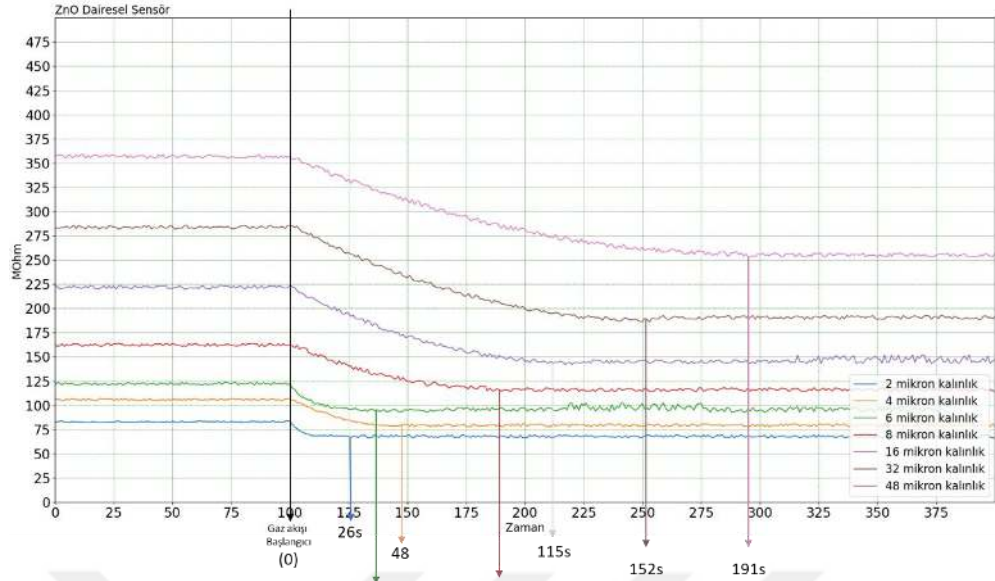
Görsel 6.2. *Sensör elektriksel ölçüm görseli*



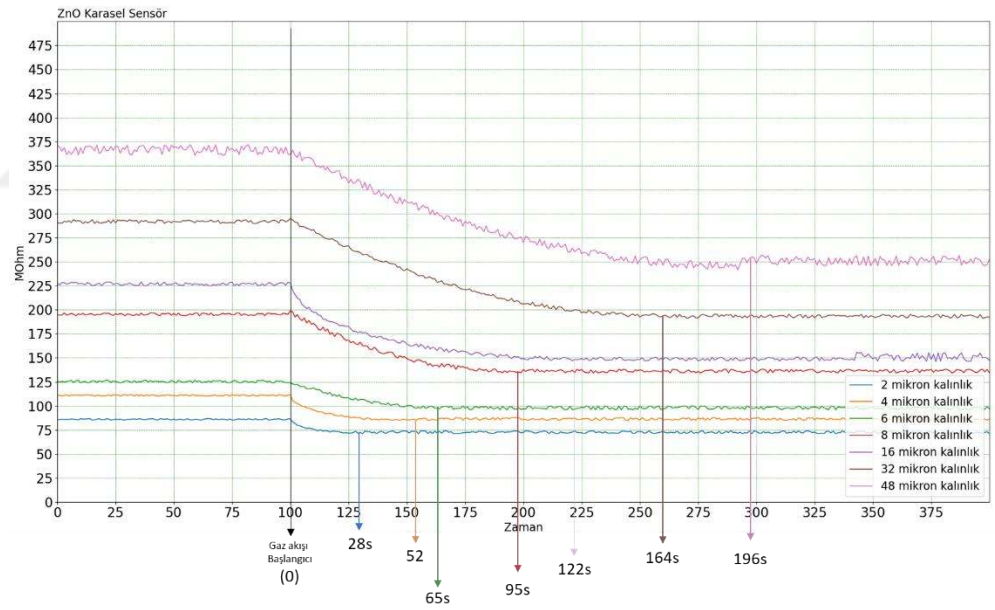
Görsel 6.3. *ZnO gaz sensörü elektriksel karakterizasyon deney düzeneği*

6.2. Gaz Sensörü Karakterizasyon Sonuçları

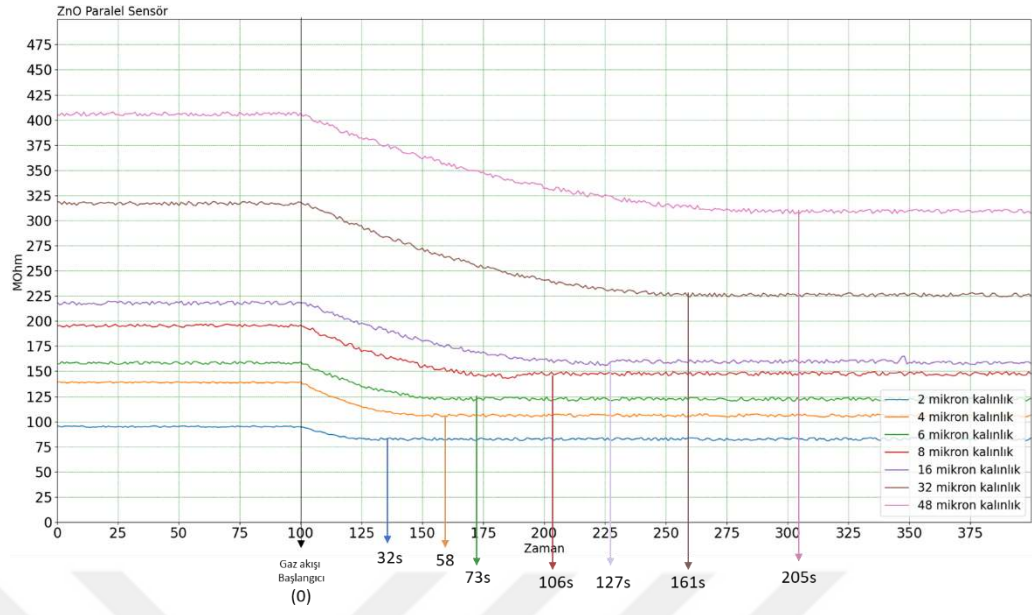
Farklı tasarım ve boyutlarda üretilmiş olan ZnO gaz sensörleri bölüm 6.1’de anlatılan düzenek ile elektriksel olarak karakterize edilmiştir. Gerçekleştirilmiş olan elektriksel testlerde direnç değişimleri baz alınarak, sensörün atmosfer altındaki direnci ile CO gaz altındaki direnç değişimi ve sensörün doyum noktasına kadar geçen süre incelenmiştir. ZnO gaz sensörünün karakterizasyonundan elde edilen veriler Şekil 6.1-3’te gösterilmiştir.



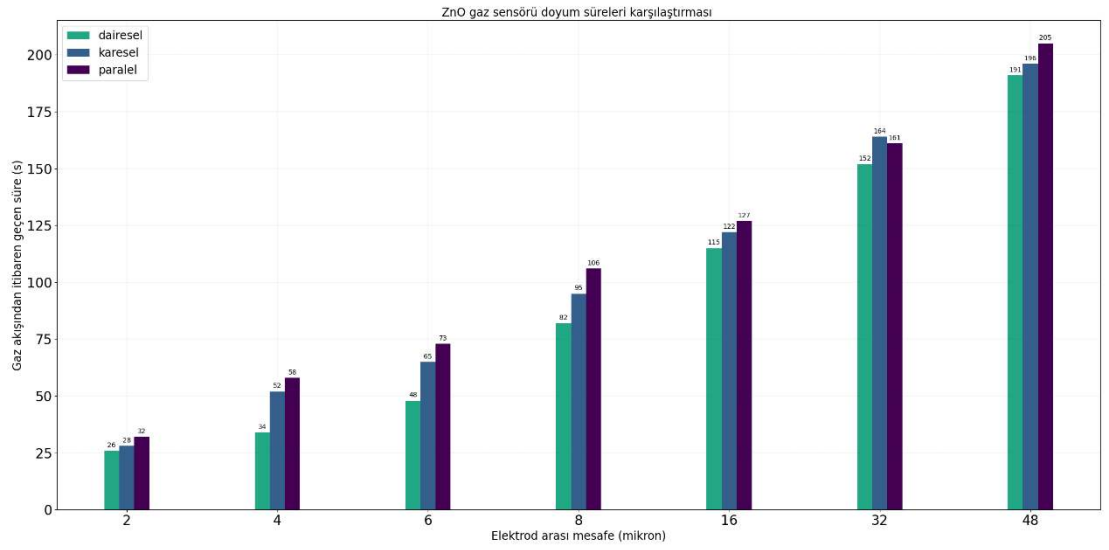
Şekil 6.1. ZnO dairesel tasarım direnç değişim grafiği ve sensor doyum zamanları



Şekil 6.1. ZnO karesel tasarım direnç değişim grafiği ve sensor doyum zamanları



Şekil 6.2. ZnO paralel tasarım direnç değişim grafiği ve sensör doyum zamanları



Şekil 6.3. ZnO gaz sensörü doyum süreleri karşılaştırılması

Elde edilen veriler göstermiştir ki; aynı alanı kaplayan farklı tasarımlardaki sensörlerde, aynı gaz akışı altında, elektrot kalınlık ve aralıkları küçüldükçe üretilen sensörün daha düşük güç tüketimi ile çalıştığı belirlenmiştir. Elektrot arası mesafeler arttığında ise sensörün doyum noktasına ulaşma zamanı ve doyum genliğinin artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Şekil 5.1 de gösterilen farklı tasarımlardaki sensörlerin verileri karşılaştırıldığında; elektrotlar arasındaki mesafe aynı olduğunda, yüzey alanı artışına karşılık doyum süresi uzamaktadır. Dolayısıyla dairesel yapıya sahip sensörün doyum süresi en fazla olup sırasıyla kare ve paralel kollar takip etmektedir. Şekil 6.1,6.2 ve 6.3 karşılaştırıldığında elektrot tasarımından ziyade elektrot arası mesafenin doyum süresi ve çalışma direnç aralığı üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.



7. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, saçtırma yöntemi ile silisyum alttaş üzerine üretilmiş ZnO tabanlı ince film yarıiletken gaz sensörlerinin farklı elektrot tasarımları ile performansları deneysel olarak incelenmiştir. Alttaş iletkenliğini bertaraf etmek için ICP-PECVD ile silikon dioksit pasivizasyon tabakası kaplanmış ve mikrofabrikasyon yöntemleri kullanılarak krom üzerine altın elektrot desenleri oluşturulmuştur. İncefilm kaplamaları yüzey profilometresi, elipsometre ve XRD ile karakterize edilmiş olup, üretim sonrası yapılan EDS analizi ile hedeflenen malzeme bölgeleri teyit edilmiştir.

Üretilmiş olan gaz sensörleri atmosfer ve 80 SCCM karbonmonoksit gaz akışı altında elektriksel olarak test edilmiştir. Elektrot arası mesafeye göre farklı tip tasarlanmış sensörlerin duyarlılık ve tepki süreleri karşılaştırılmıştır. 2, 4, 6, 8, 16, 32, 48 mikronluk mesafeye sahip elektrotlar ile aynı birim alana sahip dairesel, paralel ve karesel yapıdaki sensörler karakterize edilmiştir. Üretilmiş olan gaz sensörleri içerisinde, en düşük direnç ve en hızlı doyum süresine sahip olan sensör grubu, en az elektrot mesafesine sahip olan 2 mikron aralıklı tasarım olarak belirlenmiştir. Sensörlerde elektrotlar arasında kalan yüzey alanı artış gösterdikçe, sensörlerin doyum süreleri paralel olarak artış göstermektedir.

Yapılan çalışma bizlere, güç tüketiminin kritik olduğu mobil uygulama alanlarında sensör baz dirençlerine bağlı olarak düşük dirençlere sahip sensörlerin (düşük elektrot aralıklı) enerji verimliliği bakımından avantaj sağlayacağını ortaya koymaktadır. İleride yapılması planlanan çalışmalarda ise bu elektrot arası mesafenin nano fabrikasyon yöntemleriyle ve elektron demeti litografi sistemi kullanılarak, nanometre boyutuna düşürülerek incelenmesi planlanmaktadır.

KAYNAKÇA

- Aghababazadeh, R., Mazinani, B., Mirhabibi, A., & Tamizifar, M. (2006, Şubat 22). ZnO Nanoparticles Synthesised by mechanochemical processing. *Journal of Physics: Conference Series*, s. 312.
- Bochenkov, V., & Sergeev, G. (2010). Sensitivity, Selectivity, and Stability of Gas-Sensitive Metal-Oxide Nanostructures. A. Umar, & Y.-B. Hahn içinde, *Metal Oxide Nanostructures and Their Applications* (s. 31-52). American Scientific Publishers .
- Brattain, W. (1953, Ocak). Surface properties of germanium. *Nokia Bell Labs*, s. 1 - 41.
- Casey, P. (2006). Nanostructure control of materials. R. Hannink, & A. Hill içinde, *Nanostructure control of materials* (s. 1-27). Cambridge, England: Woodhead publishing in materials.
- Chavali, M., & Nikolova, M. (2019, haziran 20). Metal oxide nanoparticles and their applications in nanotechnology. *SN Applied Sciences*, s. 607.
- Chowdhury, N., & Bhowmik, B. (2021, mart). Micro/nanostructured gas sensors: The physics behind the nanostructure growth, sensing and selectivity mechanisms. *Nanoscale Advances*, s. 73-93.
- Çiftyürek, E., Sabolsky, K., & Sabolsky, E. (2016, Aralık 1). Molybdenum and tungsten oxide based gas sensors for high temperature detection of environmentally hazardous sulfur species. *Sensors and Actuators B: Chemical*, s. 262-274.
- Dey, A. (2018). Semiconductor metal oxide gas sensors: A review. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 206-217.
- Eranna, G., Joshi, B., Runthala, D., & Gupta, R. (2004). Oxide materials for development of integrated gas sensors - A comprehensive review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, s. 111-188.
- Göpel, W., Jones, T., Kleitz, M., Lundstrom, J., & Seiyama, T. (1991). *Sensors: Chemical and Biochemical Sensors - Part I, Volume 2*. Wiley.
- Heiland, G. (1954, Haziran). Zum Einfluß von adsorbiertem Sauerstoff auf die elektrische Leitfähigkeit von Zinkoxydkristallen. *Zeitschrift für Physik*, s. 459-464.
- Hierlemann, A., Brand, O., Hagleitner, C., & Baltes, H. (2003). Microfabrication techniques for chemical/biosensors. *Proceedings of the IEEE*, s. 839-863.
- Ji, H., Zeng, W., & Li, Y. (2019, Aralık 5). Gas sensing mechanisms of metal oxide semiconductors: A focus review. *Nanoscale*, s. 22664-22684.
- Kim, I.-D., Rothschild, A., & Tuller, H. (2013, şubat 1). Advances and new directions in gas-sensing devices. *Acta Materialia*, s. 974-1000.
- Korotcenkov, G., & Cho. (2009, Ekim 12). Thin film SnO₂-based gas sensors: Film thickness influence. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, s. 321-330.
- Korotcenkov, G., & Cho, B. (2017, Haziran). Metal oxide composites in conductometric gas sensors: Achievements and challenges. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, s. 182-210.

- Leschkies, K., Divakar, R., Basu, J., Enache-Pommer, E., Boercker, J., Carter, C., . . . Aydil, E. (2007, haziran). Photosensitization of ZnO nanowires with CdSe quantum dots for photovoltaic devices. *Nano Letters*, s. 1793-1798.
- Madou, M., & Morrison, S. (1989). *Chemical sensing with solid state devices*. Boston: Academic press.
- Manginell, R., Smith, J., & Ricco, A. (1997). Overview of micromachined platforms for thermal sensing and gas detection. *Smart Structures and Materials 1997: Smart Electronics and MEMS* (s. 273-284). San Fransisco: SPIE.
- Miekisch, W., Schubert, J., & Noeldge-Schomburg, G. (2004, Eylül). Diagnostic potential of breath analysis--focus on volatile organic compounds. *Clinica chimica acta; international journal of clinical chemistry*, s. 25-39.
- Miller, D., Akbar, S., & Morris, P. (2014, Aralık 1). Nanoscale metal oxide-based heterojunctions for gas sensing: A review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, s. 250-272.
- Min, Y. (2003). *Properties and Sensor Performance of Zinc Oxide Thin Films*. Massachusetts Institute of Technology.
- Moseley , P., & Tofield, B. (January 1, 1987). *Solid State Gas Sensors, (Adam Hilger Series on Sensors)*. Philadelphia: CRC Press.
- Moseley, P., & Tofield, B. (1987). *Solid State Gas Sensors, (Adam Hilger Series on Sensors)*. Philadelphia: CRC Press.
- Mustapha, S., Ndamitso, M., Abdulkareem, A., Tijani, J., Shuaib, D., Mohammed, A., & Sumaila, A. (2019, Kasım 14). Comparative study of crystallite size using Williamson-Hall and Debye-Scherrer plots for ZnO nanoparticles. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, s. 045013.
- Nanto, H., Minami, T., & Takata, S. (1986). Zinc oxide thin film ammonia gas sensors with high sensitivity and excellent selectivity. *Journal of Applied Physics*, s. 482-484.
- Nanto, H., Sokoosh, H., & Usuda, T. (1993). Smell sensor using aluminum-doped zinc oxide thin film prepared by sputtering technique. *Sensors and Actuators B*, s. 79-83.
- Nasiri, N., & Clarke, C. (2019, Ocak). Nanostructured Chemiresistive Gas Sensors for Medical Applications. *Sensors*, s. 462.
- Nikolic, M., Milovanovic, V., Vasiljevic, Z., & Stamenkovic, Z. (2020). Semiconductor Gas Sensors: Materials, Technology, Design, and Application. *Sensors*, s. 6694.
- Rao, G., & Rao, D. (1999). Gas sensitivity of ZnO based thick film sensor to NH₃ at room temperature. *Sensors and Actuators*, s. 166-169.
- Schmidt-Mende, L., & MacManus-Driscoll, J. (2007, Mayıs). ZnO – nanostructures, defects, and devices. *Materials Today*, s. 40-48.
- Seiyama, T., Kato, A., Fujiishi, K., & Nagatani, M. (1962). A New Detector for Gaseous Components Using Semiconductive Thin Films. *Analytical Chemistry*, s. 1502-1503.

- Shawky, M., Elsayed, E., & Ahmed, I. (2016). A Study on Synthesis and Characterization of Some (I -IV -VI) Groups Compounds for Solar Cells Energy Application For Partial Fulfillment of the Requirements for The Master Degree of science in Chemistry (Physical Chemistry) The Former CMRDI President.
- Shinde, V., Gujar, T., & Lokhande, C. (2007, Mayıs 21). Enhanced response of porous ZnO nanobeads towards LPG: Effect of Pd sensitization. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, s. 701-706.
- Sun, Y.-F., Liu, S.-B., Meng, F.-L., Liu, J.-Y., Jin, Z., Kong, L.-T., & Liu, J.-H. (2012, Şubat 27). Metal oxide nanostructures and their gas sensing properties: A review. *Sensors*, s. 2610-2631.
- Swihart, M. (2003, mart 1). Vapor-phase synthesis of nanoparticles. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, s. 127-133.
- Wang, C., Yin, L., Zhang, L., Xiang, D., & Gao, R. (2010, Mart 15). Metal Oxide Gas Sensors: Sensitivity and Influencing Factors. *Sensors*, s. 2088-2106.
- Yamauchi, S. (1992). *Chemical Sensor Technology, Volume 4*. Amsterdam - London-New York - Tokyo: KODANSHA LTD., ELSEVIER.
- Yürekli, A. (2019). Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, 1-12.
- http-1:** <https://www.jawoollam.com/> (Erişim tarihi:22.05.2022)

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0002-4094-4036

Ad Soyad :Seçkin AKINCI

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2012, Anadolu Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik
- 2015, ARGE mühendisi, ERMAKSAN A.Ş., ARGE Departmanı
- 2017, Temizoda Fabrikasyon Takım Lideri, ERMAKSAN A.Ş., ARGE Departmanı
- 2020, Temizoda Mühendisi, Koç Üniversitesi, VPRD
- 2022, Mikro & Nano Fabrikasyon Takım Lideri, Koç Üniversitesi, n2STAR

Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- Toymuş A., Javad M., Akinci S., Pala S., Beker, L. (2022). Design and fabrication of a PVDF - TrFE based piezoelectric micromachined ultrasonic transducer with acoustic cavity. IEEE International Ultrasonics Symposium, 1-3.