



**Pt KATKILI SNO₂ NANOYAPILARININ BÜYÜTÜLMESİ VE GAZ
SENSÖRÜ GELİŞTİRİLMESİ**

Burak KORKMAZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2019

Burak KORKMAZ tarafından hazırlanan “Pt KATKILI SnO₂ NANOYAPILARININ BÜYÜTÜLMESİ VE GAZ SENSÖRÜ GELİŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Fizik Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Abdullah CEYLAN

Fizik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Mustafa Kemal ÖZTÜRK

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 16/09/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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.

Burak KORKMAZ
16/09/2019

Pt KATKILI SnO₂ NANOYAPILARININ BÜYÜTÜLMESİ VE GAZ SENSÖRÜ GELİŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Burak KORKMAZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2019

ÖZET

Bu tez çalışmasında, RF magnetron püskürtme tekniği ile farklı güç değerlerinde n-tipi silikon (Si) ve cam alttaşlar üzerine Pt katkılı SnO₂ ince filmler biriktirildi. Üretilen ince filmler sırasıyla, CTS110, CTS111 ve CTS112 olarak isimlendirildi. n-tipi Si ve cam alttaşlar üzerine biriktirilen Pt katkılı SnO₂ ince filmlerin, yapısal, morfolojik, optik özellikleri incelendi. İnce filmlerin yapısal analizleri x-ışını kırınımı cihazı ile ölçüldü. n-tipi Si üzerine biriktirilen filmlerin amorf yapıda olduğu görüldü. Filmlerin yüzey analizleri Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ölçümleri ile belirlendi ve filmlerin yüzey pürüzlülük değerleri hesaplandı. Cam alttaşlar üzerine biriktirilen Pt katkılı SnO₂ numunelerin optik geçirgenlikleri UV-Vis spektrometre ile analiz ölçüldü. Geliştirilen ince filmlerin, CTS110, CTS111 ve CTS112, optik soğurma spektrumundan yasak enerji aralığı değerleri sırasıyla, 3,87 eV, 3,76 eV ve 3,71 eV olarak hesaplandı. Bu değerlerin literatür değerleri ile uyumlu olduğu görüldü. Üretilen ince filmlerden, CTS111 ve CTS112 numunelerinden, Pt katkılı SnO₂ bazlı gaz sensörü geliştirilerek, sensörün bütan gazına duyarlılığı ölçüldü. 5 mm x 5 mm boyutunda Al₂O₃ alttaşlar üzerine fotolitografik teknikle, arka yüzeyine Pt hedef ile RF püskürtme tekniği yardımıyla 1000 nm kalınlıkta ısıtıcı fabrikasyonu yapıldı. Ön yüzeyine ise 500 nm kalınlığında, 50 µm çizgi genişliğinde Pt inter dijital elektrotlar oluşturuldu. Elektrotların üzerine 100 nm kalınlıklı Pt katkılı SnO₂ filmleri kaplanarak sensörlerin üretimi gerçekleştirildi. 100 °C ve 300 °C çalışma sıcaklığında bütan gazı altında sensörlerin gaz algılama özellikleri incelendi. Elde edilen duyarlılık ve tepki süreleri değerlendirildiğinde, üretilen Pt katkılı SnO₂ gaz sensörlerinin, uygulamada kullanılabilir olduğu görüldü.

Bilim Kodu : 20227

Anahtar Kelimeler : RF magnetron, Pt katkılı SnO₂, bütan, gaz sensörü

Sayfa Adedi : 55

Danışman : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

GROWTH OF Pt DOPED SnO₂ NANOSTRUCTURES AND DEVELOPMENT OF GAS SENSOR

(M. Sc. Thesis)

Burak KORKMAZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2019

ABSTRACT

In this thesis, Pt doped SnO₂ thin films were deposited onto n-type silicon (Si) and glass substrates at different powers by using RF magnetron sputtering technique. The thin films deposited were named CTS110, CTS111 and CTS112, respectively. Structural, morphological and optical properties of Pt doped SnO₂ thin films deposited on n-type Si and glass substrates were investigated. Structural analyzes of thin films were carried out by using XRD measurements. The films deposited on n-type Si were found to be amorphous. Surface analyzes of the films were determined by Atomic Force Microscopy (AFM) measurements and surface roughness of the films were calculated. The optical properties of Pt doped SnO₂ thin films, CTS110, CTS111 and CTS112, deposited on glass substrates were analyzed by UV-Vis spectrometer. Bandgap energies of the films were calculated from optical absorption spectra as 3,87 eV, 3,76 eV and 3,71 eV, respectively. These values were found to be consistent with the literature values. Pt-doped SnO₂ gas sensors were fabricated by photolithographic technique on 5 mm x 5 mm Al₂O₃ substrates as follows: Firstly, a heater having 1000 nm thickness on the rear side of the substrate was produced with RF sputtered of Pt. Secondly, interdigital electrodes with 500 nm thickness and 50 µm line width were deposited on the front surface of the substrate. After that, the sensors were produced by coating 100 nm Pt doped SnO₂ films on the electrodes. Gas sensing properties of the sensors under butane gas at 100 °C and 300 °C operating temperature were examined. As a result of the sensitivity and response times obtained, SnO₂ gas sensors with Pt doped were found to be usable in application area.

Science Code : 20227

Key Words : RF magnetron, Pt-doped SnO₂, butane, gas sensor

Page Number : 55

Supervisor : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

TEŞEKKÜR

Yüksek lisansım boyunca beni her konuda destekleyen ve yardımlarını esirgemeyen, benim için çok kıymetli Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nin müdürü, danışman hocam sayın Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e,

Tez çalışmalarım sırasında yardımlarıyla desteklerini bir an olsun esirgemeyen, sayın Doç. Dr. Tarık ASAR hocama, çalışma arkadaşlarım Dr. Ü. Ceren BAŞKÖSE, Halil İbrahim EFKERE, Gürkan KURTULUŞ, Ali Emre GÜMRÜKÇÜ ve Ömer AKPINAR'a ve Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde çalışan tüm ekip arkadaşlarımın her birine,

Bütün eğitim-öğretim hayatım süresince beni her konuda destekleyen aileme,

Hayatıma girdiği günden beri bana hep şans getiren, beni bir an olsun yalnız bırakmayan, desteğini sonuna kadar hissettiğim sevgili eşim Fatma BADEM KORKMAZ' a

Tüm destek ve emekleri için şükran dolusu teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, 2016K121220 nolu proje kapsamında yürütülen tez çalışmama sağladığı destekten dolayı Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı'na teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİ	3
2.1. Yarıiletkenler.....	3
2.2. Yarıiletken Tipleri	5
2.2.1. Katkısız (saf) yarıiletkenler.....	5
2.2.2. Katkılı yarıiletkenler	5
2.3. Yarıiletkenlerin Elektriksel İletkenliği	8
2.4. Metal Oksit Yarıiletkenler.....	9
2.5. SnO ₂ 'nin Kristal Yapısı.....	9
2.6. SnO ₂ 'nin Kullanım Alanları	12
2.7. Metal Oksit Gaz Sensörleri	13
3. KULLANILAN DENEYSEL SİSTEMLER.....	15
3.1. Eş Püskürtme Sistemi.....	15
3.2. Fabrikasyon İşlemleri.....	16
3.2.1. Dönel kaplama sistemi	16

	Sayfa
3.2.2. Maske hizalama (fotolitografi) sistemi	17
3.3. X Işını Kırınımı Tekniği	18
3.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)	19
3.5. UV-Vis Spektroskopisi	20
3.6. Gaz Sensör Test Sistemi.....	21
4. NUMUNELERİN BÜYÜTÜLMESİ, KARAKTERİZASYONLARI VE FABRİKASYON İŞLEMLERİ: BULGULAR VE TARTIŞMA	23
4.1. Pt:SnO ₂ İnce Filmlerin Üretimi	23
4.2. Pt:SnO ₂ İnce Filmlerin Karakterizasyonları	24
4.2.1. XRD analizleri	25
4.2.2. AFM analizleri	29
4.2.3. Geçirgenlik ölçümleri ve enerji bant aralığı analizleri.....	31
4.3. Pt:SnO ₂ Gaz Sensör Fabrikasyonu	33
4.3.1. Litografik teknikler	33
4.3.2. Gaz sensör karakterizasyonları	37
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	47
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	55

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Pt:SnO ₂ ince film kaplama parametreleri	24
Çizelge 4.2. Numunelerin yapısal parametreleri.....	28
Çizelge 4.3. Yüzey Pürüzlülük Değerleri	29
Çizelge 4.4. Numunelerin bant aralığı değerleri	32
Çizelge 4.5. Arka ısıtıcı kaplama parametreleri.....	35
Çizelge 4.6. İnterdijital elektrotların oluşturulması parametreleri	36
Çizelge 4.7. Sensör kaplama parametreleri.....	36

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Yalıtkan, yarıiletken ve iletkenlerde bant yapıları.....	4
Şekil 2.2. Katkısız ve katkılı yarıiletkenlerde Fermi Enerji seviyesi konumları	5
Şekil 2.3. (a) Silikon kristalinde verici atom safsızlığı, (b) n-tipi yarıiletkende verici (E _a) ve fermi (E _F) seviyeleri.....	6
Şekil 2.4. (a) Silikon kristalinde alıcı atom safsızlığı, (b) p-tipi yarıiletkende alıcı (E _a) ve fermi (E _F) seviyeleri	7
Şekil 2.5. SnO ₂ 'nin kristal yapısı.....	11
Şekil 3.1. Kristal düzlemlerinde x-ışınlarının saçılması	19
Şekil 4.1. Numunelerin XRD desenleri	27
Şekil 4.2. Numunelerin FWHM ve tanecik boyutu değerleri	28
Şekil 4.3. Filmlerin optik geçirgenlik grafiği.....	31
Şekil 4.4. ($\alpha \cdot hv$) ² 'nin foton enerjisine göre değişim grafiği	32
Şekil 4.5. Isıtıcının akım gerilim grafiği.....	37
Şekil 4.6. Isıtıcının güç gerilim grafiği	38
Şekil 4.7. Isıtıcının sıcaklık-gerilim grafiği	38
Şekil 4.8. Sensör-1 için 100 °C'de hava, 5-10-15 sscm gaz miktarları için ölçülen akım gerilim değişimi.....	39
Şekil 4.9. Sensör-1 için 300 °C'de hava, 5-10-15 sscm gaz miktarları için ölçülen akım gerilim değişimi.....	40
Şekil 4.10. Sensör-2 için 100 °C'de hava, 5-10-15 sscm gaz miktarları için ölçülen akım gerilim değişimi	40
Şekil 4.11. Sensör-2 için 300 °C'de hava, 5-10-15 sscm gaz miktarları için ölçülen akım gerilim değişimi	41
Şekil 4.12. Sensör-1 için 100 °C'de hava, 5-10-15 sscm gaz miktarları için ölçülen direnç gerilim değişimi	42
Şekil 4.13. Sensör-1 için 300 °C'de hava, 5-10-15 sscm gaz miktarları için ölçülen direnç gerilim değişimi	42

Şekil	Sayfa
Şekil 4.14. Sensör-2 için 100 °C’de hava, 5-10-15 sscm gaz miktarları için ölçülen direnç gerilim değişimi.....	43
Şekil 4.15. Sensör-2 için 300 °C’de hava, 5-10-15 sscm gaz miktarları için ölçülen direnç gerilim değişimi.....	43
Şekil 4.16. Sensör-1 ve Sensör-2’nin farklı sıcaklıklarda 5 V’deki gaz konsantrasyonuna bağlı duyarlılık grafiği	44
Şekil 4.17. Sensörlerin 10 sscm bütan gazına duyarlılığı	45

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Toz haldeki SnO ₂	10
Resim 3.1. Nanovak NVTS-500 eş püskürtme sistemi.....	16
Resim 3.2. Dönel kaplama (spin coater) sistemi.....	17
Resim 3.3. SUSS Micro Tech-MJB4 maske hizalama sistemi.....	17
Resim 3.4. APD 2000 Pro XRD cihazı.....	18
Resim 3.5. Atomik Kuvvet Mikroskobu.....	20
Resim 3.6. Perkin Elmer UV Visible spektrometre	20
Resim 3.7. Gaz sensör test sistemi.....	21
Resim 3.8. Gaz sensör test sisteminde kullanılan yardımcı ekipmanlar.....	21
Resim 4.1. Pt:SnO ₂ ince filmlerin görüntüleri	23
Resim 4.2. Veeco-Dektak 150 yüzey profilometresi	24
Resim 4.3. Üretilen CTS110 CTS11 ve CTS112 filmlerinin AFM görüntüleri.....	30
Resim 4.4. Pt kaplanmış ısıtıcı yüzey	35
Resim 4.5. Pt kaplanmış ısıtıcı yüzey	36

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
SnO₂	Kalay dioksit
Pt	Platin
eV	Elektronvolt
Au	Altın
SnO	Kalay oksit
gr	gram
Sn	Kalay
P	Fosfor
As	Arsenik
Sb	Antimon
Al	Alüminyum
In	İndiyum
Ge	Germanyum
Si	Silisyum
Ar	Argon
Å	Angström
E_d	Donör Enerjisi
E_a	Akseptör Enerjisi
E_F	Fermi Enerji Seviyesi
a,b,c	Örgü parametreleri
mbar	milibar
Al₂O₃	Alüminyum oksit
Hg	Civa
d	düzlemler arası mesafe
n	kırınım derecesi

Simgeler**Açıklamalar** θ

kırınım açısı

 λ

dalga boyu

Kısaltmalar**Açıklamalar****AFM**

Atomik Kuvvet Mikroskobu

CVD

Kimyasal Buhar Depolama

DC

Doğru Akım

LPG

Sıvılaştırılmış Petrol Gazı

PVD

Fiziksel Buhar Depolama

RF

Radyo Frekansı

UV

Ultraviyole

Vis

Visible

XRD

X-Işını Kırınımı

1. GİRİŞ

Yarıiletken ince filmler, 20. yüzyıldan beri çalışılan ve araştırmalar sonucu geliştirilmeye devam edilen optoelektronik ve elektronik aygıtlar, sivil, askeri ve uzay teknolojileri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Yarıiletken ince filmlerin birçok üretim tekniği ortaya konmuş ve buna bağlı olarak uygulama alanları genişletilmiştir. Gelişen yarıiletken ince film malzemeler, gaz sensörleri, Li-iyon piller, fotovoltaiik güneş hücreleri gibi birçok aygıtta kullanılmıştır [1].

Yarıiletken ince filmlerin yasak enerji aralıkları, ilgili teknoloji de kullanım alanını belirlemeye yarayan en önemli niteliğidir. Metal oksit yarıiletken ince filmler geniş yasak enerji aralığına sahip malzemelerdir [2]. Literatürde en çok araştırılan metal oksitler SnO_2 , ITO, ZnO gibi bileşiklerdir. Metal oksit malzemeler, ayarlanabilir yasak enerji aralığına sahip olmaları nedeniyle, metal oksit sensör uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tür sensörlerin en çok tercih edilme nedenleri arasında yüksek duyarlılık, düşük maliyete sahip olmaları ve hızlı cevap verebilme özellikleridir [3]. Ayrıca bu sensörler organik molekül algılama konusunda tıp alanında da biyosensör olarak çok tercih edilmektedir [4].

Gaz sensörü uygulamalarında kullanılan metal oksit yarıiletken malzemeler, birçok yöntem ile üretilmektedir. Bunlar içerisinde püskürtme yöntemi, ucuz maliyetli bir yöntem olmakla birlikte homojen bir kaplama imkânı sağlar. Ayrıca, bu yöntem, yüksek saflıkta katkılama yapmak gibi bir avantaja da sahiptir.

SnO_2 , TiO_2 , In_2O_3 gibi metal oksit malzemeler kullanılarak üretilen, gaz sensörleri, atmosferde bulunan zehirli ve zararlı gazları algılamada ve kontrol edilme hususunda önemli rol oynamaktadır. Yapılan çalışmalar arasında sensör verimi en yüksek malzemeler SnO_2 , TiO_2 , In_2O_3 olduğu görülmüştür [5]. Bunlar içerisinde ise en fazla gaza duyarlılığı olan SnO_2 gaz sensörüdür. Bu sensör, hava ortamında test edildiğinde, havada bulunan oksijen molekülleri kalay oksit yüzeyi tarafından tuzaklanır ve oksijen molekülü iyonlaşır (O_2^- , O^- , O^{2-}). Yüzeye yakın olan kısımlardaki yük taşıyıcılarının sayısı artarak bir tüketim bölgesi oluşur. Bu durumda SnO_2 gaz sensörü, etanol buharı gibi bir gaz altında bırakıldığında, iyonlaşmış oksijene sahip tüketim bölgesi etkileşir. Bu etkileşme indirgeyici gazın oksitlenmesi sonucunu doğurur. Bu oksitlenme olayı, SnO_2 yüzeyinde bulunan oksijen

iyonlarının ayrılmasına ve bariyer yüksekliğinin azalmasına sebep olur. Azalan bariyer yüksekliği, iletkenliğin artmasına sebep olur. İletkenlikte ve bariyer yüksekliğindeki bu değişim, elektronik düzenekler sayesinde algılanır. Bu değişim elektronik devreler tarafından sesli ya da görüntülü ikaz ile algılanır [6,7].

Bu tez çalışmasında, farklı oranlarda Pt ile katkılanan SnO_2 ince filmleri kullanılarak gaz sensörleri geliştirildi. Yarıiletken malzemeler ve metal oksit malzemelerin temel özellikleri ve özel olarak da kalay oksit bileşiğinin özellikleri, tezin ikinci bölümünde tanıtıldı. Kalay oksit ince film malzemesinin üretim yöntemleri ve kullanım alanları üzerinde duruldu. Pt katkılı SnO_2 (Pt:SnO_2) ince filmlerinin üretimi ve karakterizasyonları için kullanılan deneysel sistemler üçüncü bölümde sunuldu. Tezin son kısmı olan dördüncü bölüme Pt katkılı SnO_2 ince filmlerinin büyütme parametreleri, sensör fabrikasyon işlemleri, yapılan karakterizasyonların sonuçları tartışıldı ve elde edilen sonuçlar literatür ile kıyaslandı.

2. TEORİK BİLGİ

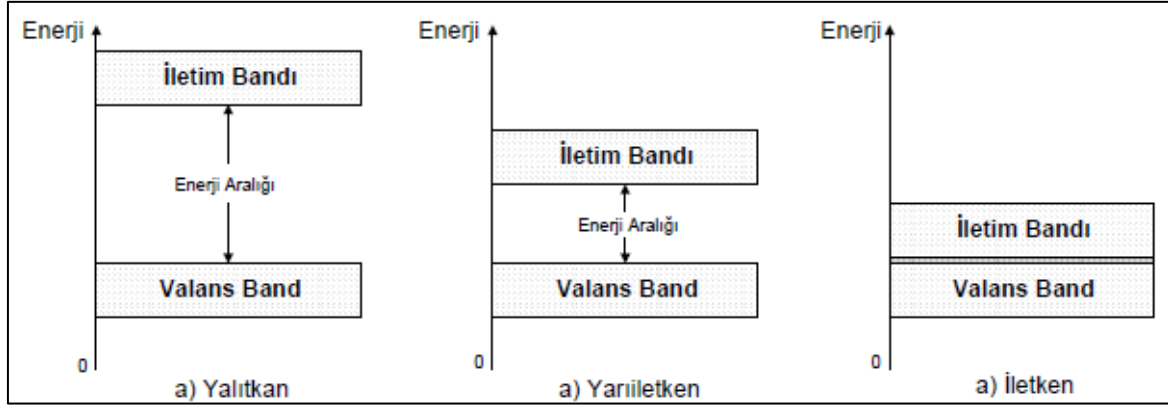
2.1. Yarıiletkenler

Yarıiletkenler, elektriksel iletkenlik özelliği bakımından, yalıtkanlar ve metaller arasında iletkenliğe sahip bir malzeme grubudur. Yarıiletken malzemeler, bir takım dış etkenler sayesinde iletkenliği değişiklik gösterir. Elektriksel özelliğin bu denli değişebilir olmasından dolayı, elektronik ve opto-elektronik alanda yarıiletkenler oldukça tercih edilir.

Yarıiletkenler, periyodik tablonun IV. ve onun komşusu gruplarda bulunur. Grup IV yarıiletkenleri, silisyum ve germanyum, tek tür atomlardan meydana geldiğinden saf yarıiletkenler olarak isimlendirilir. Saf yarıiletkenlere ek olarak grup III ve V atomlarının bileşiklerinin yanı sıra grup II ve VI dan ve grup IV den uygun bileşimler bileşik yarıiletkenleri oluşturur [8].

Yarıiletken malzemelerde izinli ve yasak bant olmak üzere iki farklı enerji bölgeleri bulunur. Bu bölgelerin oluşma nedeni kristal örgünün periyodikliğidir. İzinli bölgelerde elektronlar bulunurken, yasak bant da ise elektron bulunmaz. Yasak bandın üst ve alt kısımlarında izinli enerji bölgesi yer alır. Yasak bandın üstünde kalan ve serbest elektronların oluşturduğu enerji bölgesi iletkenlik, altında kalan ve bağlı elektronların oluşturduğu enerji bölgesi ise valans bandı olarak tanımlanır [9].

Mutlak sıfır sıcaklığında (0 K) tüm elektronlar valans bandındadır. Malzemeye uygulanan uygun bir potansiyel elektronları harekete geçirerek, iletkenlik bandında bulunan birçok boş seviyeye çıkarabilir. Bu olay yarıiletkenler içindir. Metallerde ise hemen hemen hiçbir etki olmaksızın elektronlar valans bandından iletkenlik bandına geçer ve iletim sağlanmış olur. Yalıtkanlar da ise durum tamamen farklıdır. İletkenlik bandı ile valans bandı arası mesafe oldukça fazla olduğundan, uygulanacak herhangi bir dış etki ile elektron geçişi söz konusu değildir. Yalıtkan, metal ve yarıiletkenlerin bant yapıları Şekil 2.1' de verildi. Yarıiletkenlerin iletkenlik özelliği, sıcaklık, aydınlatma, manyetik alan, basınç ve safsızlık yoğunluğu gibi birçok dış etkene bağlıdır [9,10].

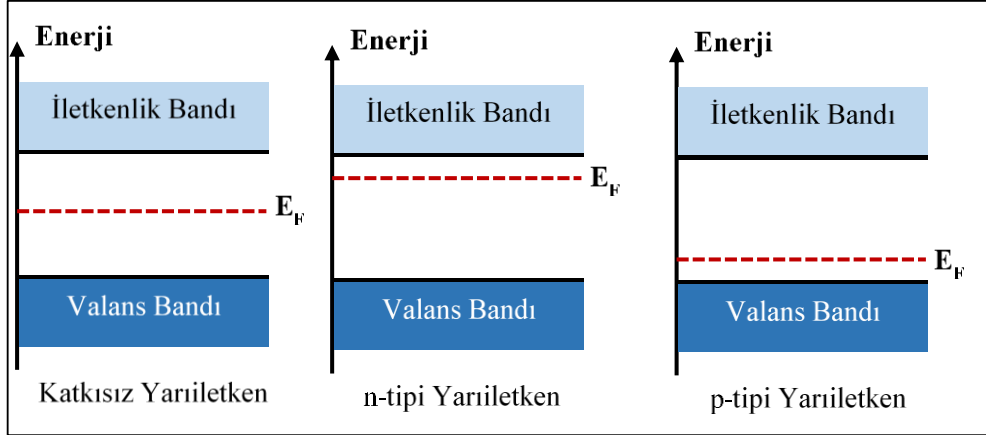


Şekil 2.1. Yalıtkan, yarıiletken ve iletkenlerde bant yapıları [16]

Bir yarıiletken malzemede iki tip katkılama vardır. Bunlar n ve p tipi katkılama olarak isimlendirilir. Katkılanan atomların iletkenlik bandında bulunan serbest elektronları vermesi ve valans bandında boşluklar oluşturması açısından n ve p tipi olarak adlandırılır.

n tipi katkılama, dört değerlikli Si örgüye, beş değerlikli verici atomlar P, As, yada Sb katkılanarak yapılır. Bu atomların değerlik elektron yerleşimi s^2p^3 tür, fakat bu beş elektrondan sadece dört elektronu, sp^3 hibritleşmesi oluşturarak katkı atomunu örgüye almaya yeterlidir. Geriye kalan elektron, katkı iyonuna gevşek bağlı kalır ve net bir pozitif yükü çeker [11].

Benzer şekilde, p tipi katkılama da Al, yada In gibi üç değerlikli alıcı atomlar için yapılır. Fermi enerjisi (E_F), mutlak sıfır sıcaklığında bir elektronun işgal edebileceği maksimum seviyenin enerjisidir. Katkısız yarıiletken malzemelerde Fermi seviyesi, iletkenlik bandı ile valans bandının tam ortasındadır [12]. Fermi seviyesi, p-tipi yarıiletkenlerde valans bandına yakın, n-tipi yarıiletkenlerde ise iletkenlik bandına yakın konumdadır. Yarıiletkenler malzemelerde Fermi seviyesi konumları Şekil 2.2’de verildi.



Şekil 2.2. Katkısız ve katkılı yarıiletkenlerde Fermi Enerji seviyesi konumları

2.2. Yarıiletken Tipleri

2.2.1. Katkısız (saf) yarıiletkenler

Mutlak sıfır sıcaklığında içerisinde katkı atomlarının bulunmadığı yarıiletkenlere katkısız ya da saf yarıiletkenler denir. Katkısız yarıiletkenler, içerisinde hem elektron hem de deşikler bulundurmaz. Başka bir deyişle elektron yoğunluğu boşluk yoğunluğuna eşittir ($n=p$). Elektronların dışarıdan gelen bir ısı aktivasyonu ile değerlik bandından iletkenlik bandına çıkması, iletkenlik bandında bir serbest elektron oluştururken, geride bıraktığı değerlik bandında da serbest boşluklar olmasına neden olur.

2.2.2. Katkılı yarıiletkenler

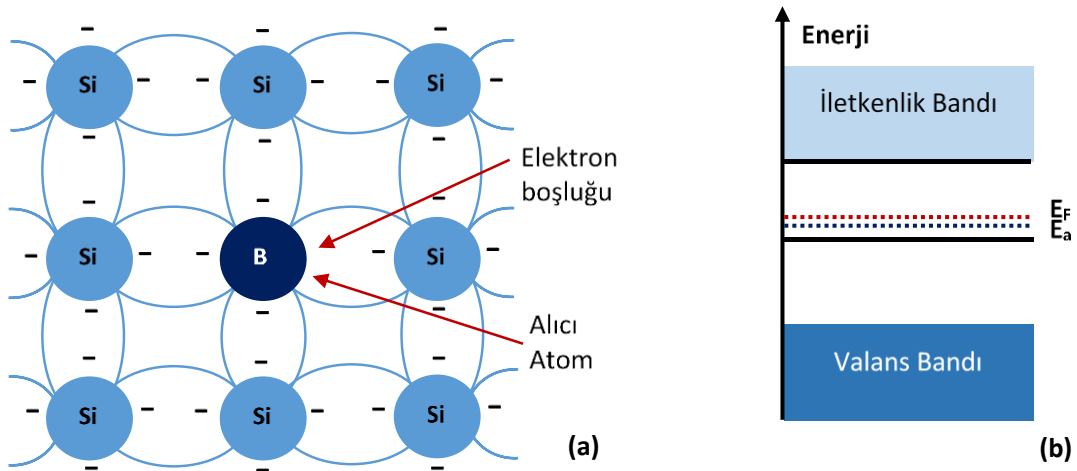
Katkılı yarıiletkenler, kristal yapı içerisinde safsızlık atomlarının bulunduğu yarıiletkenlerdir. Bu durum bazen serbest taşıyıcı oluşturmak için kasıtlı yapılabildiği gibi istemeden de yapılır. Serbest taşıyıcıların oluşturulması için sadece katkının bulunması yetmez, aynı anda katkı atomları verici (donör) olarak adlandırılan elektronların iletkenlik bandına aktarılması gerekmektedir. Eğer değerlik bandına boşluk veriliyorsa, bunlara alıcı (akseptör) denir.

İletkenlik özelliği verici katkısıyla karakterize edilmiş yarıiletkenlere n-tipi, alıcı katkısıyla karakterize edilmiş yarıiletkenlere ise p-tipi yarıiletken denir.

p-tipi yarıiletkenler

Pozitif yük taşıyıcıları olarak isimlendirilen, deşikleri üreten katkı atomları alıcı olarak bilinir ve bu atomlar ile katkılanmış yarıiletkenler de p-tipi yarıiletken olarak adlandırılır. p-tipi yarıiletkenlerde deşik sayısı elektronlardan fazla olduğundan deşikler çoğunluk yük taşıyıcısı, elektronlarda azınlık yük taşıyıcısı olarak isimlendirilir.

n-tipi katkılı yarıiletkenlerde görüldüğü gibi farklı yarıiletkenleri de p-tipi yapabilmek için farklı alıcı atomlarıyla katkılamak gerekir. Örneğin periyodik tablonun IV. grubundaki Si ve Ge yarıiletkenleri için periyodik tablonun III. Grup elementleri alıcı atom olarak kullanılır. Periyodik tablonun III. Grup elementlerinden olan Bor (B), Si kristalini oluşturan dört değerlik elektronuna sahip Si atomları ile kovalent bağ oluşturmak için kristalden bir elektron alır. Her alıcı atom kristalden bir elektron aldığı için kristalde pozitif (+) yüklü deşiklerin yoğunluğu artmış olur (Şekil 2.4.a) [14].



Şekil 2.4. (a) Silikon kristalinde alıcı atom safsızlığı, (b) p-tipi yarıiletkende alıcı (E_a) ve fermi (E_F) seviyeleri [12]

Alıcı atomların yarıiletken kristalin bant yapısında oluşturduğu enerji düzeyi (E_a), yasak enerji aralığında ve valans bandının üzerinde yer alır. Bu tip yarıiletkenlerde, fermi seviyesi (E_F), valans bandına yaklaşır (Şekil 2.4.b).

2.3. Yarıiletkenlerin Elektriksel İletkenliği

Yarıiletkenlerde elektrik iletimi, uygulanan bir elektrik alan altında hem elektronların hem de deşiklerin hareketi ile meydana getirilir. Akımın yönü geleneksel olarak her zaman pozitif yüklerin akış yönü olarak alındığından dolayı, yarıiletkenlerdeki akım hem n-tipi hem de p-tipi yarıiletkenlerde deşiklerin akış yönünde olacaktır. Elektron akımı deşik akımı ile aynı doğrultuda olduğu için yarıiletkenin iletkenliği,

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_h = e(n_e\mu_e + n_h\mu_h) \quad (1.1)$$

ile verilir. Burada μ_e ve μ_h sırasıyla elektron ve deşik hareketliliğidir (mobilité)

$$n_e = N_e/V \quad \text{ve} \quad n_h = N_h/V \quad (1.2)$$

sırasıyla elektron ve deşik yoğunluklarını temsil eder. Özgün bir yarıiletken için,

$$n_e = n_h = n_i \quad (1.3)$$

eşitliği gibidir ve bu nedenle,

$$\sigma_i = n_i e (\mu_e + \mu_h) \quad (1.4)$$

$$\sigma_i = \frac{e}{4\pi^3} \left(\frac{2\pi(m_e^* m_h^*)^{1/2} k_B T}{\hbar^2} \right)^{3/2} e^{-E_g/2k_B T} (\mu_e + \mu_h) \quad (1.5)$$

olur. μ_h mobilitesi genellikle Eş. (1.5) parantez içerisindeki $T^{3/2}$ sıcaklık değişiminden daha çok üstel terimde bulunan sıcaklık değişiminden etkilenir. Bu sebepten, $\ln\sigma_i$ nin $1/T$ ye karşı çizimi $E_g/2k_B$ eğimine sahip bir doğru olacaktır. Eğer σ_i ye karşı $1/T$ eğrisinden eğim hesaplanırsa E_g nin doğru bir şekilde belirlenmesi mümkün olur. Katkılı durumda E_g yi E_D ile yer değiştirerek, yine Eş. (1.5)' e benzer bir formül elde edilir. Bu sebepten, düşük sıcaklıklarda, $\ln\sigma$ ya karşı $1/T$ eğrisi yine doğru bir çizgi olur. Bu doğru çizginin eğimi

safsızlık iyonlaşma enerjisi E_D yi verir. Çoğu yarıiletkenlerde, taşıyıcı saçılması termal (fonon) ve safsızlık saçılmasının bir kombinezonundan meydana gelir. Safsızlık saçılması düşük sıcaklıklarda daha etkili ise de daha yüksek sıcaklıklarda termal saçılma baskındır. Ara sıcaklık bölgesinde, bu saçılma mekanizmalarının ikisi de baskın (etkili) değildir. Bu olay, $\ln\sigma$ ya karşı $1/T$ grafiğinin ikinci bölgede doyma bölgesi olarak açıklanır [8].

2.4. Metal Oksit Yarıiletkenler

Metal oksit malzemeler, benzersiz kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptir. Bu malzemeler, geniş bant aralığına sahip (3,5 – 4 eV) yüksek elektriksel iletkenlik ve yüksek optik geçirgenlik gibi çok önemli özelliklere sahip malzemelerdir. Kalay oksit, titanyum oksit, tungsten oksit, bakır oksit, çinko oksit, indiyum oksit bir çok uygulamada öne çıkan malzemeler arasında yer alır.

Metal oksit ince filmlerin elektriksel, morfolojik ve optik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla, püskürtme, buharlaştırma, epitaksiyel büyütme, dönel kaplama, sol-jel gibi yöntemler kullanılır. Bu yöntemlerle elde edilen metal oksit ince filmler, güneş hücresi yapıları, diyotlar, gaz sensör yapıları, lityum-iyon piller, kızıl ötesi yansıtıcı olarak mimari camlar, ısıtıcı eleman olarak uçak camları gibi birçok kullanım alanına sahiptir [15].

2.5. SnO_2 'nin Kristal Yapısı

Doğa da kasiterit minerali olarak bulunan kalay (Sn) elementi, atom numarası 50, molekül ağırlığı 118,71 gr/mol 'dur. 231,93 °C ergime ve 2602 °C buharlaşma sıcaklıklarına sahiptir. İki allotropu bulunan kalay, 13,2 °C üzerinde β iken altında ise α fazında bulunur. β kalay, beyaz kalay olarak da bilinir. Beyaz kalay hacim merkezli tetragonal yapıdadır. α kalay da, gri kalay olarak bilinmektedir. Gri kalay, Ge ve Si' ye benzer ve kübik yapıya sahiptir. Kalay zehirli olmamakla birlikte oldukça da yumuşak bir elementtir [16].

Kalay metali iki çeşit bileşik oluşturur. Stanöz ve stanik kalay bileşiği. Her ikisi de stabil oksit formundadır. Stanöz oksit, SnO , mavi-siyah kristal bir üründür. Bu bileşen 385 °C sıcaklığa kadar termal olarak kararlıdır ve diğer formlara yani beyaz renkteki bir bileşen olan stanik oksite (SnO_2) dönüşür. Resim 2.1' de gösterilmiştir. Kimyasal endüstride, SnO

reaksiyonlar için kalay tuzu yapımında kullanılmaktadır. SnO_2 ise petrol endüstrisinde heterojenik oksitleme katalisti olarak popülerdir [17].



Resim 2.1. Toz haldeki SnO_2 [18]

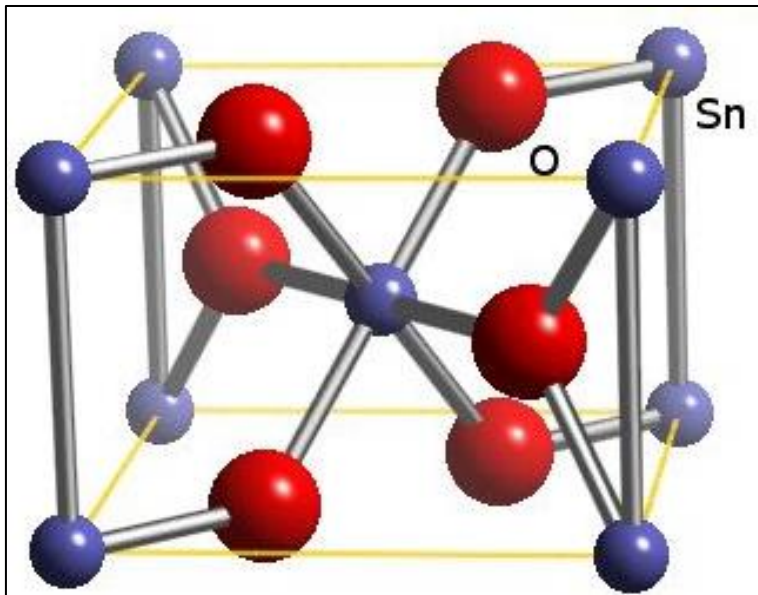
SnO_2 , çeşitli yarı iletken metal oksitler arasında şu ana kadar en çok çalışılan ve pratikte kullanılan gaz algılama materyalidir. SnO_2 bazlı sensörlerin gaz algılama özelliklerini geliştirmek amacıyla çok miktarda bilimsel çalışma yapılmıştır ve halen çok sayıda araştırma grubu bu materyal üzerine çalışmalar yapmaktadır. SnO_2 , tetragonal kristal geometrisinde kristalleşir ve titanyum dioksit (rutil) ile aynı yapıdadır. Her birim hücre, iki kalay ve dört oksijen atomundan oluşur. n-tipi SnO_2 genellikle transparan iletken olarak elektro-optik ve elektronik uygulamalarda kullanılmaktadır. Son kırk yıldır, gaz algılama sensörlerinde ve gaz sensör imalatında en çok araştırılan materyaldir. Bugünün ticari anlamda en kullanışlı gaz sensörleri, genellikle kalın, ince film ve gözenekli pelet formundaki SnO_2 ’den yapılmaktadır. Bu materyalin en çok bilinen avantajları arasında düşük maliyet, değişik türlerdeki gazlara olan yüksek hassasiyeti ve onları mikro imalatlı alt katmanlara entegre etmedeki küçültme kapasitesi yer almaktadır [19].

Saf formunda SnO_2 3.6 eV bant aralığı ile yarıiletkenidir. Gaz algılama özellikleri, stokiyometrik olmayan formda bile gözlenebilmektedir, SnO_x , x değeri 1 ile 2 arasında değişen. İyonik bir tabloda Sn^{2+} , $5s^2$ elektron kurulumuna sahiptir. SnO_2 ’nin kusursuz yüzeyinde kalay iyonları nominal Sn^{4+} durumundadır. İletim ve valans bantları, bu yüzeylerde, yani düz-bant durumundaki yüzeylerde bükülme göstermemektedir. Bu nedenle, bu yapının yüzey ve hacim materyalleri benzersiz öz direnç değerlerine sahiptir. SnO_2

yapıları içerisinde yüzeyi (110) olan yapı termodinamik açıdan en kararlı olandır. Bu yüzeyin, ana yüzey düzleminin üstünde yer alan oksijen iyonlarını köprüleme sebebiyle ilginç kusur özellikleri meydana gelmektedir. Bu oksijen iyonları, materyallerin yüksek derecelere kadar ısıtılması ile ya da yüksek enerji partikülü bombardımanları ile giderilebilmektedir [20].

Gaz moleküllerini yüzeye çekme ve yüzey reaksiyonlarını arttırma kapasitesinden dolayı, SnO_2 'nin gaz algılama materyalindeki mükemmel potansiyeli iyi bilinen bir gerçektir. Diğer taraftan, bu materyal çok sayıdaki gaz türlerine olan hassaslığı ile bilinen zayıf seçici yapısı ile de bilinmektedir.

Kalay oksit, 'stannic okside' olarak da isimlendirilir. Molekül ağırlığı 170,71 g/mol' dür. 3,6 eV gibi geniş bir bant aralığına sahip olan n-tipi bir yarıiletkenidir. Tetragonal rutil yapıda olan kalay oksit kafes yapısı 2 kalay 4 oksijen atomu içermektedir. Kalay atomu düzgün oktahedranların köşelerindeki 6 oksijen atomunun merkezindedir. Her oksijen atomu eşkenar üçgenin köşelerindeki 3 kalay atomu tarafından çevrelenmiştir. O-O mesafesi 4,6646 Å ve O-Sn mesafesi Å dur. Tetragonal yapı örgü parametreleri $a = b = 4,737$ Å ve $c = 3,187$ Å dur. Şekil 2.5. de tetragonal yapıdaki SnO_2 'nin kafes yapısı gösterilmiştir [21].



Şekil 2.5. SnO_2 'nin kristal yapısı [18]

SnO_2 bileşiği renksiz ve diyamanyetik bir yapıya sahiptir. SnO_2 metal oksit yarıiletkenleri, altın, bakır, platin, gibi metaller ile katkılındığı zaman daha yüksek elektriksel iletkenliğe, kimyasal etmenlere karşı daha yüksek dayanıklılığa, çeşitli camların yüzeylerine daha güçlü yapışma gibi mekanik özellikler gösterir. Ayrıca SnO_2 metal oksit yarıiletkenleri, elektriksel özdirenç bakımından düşük, optik özellik olarak görünür bölgede %70' den fazla geçirgenliğe, yüksek ısısal, kimyasal ve mekanik kararlılığa sahiptir. Mekanik olarak dayanıklı, kimyasal bakımdan da kararlı olan bu filmler yüksek sıcaklıklara karşı oldukça fazla dayanıklı malzemelerdir [22].

Üretimi yapılan SnO_2 metal oksit yarıiletken filmlerin yapısal, optik ve elektriksel özellikleri üretiminde kullanılan metot, büyütme parametreleri/şartları ve büyütme sonrası ısıtma şartlarına (sıcaklık, işlem gazı, vakum vb.) bağlı olarak değişkenlik gösterir.

2.6. SnO_2 ' nin Kullanım Alanları

Elektro-optik ve elektrokimyasal cihazlardaki ileriye yönelik uygulamalarından olan saydam iletken oksit materyaller büyük ilgi çekmektedir [23]. Bunlar arasında en çok kullanılan geniş bant aralığı (3.6 eV) oldukça yüksek, elektro iletkenlik (10^3 S/cm) gösteren n-tipi yarı iletken materyal olarak kullanılan SnO_2 'dir [24,25]. Aynı zamanda, SnO_2 yakın morötesi ışığa duyarlılık, görünür alanda iyi geçirgenlik, kızılötesi alanda yüksek yansıtıcılık, yüksek elektriksel iletkenlik, yüksek erime noktası, metal benzeri iletkenlik, zehir içermeme, kolay katkılanabilirlik, kolay işleme ve doğada bol bulunma gibi benzersiz özelliklere sahiptir [26,27]. Bu nedenle SnO_2 filmleri, güneş hücrelerinde şeffaf elektrot materyalleri [28], transistörler [29], düşük salınım diyotları [30], düz panel göstergeleri [31], gaz sensörleri [32], özel katalizörler [33], yoğun enerji depolama materyalleri [34], iletken filmler [35], yüksek performans kapasitörleri [36], dinamik rastgele erişimli bellekler (RAM) [37], şarj edilebilir lityum bataryalar [38], rezistanslar [39], saydam ısıtıcılar [40], elektrot seramikler [41] ve statik elektrik önleyici kaplamalar [42] gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır.

Rapor edilen sonuçlar açıkça göstermektedir ki, film ve cihazların özellikleri metot ve depolama koşullarından önemli ölçüde etkilenmektedir [43]. Bu sebepten dolayı depolama metot seçimi oldukça önemlidir. Literatüre bakıldığında, kimyasal buhar depolama [44], fiziksel buhar depolama [45], darbeli lazer depolama [46], spreyl piroliz [47], hidrotermal

metot [48], sol-jel metodu [49], buharlaştırma [50], beraber çöktürme [51] ve püskürtme [52] gibi birçok teknikle katkısız ve katkılı SnO_2 ince filmlerin elde edildiği görülmektedir.

2.7. Metal Oksit Gaz Sensörleri

Gaz algılama özelliği metal oksit malzemenin en önemli ve iyi bilinen bir özelliğidir. Metal oksit malzemelerden üretilen sensörler, kimyasal sensör olarakta adlandırılmaktadır. Foton enerjisine ve dış basınca duyarlılığa ek olarak, metal oksitler kimyasal çevrelerine karşı yüksek hassasiyet gösterirler. Kimyasal sensörler, zorlu ortamlarda çalışma kapasitesiyle, hassasiyetleri, güvenilirlikleri ve dayanıklılıklarıyla diğer sensör gruplarından bir adım önde bulunmaktadır. Bir sensör, algılama elemanlarının elektriksel özelliklerinde bir değişiklik olması nedeniyle gaz atmosferinde bir değişiklik tespit eder. Bir metal oksit üzerindeki bir katalitik reaksiyonun ve bir gaz algılama işleminin birbirine benzer olduğu, çünkü her iki işlemin de yüzeysel adsorpsiyonu ve çevresindeki gaz ortamı ile kimyasal reaksiyonu içerdiği bulunmuştur.

Metal oksit gaz sensörlerin seçicilik özelliğinin geliştirilmesi çalışmalarında, zaman zaman problemlerle karşılaşabilmektedir. Gaz sensörlerin seçiciliğini artırmak amacıyla, metal safsızlık katkılanması, elektriksel ölçümler, sıcaklık optimizasyonu ve yüzey kaplama vb. metotlar geliştirilmiştir.

Metal oksit gaz sensörleri, seçilmiş bir alttaş yüzeyine geliştirilen elektrotların üzerine metal oksit yarıiletken ince filmlerin biriktirilmesi ile oluşturulur. Oluşturulan film, bulunduğu ortamdaki gazların varlığını saptamaya yarar. Gaz sensörü üretimi açısından metal oksit malzemeler içerisinde SnO_2 , TiO_2 , WO_3 , V_2O_5 , CuO , Cr_2O_3 gibi metal oksitler düşük maliyetleri ve yüksek duyarlılıkları gibi avantajları sebebiyle sensör malzemesi olarak tercih edilirler: Bu malzemeler ile üretilen gaz sensörleri, Çizelge 2.1’de görüldüğü gibi, karbonmonoksit (CO), karbondioksit (CO_2), metan (CH_4), etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), propan (C_3H_8), hidrojen (H_2), hidrojen sülfür (H_2S), amonyak (NH_3), azot oksit (NO), azot dioksit (NO_2), oksijen (O_2), ozon (O_3), kükürt dioksit (SO_2), aseton ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$), dimethylamine ($\text{C}_2\text{H}_7\text{N}$) (DMA), nem, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), trimethylamine ($\text{C}_3\text{H}_9\text{N}$) (TMA), duman ve diğer birçok gazı algılayabilmektedir [53]. Çizelge 2.1’den görüldüğü üzere, SnO_2 metal oksit gaz sensörleri en fazla gaz türünün algılanmasında metal oksit gaz sensörü olarak kullanılabilir.

Çizelge 2.1. Farklı gaz türlerine karşı farklı metal oksit bileşiklerinin algılama hassasiyeti [10]

Gaz	Metal Oksit																					
	Al	Bi	Cd	Ce	Cr	Co	Cu	Ga	In	Fe	Mn	Mo	Ni	Nb	Ta	Sn	Ti	W	Zn	Zr	Mx	
Aseton (CH ₃ ·CO·CH ₃)			X							X				X		X			X			
Asetaldehid (CH ₃ CHO)																X						
Amonyak (NH ₃)					X	X		X	X			X	X	X		X	X	X	X		X	
Arsin (AsH ₃)																X						
Otomobil egzoz gazı								X								X					X	
Benzen (C ₆ H ₆)																X						
Bütan (C ₄ H ₁₀)	X							X	X	X						X			X			
Bütanol									X						X				X			
Karbon dioksit (CO ₂)	X	X	X	X	X	X	X			X			X			X	X		X	X	X	
Karbonmonoksit (CO)		X				X	X	X	X	X		X	X	X		X	X	X	X	X	X	
Klor (Cl)									X							X						
Dimetil disülfür																X			X			
Dimetilamin (DMA)									X						X		X	X	X			
Etan (C ₂ H ₆)																			X			
Etanol (C ₂ H ₅ OH)	X			X			X	X	X	X		X			X	X	X	X	X	X	X	
Nem (H ₂ O)	X									X	X					X		X	X		X	
Hidrokarbon (HC)																	X			X	X	
Hidrojen (H ₂)	X	X	X	X	X		X		X	X			X			X	X	X	X		X	
Hidrojen sülfür (H ₂ S)				X			X									X		X	X		X	
Parlayıcı gazlar																X						
Sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG)								X		X						X			X		X	
Metan (CH ₄)					X	X		X		X			X			X	X		X		X	
Metanol (CH ₃ OH)	X			X												X	X					
Metil merkaptan (CH ₃ SH)																X						
NO, NO ₂ ,NO _x					X	X		X	X	X		X	X			X	X	X	X	X	X	
Oksijen (O ₂)	X	X	X	X	X	X	X	X		X		X	X			X	X	X	X	X	X	
o-xylene (C ₈ H ₁₀)																X						
Ozon (O ₃)									X	X		X				X	X	X	X		X	
Petrol/Benzin																X		X	X			
Fosfin (PH ₃)																X						
Propan (C ₃ H ₈)						X		X	X	X						X			X			
Propanol (C ₃ H ₇ OH)									X						X		X		X			
Duman		X														X						
Sülfür dioksit (SO ₂)													X			X					X	
Trimethylamine (TMA)									X						X		X	X	X			

Ayrıca, metal oksit gaz sensörleri belirli çalışma sıcaklıklarında gaz algılamada kullanılmaktadır. Bu durum, bu türdeki gaz sensörlerinin bir dezavantajı olarak sayılır. Bununla birlikte bazı tür metal oksit sensörler düşük sıcaklıklarda gaz algılama özelliği gösterirken, bazı tür metal oksit sensörler de yüksek çalışma sıcaklıklarında gaz algılama özelliği gösterir. Sensörlerin uygun çalışma sıcaklığına sahip olmaları, genellikle, sensör yapısında bir ısıtıcı elemanın bulunması ile sağlanır. Isıtıcının elektriksel güç tüketimi de maliyet etkinlik açısından önem taşımaktadır.

3. KULLANILAN DENEYSEL SİSTEMLER

3.1. Eş Püskürtme Sistemi

Eş püskürtme (co-sputtering) sistemi tekniğinin temeli, yaygın olarak bilinen magnetron püskürtme sistemi ile aynı olan bir ince film kaplama tekniğidir. Sistemin magnetron püskürtme sisteminden farkı iki ya da daha fazla hedef materyalin aynı anda kullanılabilir olmasından dolayı “eş püskürtme” tekniği adını almıştır. İnce film üretiminde, metal katkılama ve alaşım oluşturmada verimli olarak kullanılır. Bu çalışma kapsamında Pt:SnO₂ ince filmler bu teknikle oluşturuldu. Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi (Gazi FOTONİK) bünyesinde bulunan NANOVAK NVTS-500 eş püskürtme sistemi iki RF ve bir DC güç kaynağına, içerisinde her biri 2 inch çapında üç adet hedef materyal bulundurabilen püskürtme kafalarına ve 4 inch çapında alttaşıyla birikim yapabilen kapasiteye sahiptir. Bu sistemin fotoğrafı Resim 3.1’ de verildi. Sistemin içerisinde bulunan 4 inch çapındaki alttaş tutucu dönme mekanizmasına sahiptir ve dönme hızı istenildiği gibi ayarlanabilir durumdadır. Püskürtme kafaları alttaş tutucuya istenilen uzaklık ve açılarla ayarlanabilme imkanına da sahiptir. Alttaş, rezistif bir ısıtıcı ile 600 °C’ye kadar ısıtılabilir. Sistem yaklaşık olarak 10⁻⁷ mbar vakum değerine ulaşılacak pompa sistemine sahiptir. Ayrıca sistemin bir sıvı azot haznesi bulunmakta ve hem kalıntı gazları soğuk duvar etkisiyle tuzaklayabilmekte hem de basıncın düşmesinde önemli rol oynamaktadır [54].

Bu çalışma da Pt:SnO₂ malzemeler, Pt ve SnO₂ hedeflerinin RF güç kaynağına bağlı püskürtme kafalarına yerleştirilmesiyle farklı güç değerlerinde istenilen oran ve kalınlıklarda katkılı ince filmler üretildi.



Resim 3.1. Nanovak NVTS-500 eş püskürtme sistemi

3.2. Fabrikasyon İşlemleri

Bu çalışmada üretilecek olan $Pt:SnO_2$ gaz sensörleri için özel üretilmiş ışığa duyarlı maskeler üzerindeki desenlerin Al_2O_3 taban malzemelerinin yüzeylerine aktarım işleminde Dönel Kaplama Sistemi ve Fotolitografi Sistemi kullanıldı. Elektrot malzemelerinin metal kaplamaları için ise yine Eş Püskürtme Sistemi kullanıldı.

3.2.1. Dönel kaplama sistemi

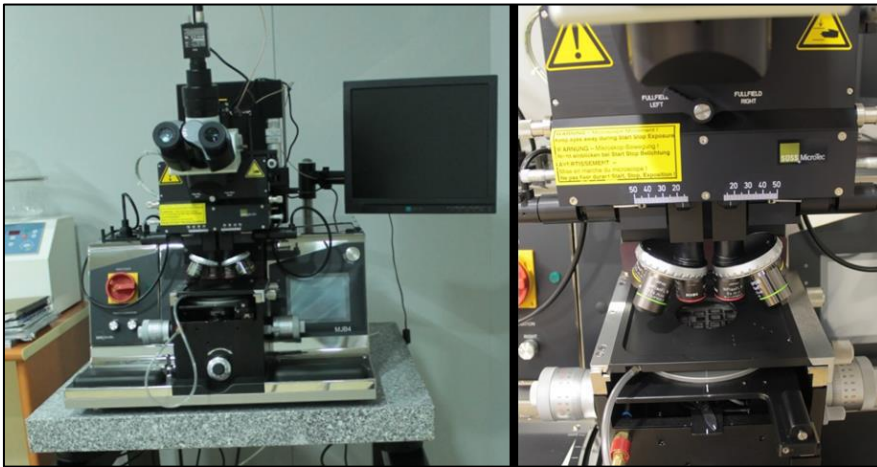
Resim 3.2' de gösterilen dönel kaplama sistemi, numunelerin üzerine akışkan malzemeleri damlatarak istenilen hızda döndürülür ve yüzeyde o malzemenin homojen bir şekilde dağılmasını sağlayarak kaplama yapabilmektedir. Üzerine koyulan numunenin sabit bir şekilde tutulabilmesi için bir mekanik pompa görev yapar. Bu çalışma da $Pt:SnO_2$ gaz sensörleri numunelerinin fabrikasyon işlemlerinin ilk aşaması olarak Al_2O_3 yüzeylerine homojen şekilde foto-direnç kaplanması dönel kaplama sistemi kullanılarak gerçekleştirildi.



Resim 3.2. Dönel kaplama (spin coater) sistemi

3.2.2. Maske hizalama (fotolitografi) sistemi

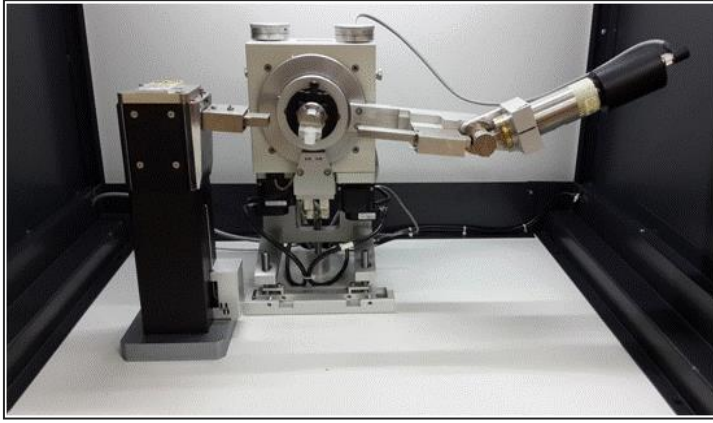
Resim 3.3' de verilen SUS-MJB4 model maske hizalama sistemi Gazi Fotonik bünyesinde olup temiz oda içerisinde bulunmaktadır. Maske hizalama sistemi, yarıiletken malzemeler ile birçok opto-elektronik aygıtın fabrikasyonunda kullanılabilen bir fotolitografi sistemidir. Fotolitografi tekniği, malzeme üzerine ilave edilen fotorezistin UV ışık altında kürlenmesi olarak açıklanabilir. Bu sistemde 350-400 nm dalgaboylu Hg ark lambasına sahip ışık kaynağı kullanılır. Hedeflenen aygıtın yapısına uygun olarak dizayn edilmiş foto maskeler kullanılarak, üzeri fotorezist kaplanmış numunenin UV ışık altında pozlanması sağlanır. Böylece fotomaske üzerindeki desenler rahatlıkla numune yüzeyine aktarılmış olur.



Resim 3.3. SUSS Micro Tech-MJB4 maske hizalama sistemi

3.3. X Işını Kırınımı Tekniği

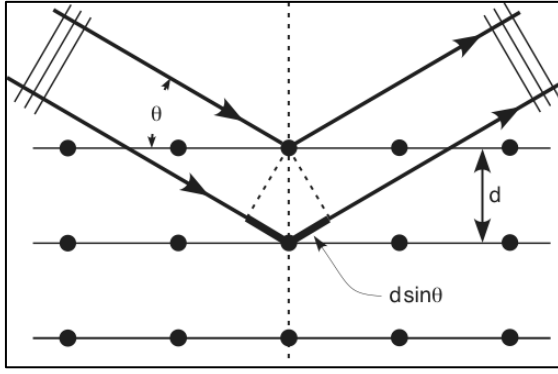
1895 yılında Wilhelm Röntgen tarafından keşfedilen x-ışınları, atomların iç yörüngelerindeki elektron geçişleri ile doğal yolla veya yapay olarak kapalı tüp içinde katottan salınan elektronların hızlandırılıp anottaki metalin bombardıman edilmesiyle oluşurlar. Yüksek enerjiye sahip elektronlar, hedefte bulunan metal içinde yüksek ivmeyle yavaşlamak zorunda bırakıldıklarından enerjilerini foton yayımlayarak atarlar. Foton yayımlama olayı zincirleme olarak devam eder ve bu yayımlanan fotonlardan x-ışınları oluşur. Üretilen x-ışınlarından karakteristik olanları seçilir. Bu karakteristik x-ışınları kullanarak gerçekleştirilen XRD tekniği ile alaşımların analizleri yapılır.



Resim 3.4. APD 2000 Pro XRD cihazı

X-ışını kırınımı tekniği, malzemelerin (ince film, toz vb.) yapısal özelliklerini belirlemek için kullanılan en yaygın tekniklerden biridir [55]. X-ışını kırınımı (XRD)'nin çalışma prensibi kristalin örgü parametreleri ile aynı dereceli dalga boyuna sahip olan x-ışını dalgalarının kırınımına uğraması olayıdır. Tüm kırınım olaylarının temeli Bragg kanununa dayanır [56]. Bragg kanunu aşağıdaki gibi verildi.

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (3.1)$$



Şekil 3.1. Kristal düzlemlerinde x-ışınlarının saçılması

Bu denklemde, d düzlemler arası mesafe, θ yansıma veya gelme açısı ve λ kullanılan x-ışının dalga boyudur. Deneylerde kullanılan X-ışını dalga boyu $\lambda_{\text{K}\alpha}=1,54 \text{ \AA}$ 'dır. X-ışını deseninden 2θ saçılma açısı belirlenerek kristal düzlemleri arasındaki d mesafesi Eşitlik 3.1 yardımı ile hesaplanarak; d mesafesinin bilinmesi sonucu kristal düzleminin yönelimi, örgü parametresi belirlenerek yapısal bilgiler türetilir. Ayrıca X-ışını kırınım desenindeki pik pozisyonlarının (θ) ve pik yarı genişliğinin belirlenmesi ile filmlerdeki partikül büyüklükleri de belirlenebilmektedir.

Yapılan tüm numunelerin yapısal analizlerinde x-ışını kırınımı ölçümleri Gazi Fotonik bünyesinde bulunan Resim 3.4'te verilen APD 2000 PRO XRD cihazı ile yapılmıştır.

3.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), angström seviyesinden yaklaşık olarak 150 mikrometreye kadar ölçüm yapabilen bir tekniktir. 1986 yılında Binnig, Quate ve Gerber tarafından icat edilmiştir. Bu teknik için vakuma ihtiyaç yoktur. Sistem üzerinde bir denge çubuğu ucuna tutturulmuş bir iğne yardımıyla numune yüzeyi taranır. Tarama sırasında atomlar arası kuvvetler bu iğnenin sapmasına sebep olur. Bu sapma ölçülerek yüzey analizi yapılmış olur.



Resim 3.5. Atomik Kuvvet Mikroskobu

Atomik kuvvet mikroskobu; malzemeyi oluşturan parçacıkların büyüklük ve şekilleri, birbirleriyle etkileşimleri, yüzey görünümü ve moleküler yapı arasındaki ilişkiler gibi bilgiler verir. Yapılan numunelerin yüzey analizleri Resim 3.5'te verilen Gazi Fotonik bünyesine bulunan AFM cihazı ile yapılmıştır.

3.5. UV-Vis Spektroskopisi

Resim 3.6'da verilen Perkin Elmer UV-Vis spektrometre cihazı ile optik geçirgenlik, optik soğurma ve bant aralığı değerleri 200 nm ile 1100 nm aralığında hesaplanabilmektedir. Bu çalışma kapsamında hazırlanan Pt:SnO₂ ince filmlerin dalga boyuna bağlı olarak optik geçirgenlik eğrileri UV-Vis spektrometresi kullanılarak ölçülmüştür.



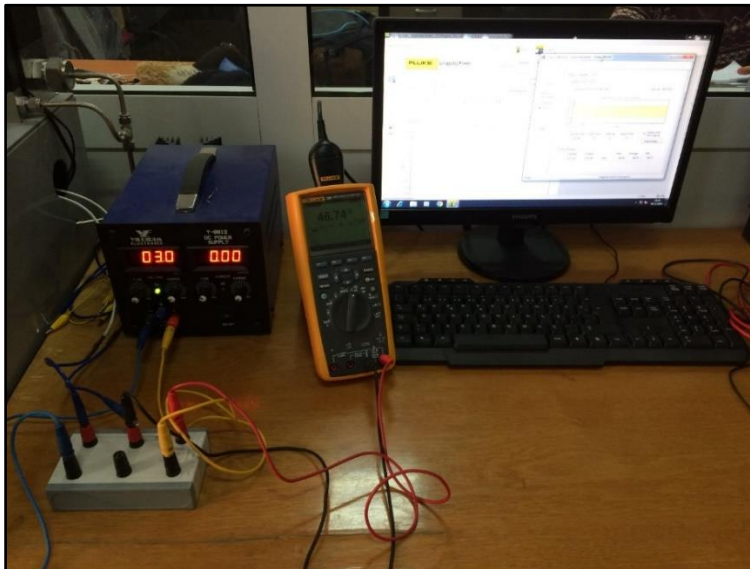
Resim 3.6. Perkin Elmer UV Visible spektrometre

3.6. Gaz Sensör Test Sistemi

Tez çalışması kapsamında fabrikasyon işlemleri sonucunda üretilen Pt:SnO_2 gaz sensörlerinin gaz duyarlılığı Resim 3.7’de verilen ev-yapımı Gaz Sensör Test Sistemi ile gerçekleştirildi.



Resim 3.7. Gaz sensör test sistemi



Resim 3.8. Gaz sensör test sisteminde kullanılan yardımcı ekipmanlar

Resim 3.7’de verilen gaz sensör test sistemi, yaklaşık olarak 0,1 m³ hacimlik bir vakum odasına sahiptir. Bu vakum odası bir adet mekanik pompa ile yaklaşık 10⁻² mbar basınç değerine kadar vakumlanabilmektedir. Sistem içerisindeki ölçümü yapılacak numuneyi tutturmak için kullanılan numune tutucu mekanizması 400 °C sıcaklığa kadar çıkabilmektedir. Sistem üzerinde bir adet bütan gazına, bir adette taşıyıcı gaz olarak kullanılan N₂ gazına bağlı olmak üzere iki adet Sierra marka gaz akış kontrol mekanizması bulunmaktadır. Sisteme ekstra olarak Resim 3.8’ de gösterildiği gibi bir bilgisayar bağlantısı, bir adet Yıldırım elektronik DC Power Supply güç kaynağı, bir adet Fluke marka bilgisayar tarafından desteklenebilen akım, gerilim, direnç ve sıcaklık ölçebilen multimetre bulunmaktadır.

4. NUMUNELERİN BÜYÜTÜLMESİ, KARAKTERİZASYONLARI VE FABRİKASYON İŞLEMLERİ: BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında üretilen tüm numuneler eş püskürtme tekniği kullanılarak, Si ve cam alttaşlar üzerine Pt:SnO₂ ince filmler biriktirildi. Biriktirilen numunelerde Pt ve SnO₂ hedefler için RF güç kaynağı kullanıldı.

4.1. Pt:SnO₂ İnce Filmlerin Üretimi

Resim 3.1’de verilen eş püskürtme sistemi kullanılarak, SnO₂ hedefin kaplama gücü (50 W) sabit tutularak, farklı güçlerde (2W, 5W, 7W) Pt ile katkılanarak, Pt:SnO₂ ince filmler üretildi ve sırasıyla CTS110, CTS111 ve CTS112 olarak isimlendirildi.

Si ve cam alttaşlar aseton ve propanol ile yıkandıktan sonra deiyonize su ile durulandı. Temizlenen numuneler yüksek saflıktaki azot gazı ile kurutulduktan sonra eş püskürtme sistemi içerisindeki alttaş tutucu mekanizmaya yerleştirildi ve kaplama yapılacak yüzeyler hedef malzemelere yönelecek biçimde sisteme yüklendi. Sistem içi vakum değeri yaklaşık 10⁻⁶ torr civarındadır. İnce film biriktirmeye başlanmadan önce sisteme yüklenen alttaşların Argon (Ar) gazı ortamında oluşturulan plazma ile temizliğinin yapılması daha kaliteli filmler oluşması için önem arz etmektedir. Bu temizlik, hedef malzemeler önündeki kaynak kesiciler kapalı konumda iken yapılmalıdır. Sistem oda sıcaklığında iken Ar gazı altında RF güç kaynağı 30 watt güç değerinde iken 4 dakika alttaş yüzeyinde temizlik yapıldı. Çizelge 4.1’ de verilen büyütme parametreleri ışığında tüm numuneler 30 mtorr basınç altında verilen sürelerde, verilen güç değerlerinde ve sürelerde kaplama işlemleri tamamlandı. Üretilen Pt:SnO₂ numunelerin görüntüleri Resim 4.1’de verildi.



Resim 4.1. Pt:SnO₂ ince filmlerin görüntüleri

Üretimi tamamlanan tüm numunelerin kalınlık ölçümleri Resim 4.2’ de verilen Veeco-

Dektak 150 Yüzey Profilometresi ile ölçüldü ve kalınlık değerleri Çizelge 4.1’ de verildi.



Resim 4.2. Veeco-Dektak 150 yüzey profilometresi

Pt katkılı numuneler 2,5 ve 7 W güç değerlerinde sırasıyla CTS110, CTS111 ve CTS112 olarak isimlendirildi. Kaplanan Pt:SnO₂ ince filmlerine ait kaplama parametreleri Çizelge 4.1’de verildi.

Çizelge 4.1. Pt:SnO₂ ince film kaplama parametreleri

Numune	Yapı	Kaplama Gücü (W)		Sıcaklık (°C)	Kaplama Basıncı (mtorr)	Film Kalınlığı (nm)
		SnO ₂	Pt			
CTS110	Pt:SnO ₂ /n-Si	50	2	22	30	101
CTS111	Pt:SnO ₂ /n-Si	50	5	22	30	100
CTS112	Pt:SnO ₂ /n-Si	50	7	22	30	101

4.2. Pt:SnO₂ İnce Filmlerin Karakterizasyonları

Üretimi tamamlanan Pt:SnO₂ ince filmlerin yapısal karakterizasyonları XRD, morfolojik ve optik karakterizasyonları, AFM ve UV-Vis ölçümleri alınarak gerçekleştirildi.

4.2.1. XRD analizleri

Eş püskürtme tekniği ile biriktirilen Pt:SnO₂ filmlerin θ -2 θ geometrisinde X-ışını kırınım desenleri CuK α ışınımı kullanılarak elde edildi. Kırınım desenlerindeki piklerin pik pozisyonları ve pik yarı genişlik (FWHM) değerleri kullanılarak, düzlemler arası uzaklık (d), örgü parametresi (c), parçacık boyutu (D), zorlama (microstrain) (ϵ) ve dislokasyon (çizgi kusuru) yoğunluğu (δ) değerleri hesaplanarak yapısal analizleri gerçekleştirildi.

SnO₂ kristali tetragonal yapıdadır ve birim hücresi *a* ve *c* örgü parametresi ile karakterize edilen bir kristal için düzlemler arasındaki uzaklık ve örgü parametresi arasındaki ilişki;

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (4.1)$$

şeklindedir.

Burada *h*, *k* ve *l* miller indisleridir. Bu eşitlik ve Eş. (3.1)' de tanımlanan Bragg Yasası ifadesinden yararlanılarak örgü sabitleri hesaplanabilir. Örgü parametrelerinin hesaplanmasında iki yaklaşım uygulanabilir. Birinci yaklaşım tipi yansılardan yararlanılarak *a* örgü sabitinin bulunmasıdır. için Eş. (4.1) ve Eş. (3.1) kullanıldığında,

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{4a^2} \left[\frac{4}{3} (h^2 + hk + k^2) \right] \quad (4.2)$$

eşitliği elde edilir ve bu eşitlikten *a* örgü sabiti,

$$a = \frac{\lambda}{\sqrt{3} \sin \theta} \sqrt{h^2 + hk + k^2} \quad (4.3)$$

ifadesi ile verilir. İkinci olarak 00*l* tipi yansımalar kullanılarak,

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{4a^2} \left[\frac{l^2}{(c/a)^2} \right] = \frac{\lambda^2}{4c^2} l^2 \quad (4.4)$$

eşitliği ve buradan da *c* örgü sabiti,

$$c = \frac{\lambda}{2\sin\theta} l \quad (4.5)$$

şeklinde elde edilir.

Scherrer denklemi ile XRD desenlerinde maksimum pikin elde edildiği bölgeden maddenin kristal büyüklüğü hesaplanabilir. Kristal büyüklüklerinin hesaplanması için kullanılan Scherrer denklemi,

$$D = \frac{0,9\lambda}{B\cos\theta} \quad (4.6)$$

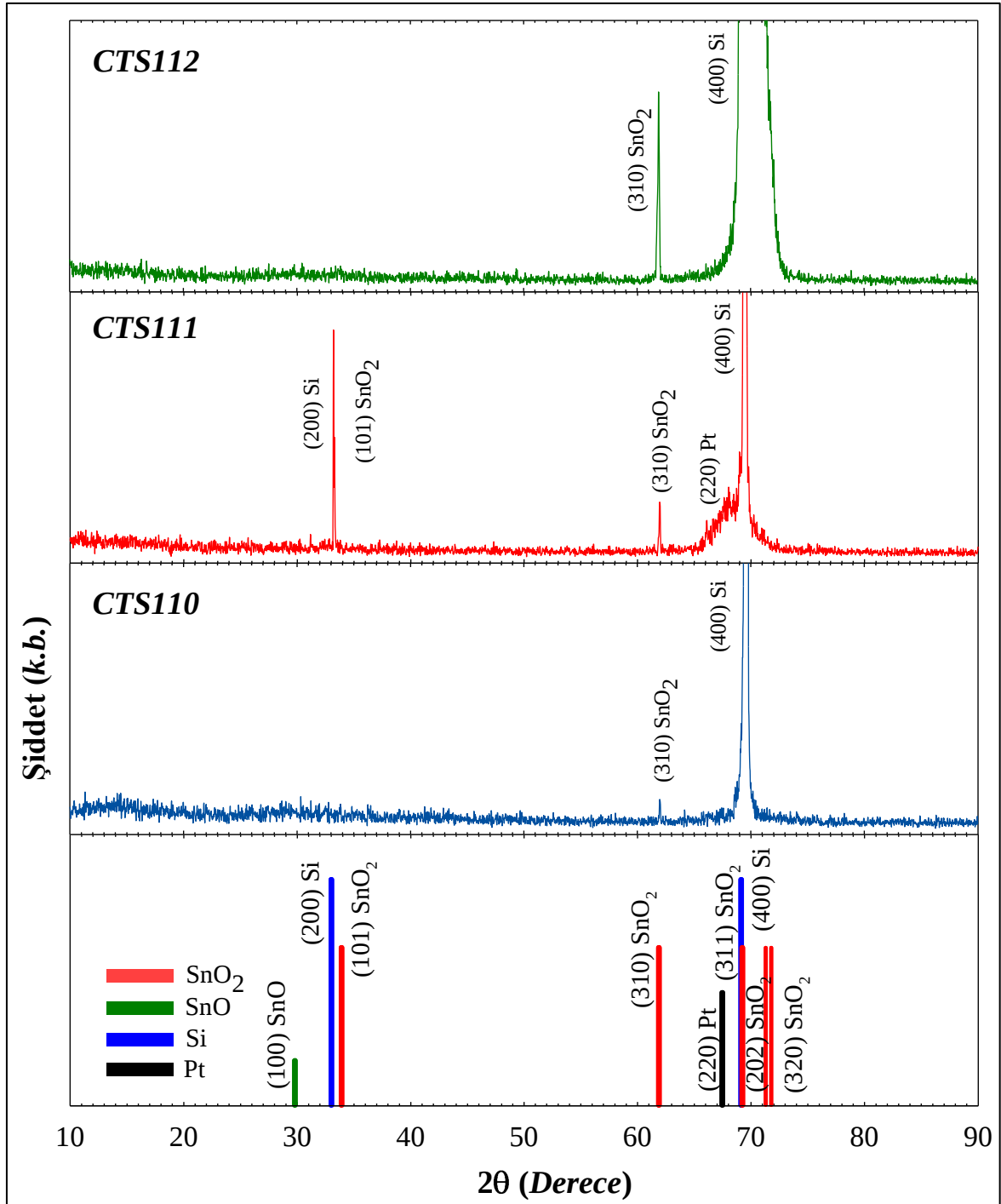
eşitliği ile verilir. Burada D tanecik boyutu, B kırınım pik yarı genişliği (FWHM) ve θ pik pozisyonudur. λ ise kullanılan X ışınının dalga boyu olup değeri 1.54 Å'dır.

Ayrıca, yapılarda dislokasyon yoğunluğunun ve zorlamanın fazla olması bu yapılardan üretilen aygıtların performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Büyütülen yapılarda dislokasyon yoğunluğu (δ) ve zorlama (ε) değerleri,

$$\delta = \frac{n}{D^2}, n = 1 \quad (4.7)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{\lambda}{D\cos\theta} - B \right) \frac{1}{\tan\theta} \quad (4.8)$$

İfadeleri yardımıyla hesaplanır.



Şekil 4.1. Numunelerin XRD desenleri

Şekil 3.1’de verilen eş püskürtme sistemi ile (100) yönelimli Si alttaşlar üzerine Pt:SnO₂ biriktirilen CTS110, CTS111 ve CTS112 numunelerinin XRD kırınım desenleri verildi. Şekil 4.1’de numunelere ait XRD kırınım desenleri incelendiğinde, en şiddetli pikin Si (400)’a ait olduğu görüldü.

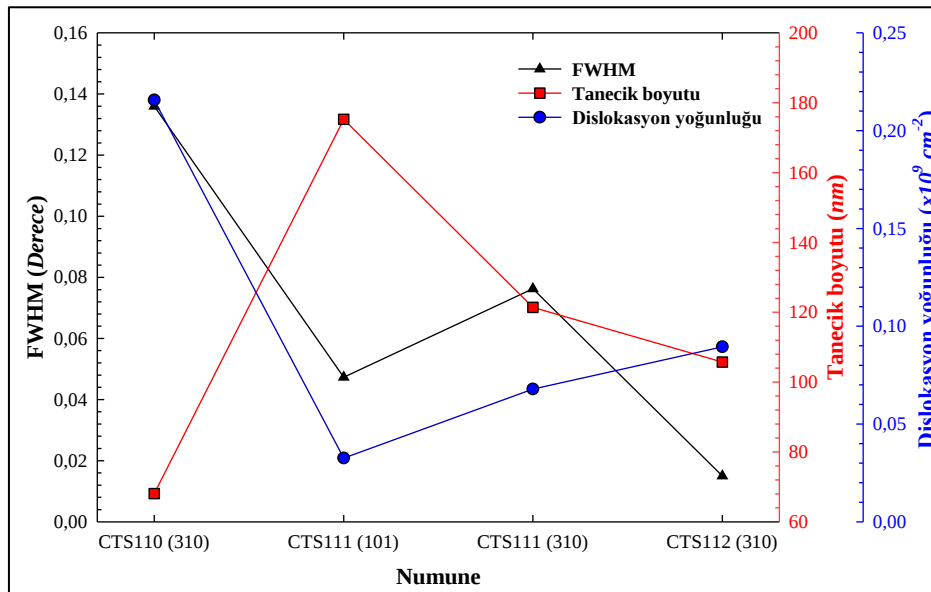
Şekil 4.1’de, Si (400), Si (200), SnO₂ (101), SnO₂ (310), SnO₂ (311), SnO₂ (202), SnO₂ (320), SnO (100) ve Pt (220) ’lerden kaynaklanan pikler görülmektedir. Bu durum, biriktirilmiş Pt:SnO₂ ince filmlerin polikristal yapıya sahip olduklarını göstermektedir.

Numunelerin, tanecik boyutu (D), dislokasyon yoğunluğu (δ), zorlanma (ε) değerleri gibi yapısal parametreleri Çizelge 4.1’de verildi. Bu parametreler yukarıda verilen Eş. (4.6), Eş. (4.7) ve Eş. (4.8) kullanılarak hesaplandı.

Çizelge 4.2. Numunelerin yapısal parametreleri

Numune	hkl	2θ (deg)	β (deg)	D (nm)	δ ($\times 10^9 \text{ cm}^{-2}$)	ε ($\times 10^{-4}$)
CTS110	310	61.860	0.136	68.097	0.215	0.440
CTS111	101	33.200	0.047	175.259	0.032	0.307
CTS111	310	61.860	0.076	121.379	0.067	0.246
CTS112	310	61.860	0.087	105.722	0.089	0.283

Çizelge 4.1’den de anlaşılacağı üzere CTS110 numunesinin tanecik boyutu en küçüktür. Buna karşın en büyük tanecik boyutuna ve en düşük dislokasyon yoğunluğuna sahip CTS111 numunesidir.



Şekil 4.2. Numunelerin FWHM ve tanecik boyutu değerleri

Öte yandan, yansıma piklerinden kaynaklanan FWHM değeri ile tanecik boyutu büyüklüğü polikristal ince filmlerin kristal kalitesiyle ilişkili olabilir.

4.2.2. AFM analizleri

Pt:SnO₂ ince filmlerinin yüzey morfolojileri ise Resim 3.5'te verilen AFM cihazı ile belirlendi. CTS110, CTS111 ve CTS112 numaralı numunelerin AFM görüntüleri Resim 4.3'de verildi. AFM ölçümleri sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü (RMS) değerleri ve tanecik boyutları Çizelge 4.2'te verildi.

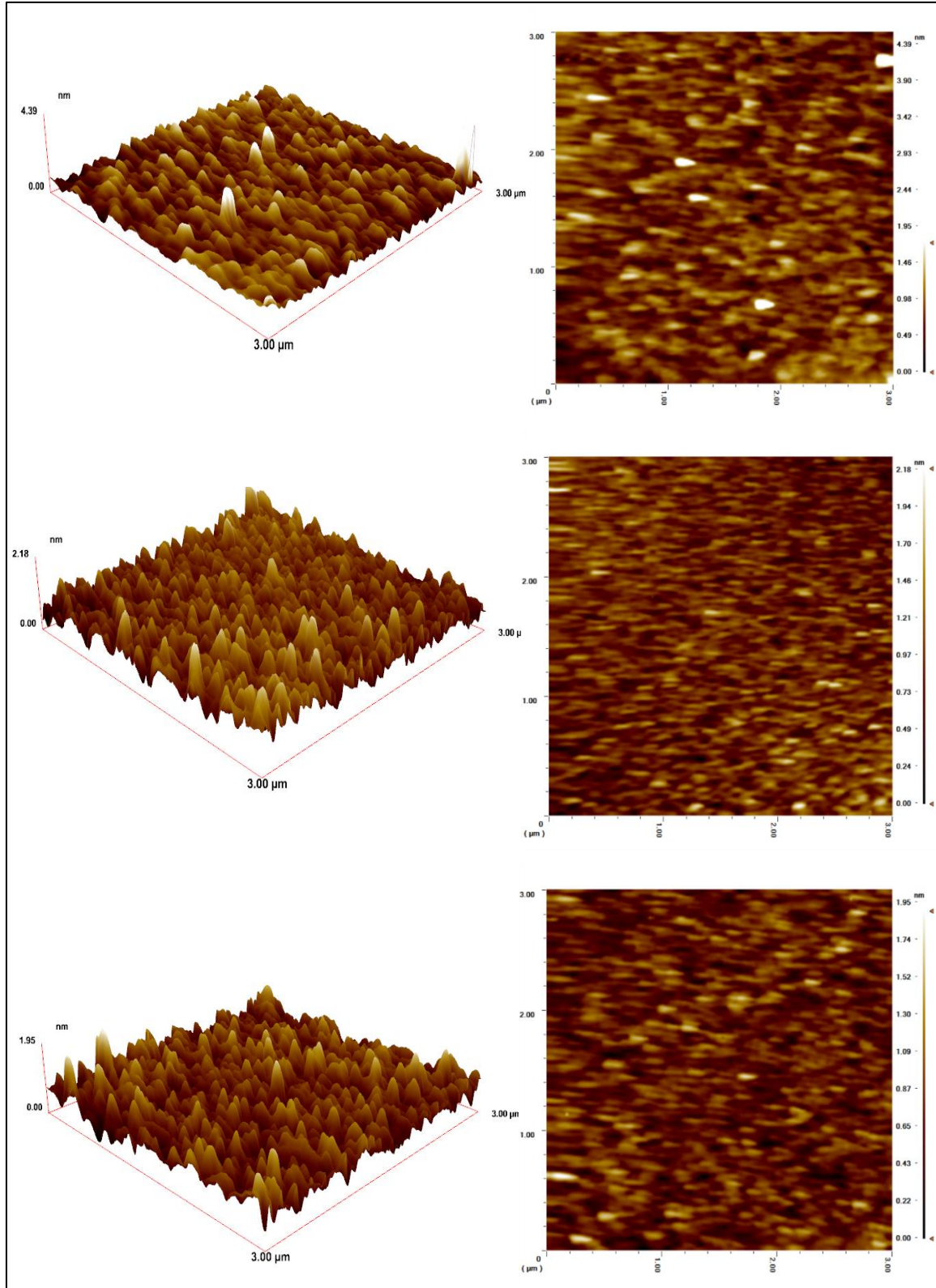
Yüzey görüntüleri 3µm²'lik alan taranarak incelendi. Yüzey morfolojisindeki değişim; yüzey pürüzlülüğünü değerlendirmede kullanılan en önemli parametrelerden birisi olan RMS "Root Mean Square" parametresinin ölçülmesi ile belirlendi. Bütün numunelerin yüzey pürüzlülükleri nanometre skalasında olmakla beraber, kalınlık arttıkça RMS değerleri de artmıştır. Bu durum yüzey üzerindeki partiküllerin büyümesi ile sertleşen yüzeyin bir göstergesidir. Resim 4.3'te numunelerin 3µm²'lik alanlardaki üç boyutlu ve iki boyutlu yüzey görüntüleri ve RMS değerleri detaylı olarak verilmektedir.

Çizelge 4.3. Yüzey Pürüzlülük Değerleri

Numune	Kaplama Gücü (W)		RMS (nm)	Film Kalınlığı (nm)
	SnO ₂	Pt		
CTS110	50	2	0,2095	101
CTS111	50	5	0,4138	100
CTS112	50	7	0,4339	101

Si alttaşlar üzerine 50 W sabit RF gücü ile SnO₂ hedeflenen sırasıyla 2,5 ve 7 W katkı güçlerinde Pt hedeflenerek, sırasıyla 101 nm, 100 nm ve 101 nm büyütülen Pt:SnO₂ filmlerin yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla 0,2095 nm, 0,4138 nm ve 0,4339 nm olarak ölçüldü.

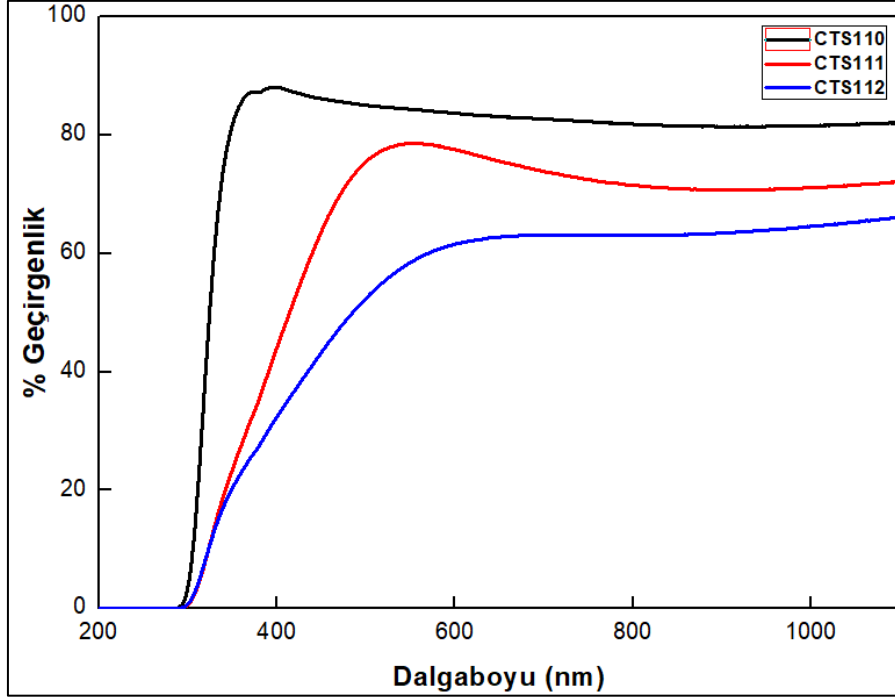
Sabit kaplama gücünde (50W) üretilmiş katkılı SnO₂ numuneleri incelendiğinde, artan Pt katkısıyla yüzey pürüzlülüklerinin de arttığı görüldü.



Resim 4.3. Üretilen CTS110, CTS11 ve CTS112 filmlerinin AFM görüntüleri

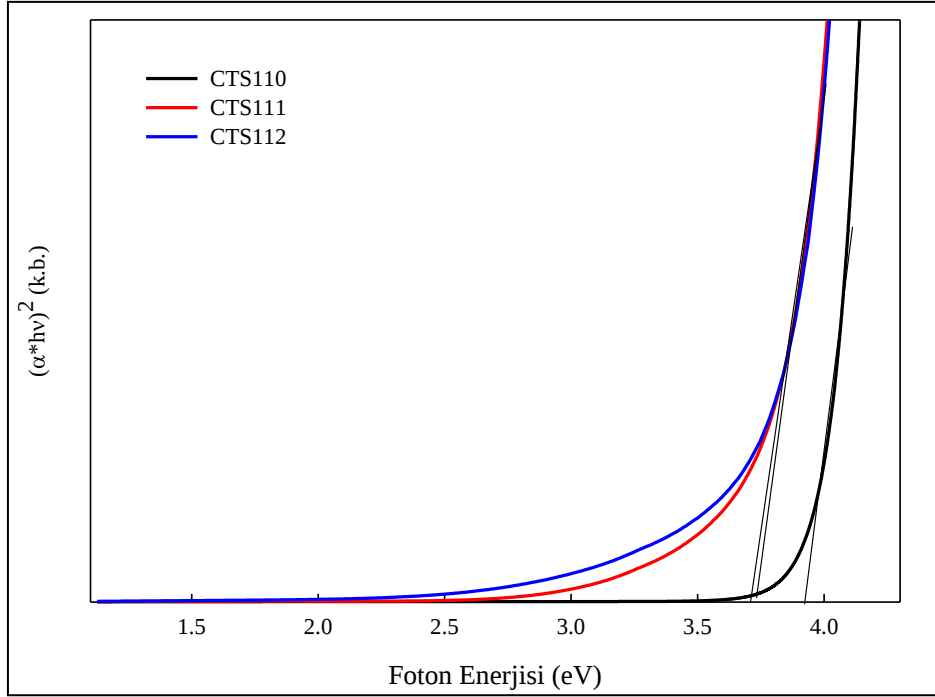
4.2.3. Geçirgenlik ölçümleri ve enerji bant aralığı analizleri

Farklı katkı oranlarına sahip CTS110, CTS111 ve CTS112 numunelerinin optik geçirgenlikleri, Resim 3.6'da verilen Perkin Elmer UV Visible spektrometre cihazı ile ölçüldü. Ölçüm sonuçları ile çizilen geçirgenlik-dalgaboyu grafiği Şekil 4.3'te verildi.



Şekil 4.3. Filmlerin optik geçirgenlik grafiği

Şekil 4.3'te verilen geçirgenlik-dalgaboyu grafiğine göre, görünür bölge de 2 W gücünde kaplanan CTS110 numunesi, yaklaşık %88 oranında yüksek optik geçirgenliğe sahip olduğu belirlendi. Görünür bölge de en yüksek optik geçirgenliğe sahip olan CTS111 numunesi yaklaşık olarak %80 optik geçirgenliğe sahiptir. Görünür bölge de en düşük optik geçirgenliğe sahip olan CTS112 numunesi yaklaşık olarak %63 optik geçirgenliğe sahiptir. Grafikten de anlaşılabacağı üzere artan katkı miktarıyla optik geçirgenliğin azaldığı görüldü.



Şekil 4.4. $(\alpha*hv)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişim grafiği

Numunelerin soğurma katsayısı,

$$\alpha = \frac{1}{t} \ln(1/T) \quad (4.9)$$

İfadesi kullanılarak hesaplandı. Burada t filmin kalınlığı, T ise optik geçirgenlik değeridir. Elde edilen soğurma katsayısına bağlı olarak $(\alpha*hv)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi (Tauc grafiği) Şekil 4.3' de verildi. Filmlerin yasak enerji aralıkları, Tauc eğrisinin düz bölgesinin eğiminin hv eksenini kestiği nokta olacak şekilde belirlendi. CTS110, CTS111 ve CTS112 numunelerinin sırasıyla yasak enerji aralığı değerleri 3,87 eV, 3,76 eV ve 3,71 eV olarak bulundu ve Çizelge 4.3'te verildi.

Çizelge 4.4. Numunelerin bant aralığı değerleri

Numune	Kaplama Gücü (W)		Bant aralığı (eV)
	SnO ₂	Pt	
CTS110	50	2	3,87
CTS111	50	5	3,76
CTS112	50	7	3,71

Şekil 4.4'te katkı gücü değişkenlik gösteren Pt:SnO₂ ince filmlerinin yasak enerji aralığı değerleri, artan katkı gücü ile azaldığı gözlemlendi.

Özet olarak, Pt:SnO₂ numunelerinin yapısal ve elektriksel özellikleri Pt katkılamaından önemli ölçüde etkilenmiştir. Tüm numunelerin tercih edilen özellikleri olmasına rağmen, CTS111 ve CTS112 filmlerinin, XRD deseninden daha iyi kristalliniteye sahip olduğu görüldü. Bu nedenle söz konusu yapıların Pt:SnO₂ gaz sensörü geliştirmede uygun olabileceği değerlendirildi.

4.3. Pt:SnO₂ Gaz Sensör Fabrikasyonu

4.3.1. Litografik teknikler

Sensör aygıtı; elektrotlar, algılayıcı tabaka ve ısıtıcı elemanlarından oluşmaktadır. Aygıt fabrikasyonu bu bileşenlerin bir alttaş üzerine oluşturulması ile gerçekleştirilir. Litografi işlemi için Gazi Fotonik'te bulunan KarlSüs-MJB4 model maske ayarlama sistemi ve ekipmanları kullanıldı. Fabrikasyon işlemine başlamadan önce Al₂O₃ alttaşlar ilk önce aseton ve sonrasında alkolle temizlenip yüksek saflıkta azot gazı ile kurutuldu. Isıtıcı alttaşın arka yüzeyine, interdiijital elektrotlar ve Pt:SnO₂ ince filmleri ön yüzeyine oluşturulmak üzere aşağıda sıralanmış adımlar takip edildi.

Isıtıcı fabrikasyonu:

- ✓ Alttaşın arka yüzeyine dönel kaplama sistemi ile fotodirenç adı verilen özel dalga boylarındaki ışığa (enerji) duyarlı, polimer maddenin numune yüzeyine homojen bir şekilde kaplandı.
- ✓ Fotolitografi ile hazırlanan ısıtıcı (direnç) maskesinin üzerindeki desenlerin kristal dilimi üzerine pozlandı.
- ✓ Pozlanan bölgelerin aşındırılması ile maskede yer alan 2 boyutlu desenlerin 3 boyutlu hale dönüştürüldü.
- ✓ Isıtıcı metalizasyonu yapıldı.
- ✓ Fotodirencin kaldırılması gerçekleştirildi.

Elektrot fabrikasyonu:

- ✓ Numunenin ön yüzeyine dönel kaplama (Spin Coater) sistemi ile fotodirenç homojen bir şekilde kaplandı.
- ✓ Fotolitografi ile hazırlanan elektrot maskesi üzerindeki desenlerin kristal dilimi üzerine pozlandı.
- ✓ Pozlanan bölgelerin aşındırılması ile maskede yer alan 2 boyutlu desenlerin 3 boyutlu hale dönüştürüldü.
- ✓ Elektrot metalizasyonu yapıldı.
- ✓ Fotodirencin kaldırılması gerçekleştirildi.

Algılayıcı tabaka fabrikasyonu:

- ✓ Elektrot fabrikasyonu tamamlanmış numunenin ön yüzeyine dönel kaplama sistemi ile fotodirenç homojen bir şekilde kaplandı.
- ✓ Fotolitografi ile hazırlanan algılayıcı maskesi üzerindeki desenlerin kristal dilim üzerine basıldı.
- ✓ Pozlanan bölgeler aşındırıldı.
- ✓ Algılayıcı katman (Pt-SnO₂ ince film) püskürtme sistemi ile biriktirildi.
- ✓ Fotodirenç kaldırıldı.

Sensör üretim aşamaları:

Yukarıda anlatılan fabrikasyon aşamaları takip edilerek sensör üretim süreci gerçekleştirildi. Bu işlem için su adımlar takip edildi.

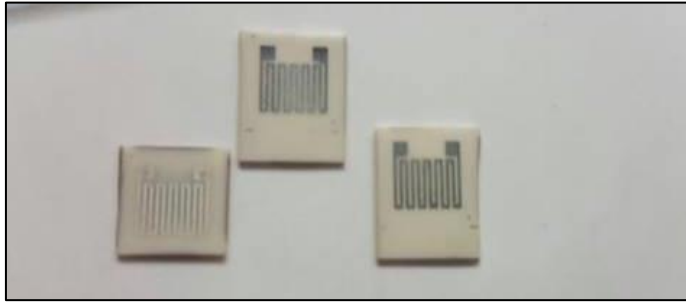
Numune üzerine AZ 5214E fotorezisti homojen şekilde damlatıldı. Spin coater cihazı ile 4000 rpm dönme hızında, 40 saniye döndürülerek AZ 5214E fotodirencinin numune yüzeyine homojen bir şekilde kaplanması sağlandı. Kaplama işlemi ardından numune, düz plakalı ısıtıcıda 110 °C sıcaklığında 50 saniye tavlandı. Fotodirençle kaplanan numune maske hizalama sistemi ile ilk UV pozlama işlemi uygulandı. Yapılan pozlama, litografi cihazında 20,5 saniye süresinde yapıldı.

Pozlama işlemi sonunda fotorezist ile korunmayıp, UV ışığa maruz bırakılan bölgeler bir çözücü içinde çözülebilir hale gelmektedir. Çözme işlemi için AZ 5214E foto direncini çözebilen AZ 400K çözeltisi kullanılmaktadır. Bu işlem için AZ 400K ile deiyonize su 1/4 oranında (1 AZ 400K/ 4 H₂O) karıştırılarak çözücü çözeltisi hazırlandı. Çözme işlemiyle, SnO₂ numunesi developer çözeltisi içinde 60 saniye bekletilerek önceden UV ışığa maruz bırakılan fotodirenç alanlarının çözünüp gitmesi sağlandı. Ardından numuneler hemen deiyonize suda durulanıp kuru azot ile kurutuldu. Arka ısıtıcı, interdigital elektrot ve gaz sensörü üzerine Pt:SnO₂ kaplama parametreleri Çizelge 4.4’de verildi.

Çizelge 4.5. Arka ısıtıcı kaplama parametreleri

RF gücü (W)	Hedef	Kaplama Basıncı (mtorr)	Kalınlık (nm)	Alttaş sıcaklığı (°C)
50	Pt	30	1000 nm	22

Pt ile kaplandıktan sonra numune asetona konularak fotodirenç kaldırma işlemi uygulandı ve Resim 4.4’te görünen ısıtıcı eleman üretildi.



Resim 4.4. Pt kaplanmış ısıtıcı yüzey

Benzer litografik işlemler ön interdigital elektrotların metalizasyonu için de yapıldı. Litografisi yapılan numune püskürtme sistemine yüklendi. Uygun vakuma geldiğinde parametreleri Çizelge 4.5’te verilen süreçle 500 nm kalınlığında Pt ile kaplama yapıldı.

Çizelge 4.6. İnterdijital elektrotların oluşturulması parametreleri

RF Gücü (W)	Hedef	Kaplama Basıncı (mtorr)	Kalınlık (nm)	Alttaş sıcaklığı (°C)
50	Pt	30	500	22

Gerçekleştirilen süreç sonunda Resim 4.5’de verilen interdijital elektrotlar elde edildi.



Resim 4.5. Pt kaplanmış ısıtıcı yüzey

Kaplama sonrası çıkarılan sensör numunesi, üzerindeki tel bağlama için dizayn edilmiş kontak alanları kapatılarak tekrardan püskürtme sistemine yüklendi. Uygun vakuma geldiğinde Çizelge 4.6’te verilen kaplama parametreleri kullanılarak aktif malzeme olan Pt katkılı SnO₂ kaplama işlemi gerçekleştirildi.

Çizelge 4.7. Sensör kaplama parametreleri

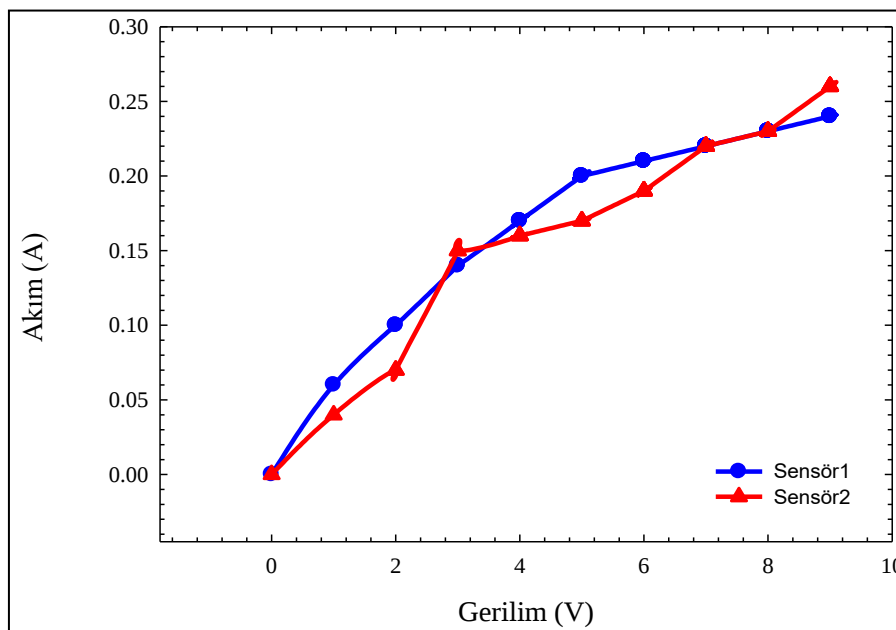
Sensör	Kaplama Gücü (W)		Sıcaklık (°C)	Kaplama Basıncı (mtorr)	Film Kalınlığı (nm)
	SnO ₂	Pt			
Sensör-1	50	7	22	30	99
Sensör-2	50	5	22	30	101

4.3.2. Gaz sensör karakterizasyonları

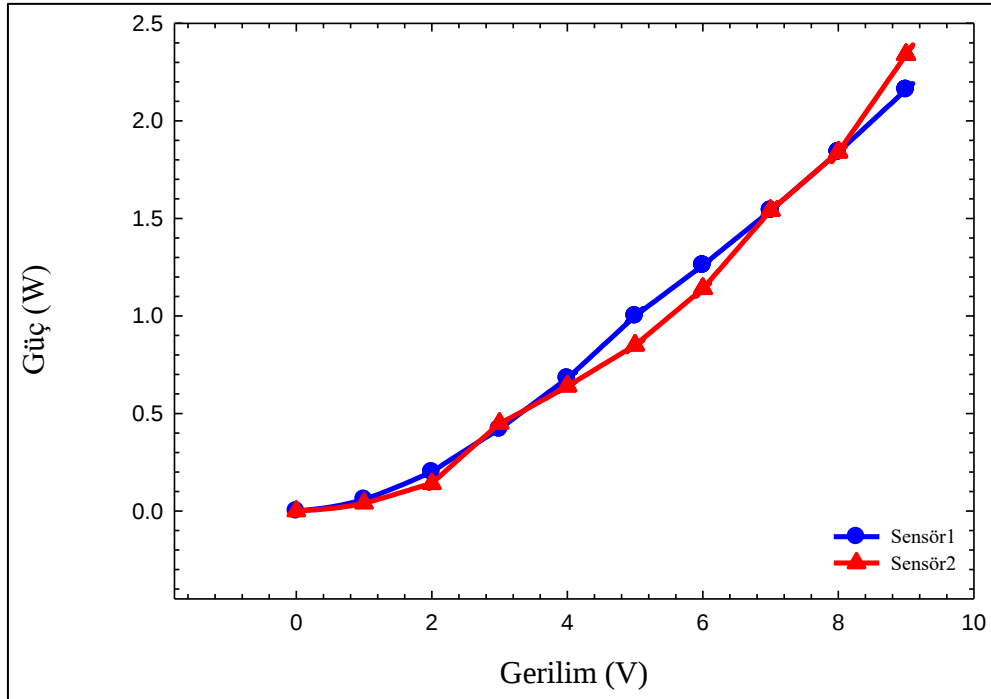
Isıtıcının güç ve sıcaklık karakterizasyonu

Isıtıcı fabrikasyonu kısmında tanımlanan işlem basamaklarına bağlı olarak Al_2O_3 alttaşlar üzerine yapılan Pt:SnO_2 gaz sensörleri için $5 \times 5 \text{ mm}^2$ boyutunda ısıtıcı katmanlar yapıldı. Sensör-1 ve Sensör-2'nin ısıtıcı katmanlarının oda sıcaklığındaki direnç değerleri sırasıyla 29 ve 28 Ω olarak ölçüldü. Oluşturulan ısıtıcı katmanların uygulanan voltaja bağlı olarak ne kadar akım çektiği, sıcaklık artışı ve harcadığı güç miktarı hesaplandı. Elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verildi.

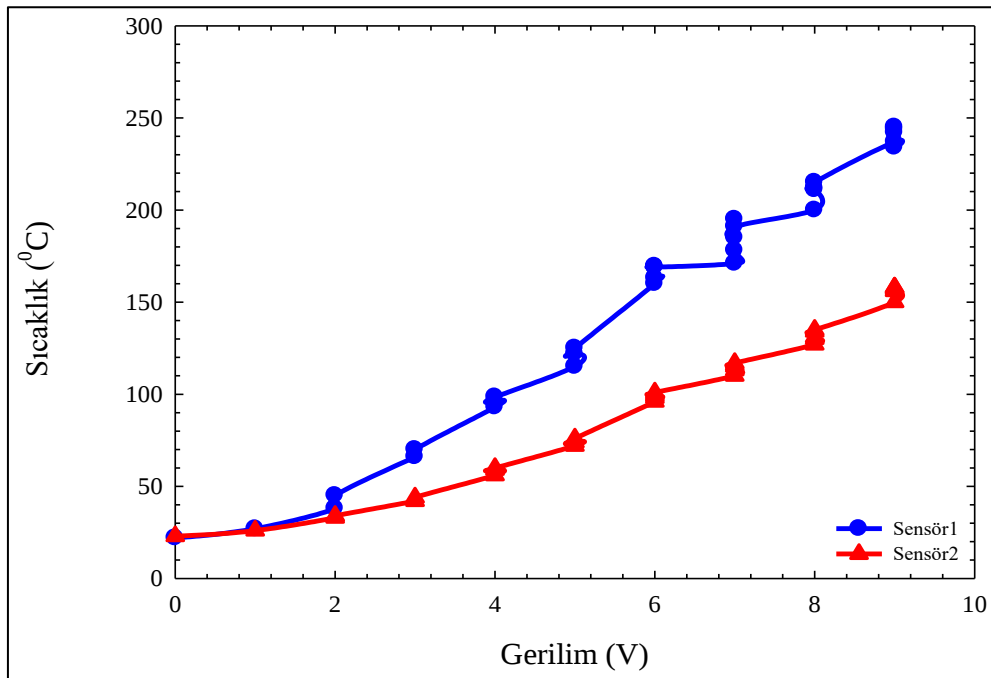
Grafiklerden de görüleceği üzere akım, sıcaklık ve güç değerleri gerilim arttıkça artmıştır. Bu durum ısıtıcı katman için beklenen bir durumdur. Sensör-1 ve Sensör-2'nin ısıtıcı kısmına 5 Volt (V) gerilim uygulandığında sırasıyla 0,17 ve 0,20 Amper (A) akım çektiği görüldü. Piyasadaki mevcut sensörler ile kıyaslanması açısından uygulama voltajının 5 V olduğu durumdaki güç değerleri dikkate alındı. Güç değerleri Sensör-1 ve Sensör-2 için sırasıyla 1Watt (W) ve 0,85 W olarak hesaplandı. Elde edilen güç değerinin 1W dolayında olması ticari uygulamalar açısından önemli olduğu değerlendirilmektedir. Sensör aktif yüzeyi, ısıtıcı ile 5V'da yaklaşık olarak 100 °C'ye kadar ısınabilmektedir. Elde edilen değerlerin literatürdeki sonuçlar ile uyum içerisinde olduğu görüldü.



Şekil 4.5. Isıtıcının akım gerilim grafiği



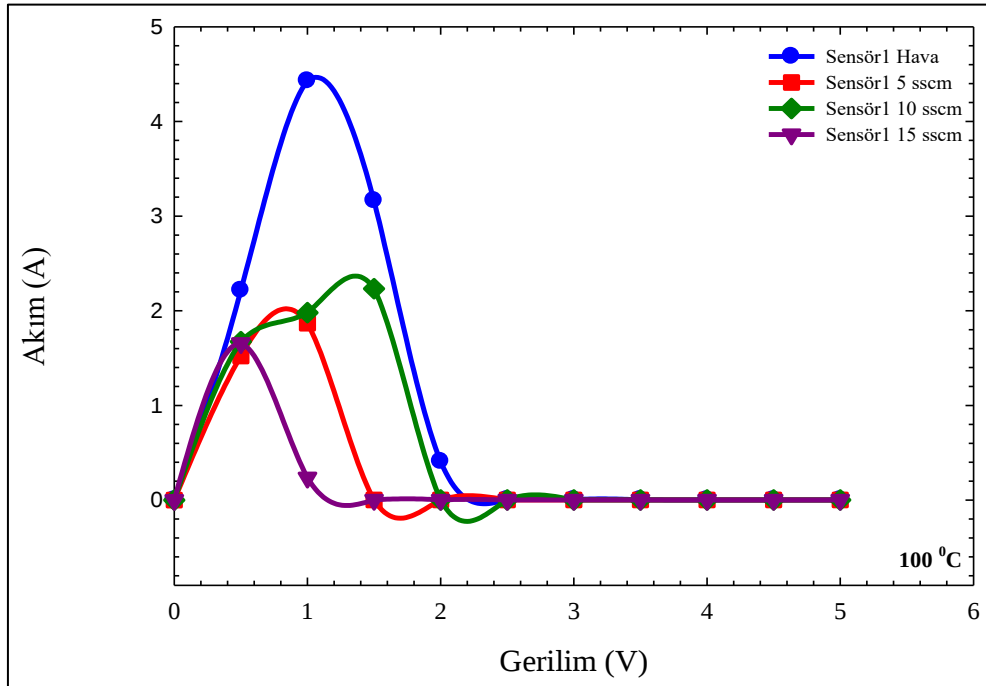
Şekil 4.6. Isıtıcının güç gerilim grafiği



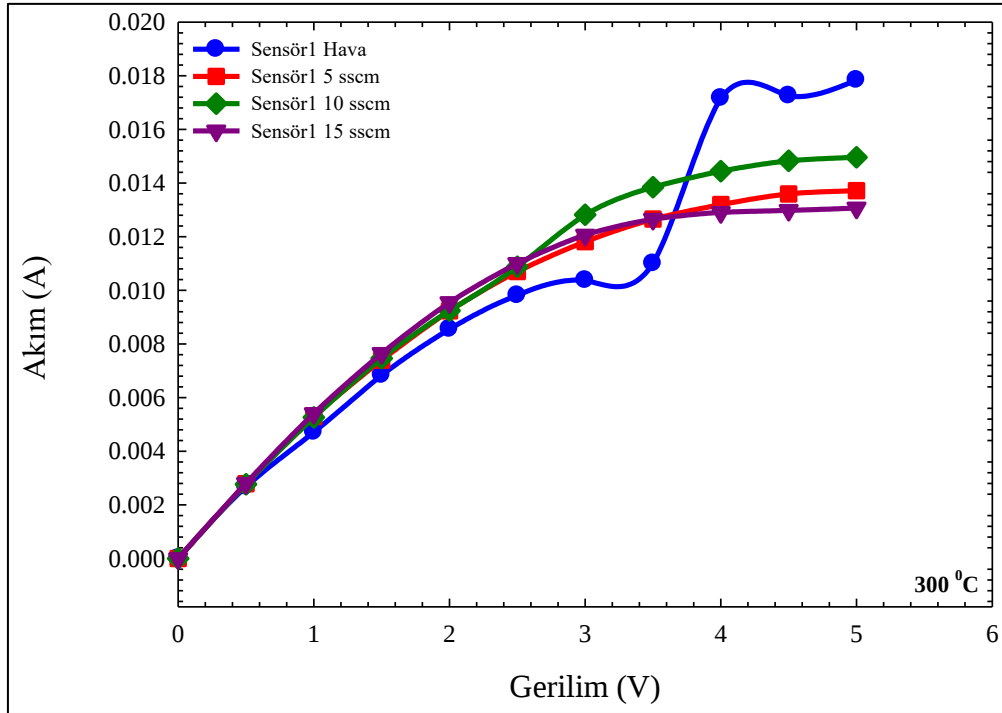
Şekil 4.7. Isıtıcının sıcaklık-gerilim grafiği

İnterdijital elektrotun akım – gerilim (I-V) karakterizasyonu

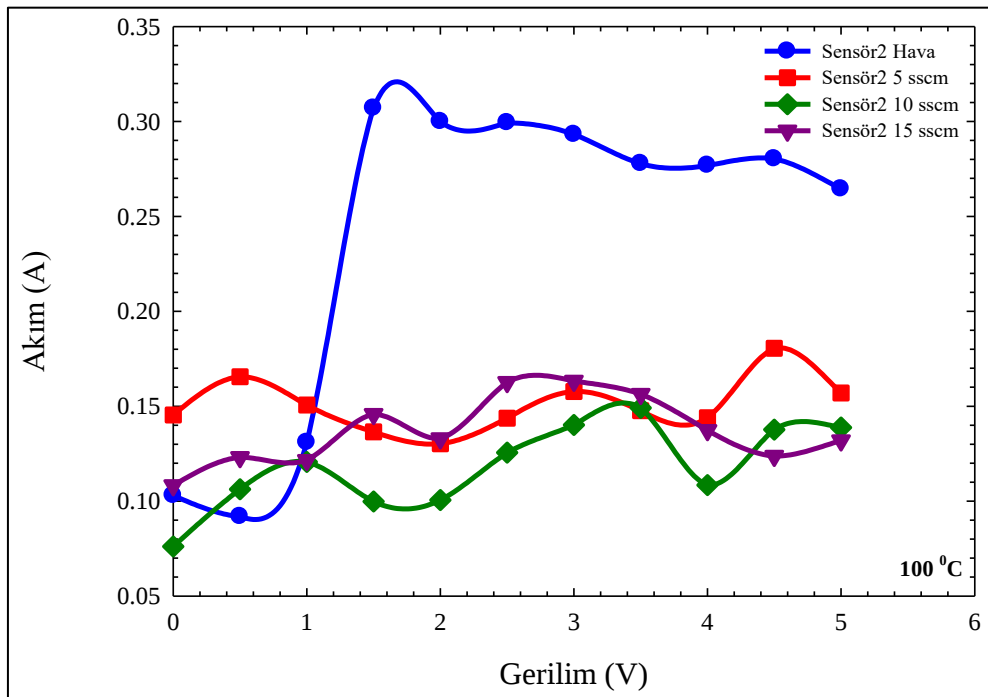
Yukarıda anlatılan litografik teknikler sonucu üretilen Pt:SnO₂ gaz sensörlerinin gaz duyarlılığı Resim 3.7’de verilen Gaz Sensör Test Sistemi ile gerçekleştirildi. İlk önce sensör üzerine gaz düşürülmeden, hava ortamında, akım-gerilim (I-V) ölçümü yapıldı. Daha sonra bütan gazı ortamında I-V ölçümü tekrarlandı. Bu iki ölçümün karşılaştırılması sonucu sensörde oluşan direnç değişimi değerlendirilerek sensörlerin gaz duyarlılığı gözlemlendi. Sensör duyarlılığını belirlemek için yapılan bu işlemler 100 °C ve 300 °C de olmak üzere iki farklı ortam sıcaklığı değerinde gerçekleştirildi. Elde edilen I-V eğrileri Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da verildi. Bu şekillerden, gaz konsantrasyonuna bağlı olarak, uygulanan gerilime karşılık sensör devresinden okunan akım değerleri görülmektedir. Geliştirilen sensörlerin, hem 100 °C hem de 300 °C’de, farklı gaz konsantrasyonlarında bütan gazına duyarlı oldukları görülmektedir. Yapılan ölçümler uygulanması gereken gerilimin 1.5-2 Volt civarında olmasının yeterli olduğunu göstermektedir. 100 °C’deki sensörler için alınan ölçümlerde I-V eğrisinin farklı gaz konsantrasyonlarında gerilime bağlı kayda değer bir değişim göstermediği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte bu sıcaklıkta duyarlılık göstermeleri, sensörlerin 100 °C’de de gaz algılamada kullanılabileceği söylenebilir.



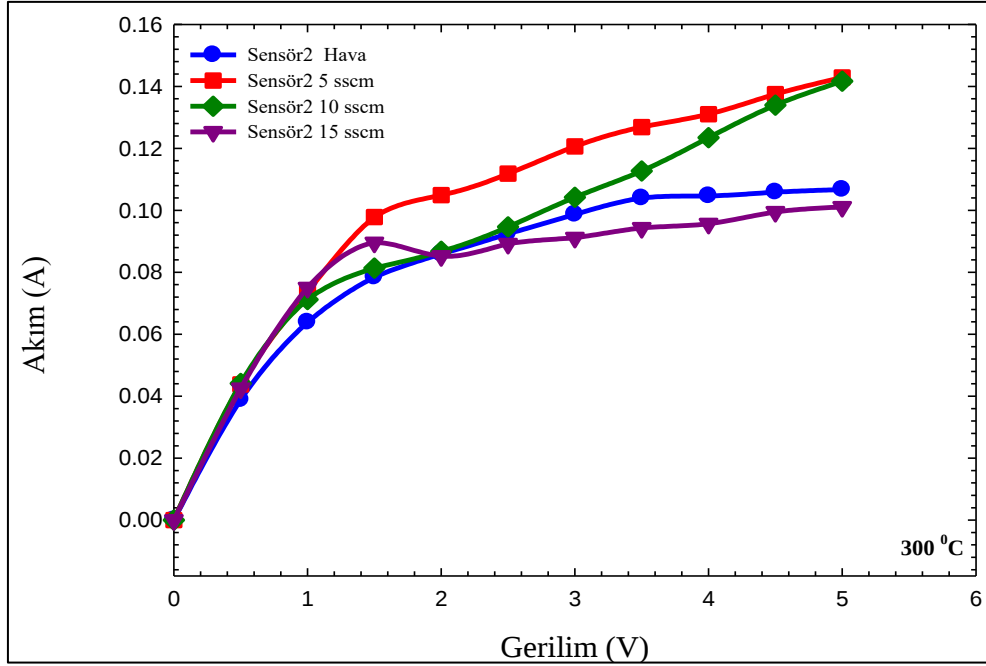
Şekil 4.8. Sensör-1 için 100 °C’de hava, 5-10-15 sscm gaz miktarları için ölçülen akım gerilim değişimi



Şekil 4.9. Sensör-1 için 300 °C’de hava, 5-10-15 sscm gaz miktarları için ölçülen akım gerilim değişimi

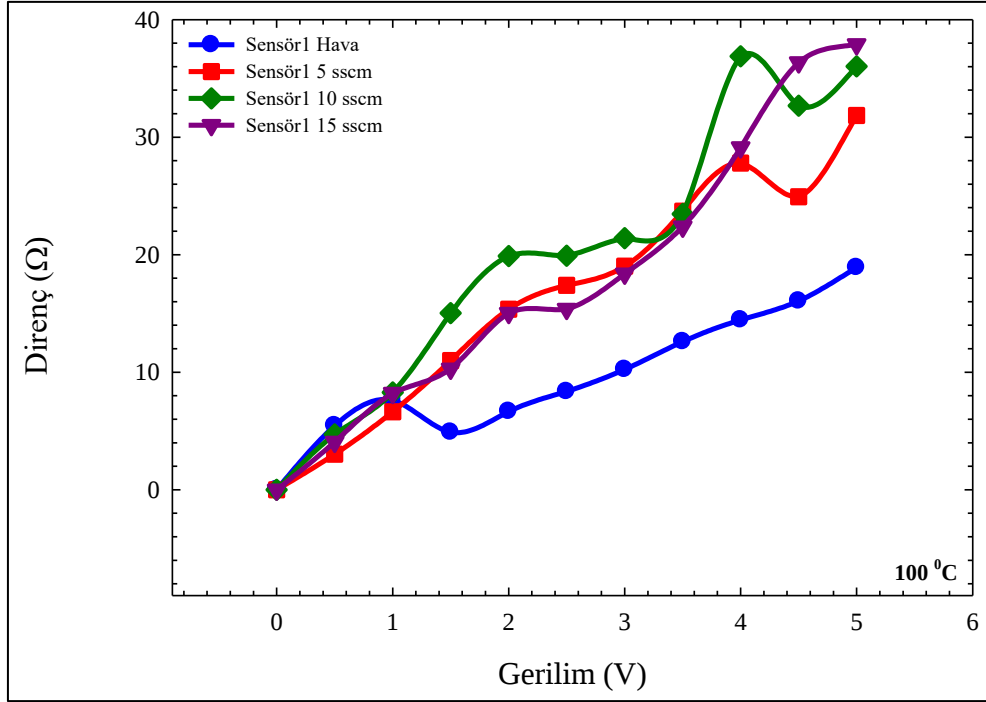


Şekil 4.10. Sensör-2 için 100 °C’de hava, 5-10-15 sscm gaz miktarları için ölçülen akım gerilim değişimi

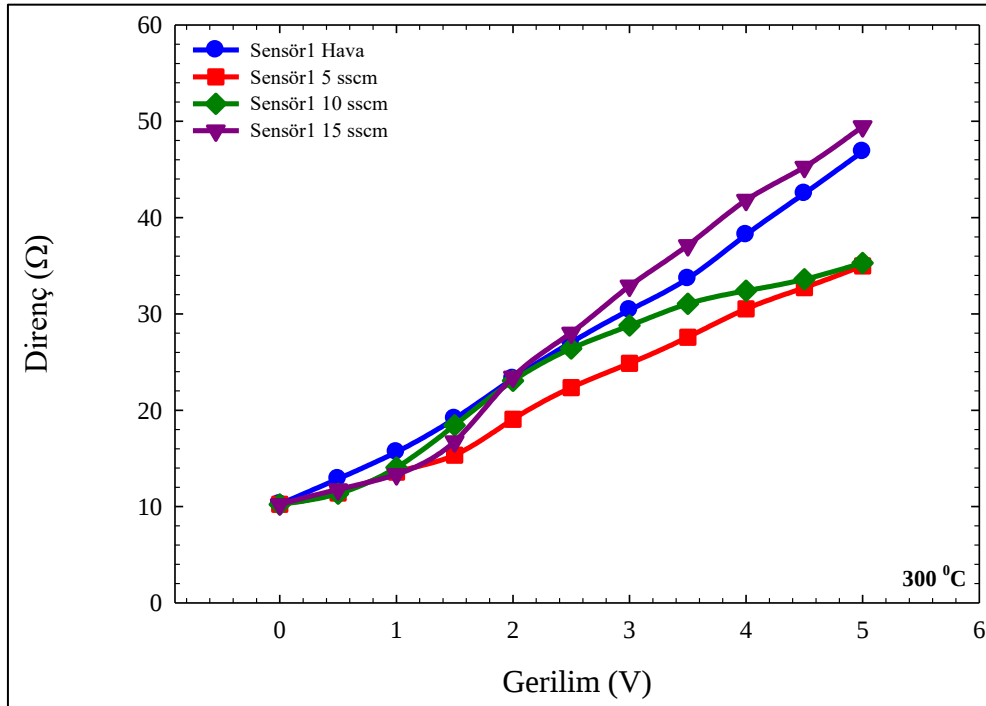


Şekil 4.11. Sensör-2 için 300 °C’de hava, 5-10-15 sscm gaz miktarları için ölçülen akım gerilim değişimi

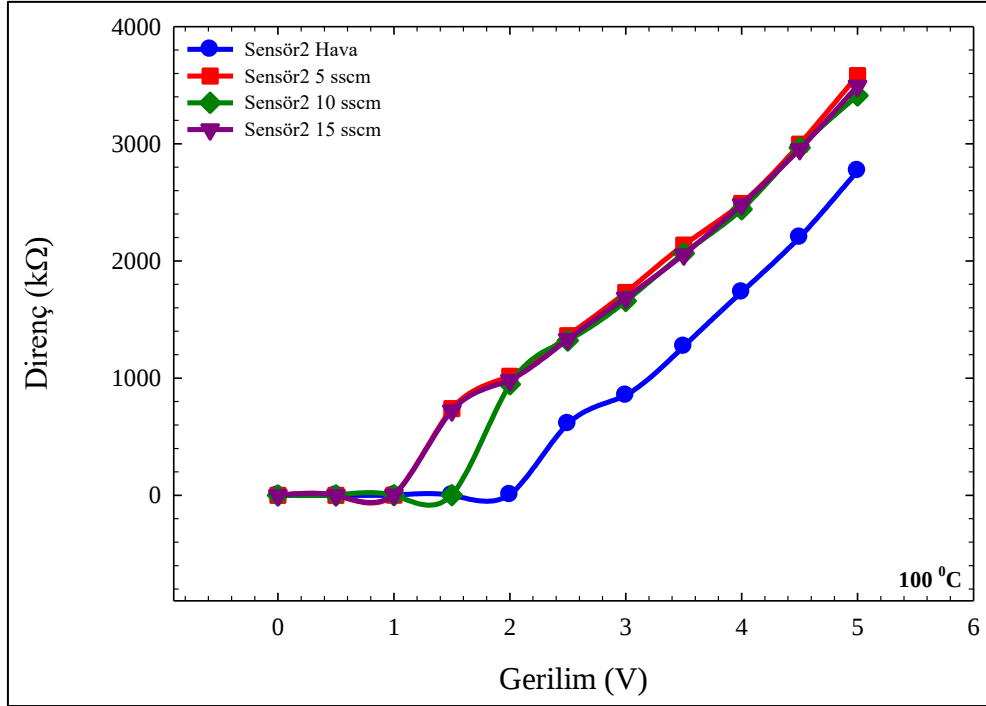
Gaz sensörü test sisteminde alınan sonuçlar doğrultusunda sensörlerde oluşan direnç değişimi değerlendirildi. Sensörlerin gaz konsantrasyonuna bağlı olarak direnç değişimi Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verildi. Grafikten de görüldüğü üzere hem 100 °C de hem de 300 °C de, değişen gaz miktarına bağlı olarak bir direnç değişimi mevcuttur. Sensörlerin direnç değişimine bağlı olarak sensörün gaz duyarlılığı hesaplandı literatürdeki değerlerle kıyaslamak açısından 5 V’daki gaz konsantrasyonuna bağlı duyarlılık değişimi Şekil 4.11’de verildi.



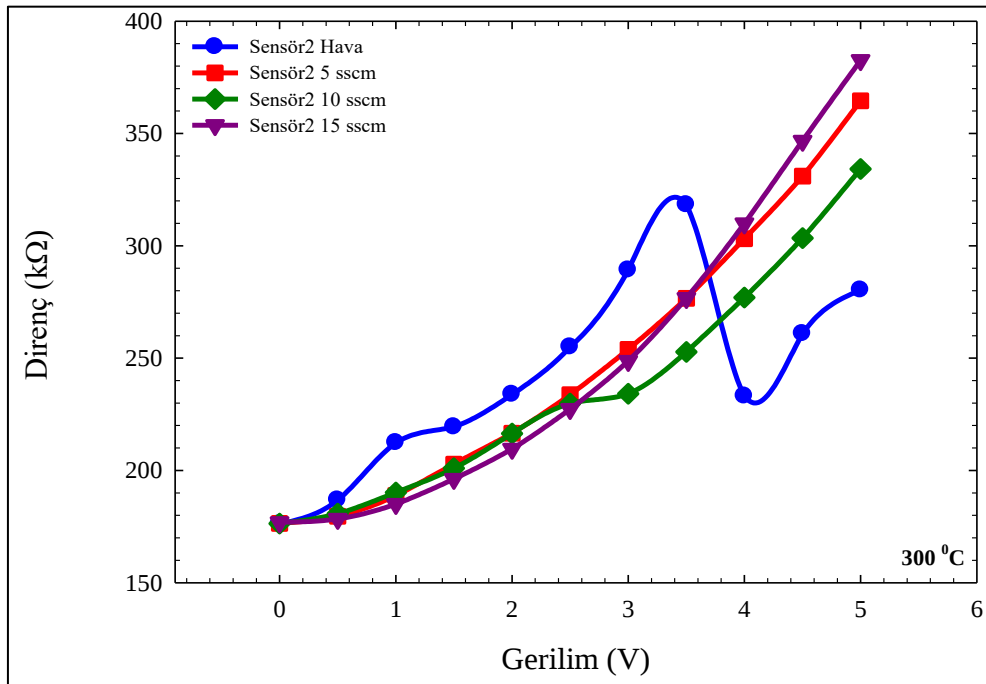
Şekil 4.12. Sensör-1 için 100 °C’de hava, 5-10-15 sscm gaz miktarları için ölçülen direnç gerilim değişimi



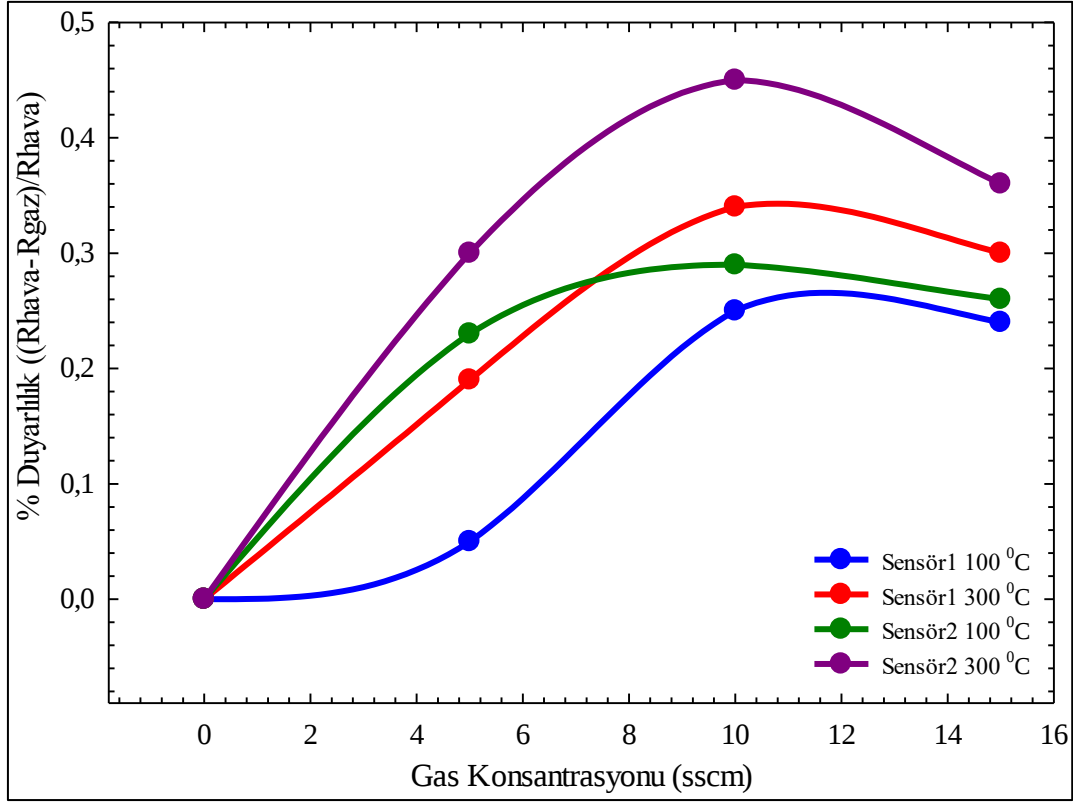
Şekil 4.13. Sensör-1 için 300 °C’de hava, 5-10-15 sscm gaz miktarları için ölçülen direnç gerilim değişimi



Şekil 4.14. Sensör-2 için 100 °C’de hava, 5-10-15 sscm gaz miktarları için ölçülen direnç gerilim değişimi



Şekil.4.15. Sensör-2 için 300 °C’de hava, 5-10-15 sscm gaz miktarları için ölçülen direnç gerilim değişimi



Şekil 4.16. Sensör-1 ve Sensör-2'nin farklı sıcaklıklarda 5 V' deki gaz konsantrasyonuna bağlı duyarlılık grafiği

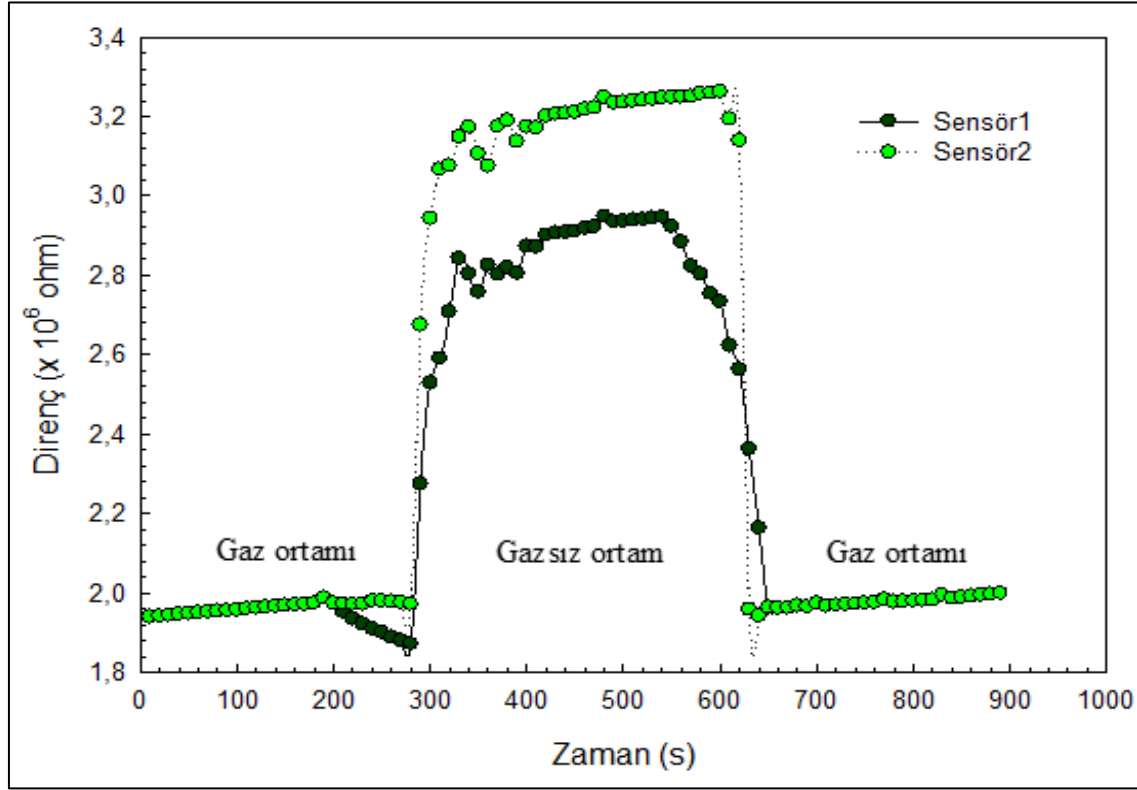
Grafikten görüleceği üzere gaz konsantrasyonu arttıkça duyarlılık 10 sscm değerine kadar artış göstermiş, 10 sscm değerlerinden sonra ise azalma eğilime gitmiştir. Bu durum literatürdeki sonuçlar ile benzerlik göstermektedir. Sensör-1'in 100 °C ve 300 °C'deki duyarlılık değerleri birbirleriyle yakındır. Ancak Sensör-2 için 100 °C ve 300 °C arasında bariz bir duyarlılık farkı olup sıcaklıkla birlikte duyarlılık değerlerinde arttığı görülmektedir. Sensör-1 ve sensör-2'nin 10 sscm bütan gazına duyarlılıkları Şekil 4.17'de verildi.

Bir sensörün duyarlılığı,

$$S = \frac{R_a - R_s}{R_a} \times 100\% \quad (4.10)$$

İfadesi ile hesaplanabilir. R_a , sensörün hava ortamındaki ölçülen direnci R_s ise gaz ortamında ölçülen direncidir. Yapılan hesaplamalar, 10 sscm bütan gazı varlığında Sensör-1'in duyarlılığının %34 ve Sensör-2'nin duyarlılığının %45 dolayında olduğunu göstermektedir. 100 °C gibi düşük sıcaklıkta, geliştirilen sensörlerin bariz duyarlılık değerlerine sahip

olması, düşük sıcaklık sensör teknolojisinin gelişimi açısından önemli olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 4.17. Sensörlerin 10 sscm bütan gazına duyarlılığı

Şekil 4.17, bir örnek olarak, sensörün geri kazanım/tepki süresinin, 300 °C çalışma sıcaklığında bütan gazı (10 sscm) yokluğunda ve varlığında sensör direncindeki değişime bağlı olduğunu göstermektedir. Yapılan test sürecinde, önce sensörün direnci 4,6 dakika süresince hava ortamında kaydedildi. Bu süre içerisinde sensör direncinin hemen hemen sabit olduğu görülmektedir. Daha sonra, odadaki hava yerine 10 sscm bütan gazı karışımı kullanıldığında sensör direncinin keskin biçimde arttığı gözlemlendi. Sensör direncinin durumunu değerlendirmek amacıyla 6 dakika dolayında beklenildi. Sensör direnç değişiminin minimum düzeyde olduğu ve sabit bir plato izlediği değerlendirildi. Bundan sonra, gazın odadan uzaklaştırılması durumunda sensör direncinin, Sensör-1 için 10 saniye, Sensör-2' de ise 2-3 saniyede azaldığı ve başlangıçtaki değerine hızlıca geri düştüğü gözlemlendi. Bu hızlı değişimin, sensör üzerine bütan gaz karışımı gönderildiği başlangıç durumunda da gözlenmesi, sensörlerin algılama tepkisinin iyi olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, üretilen sensörlerin iyi bir tepki süresine sahip olduğunu göstermektedir. Tekrarlanabilirliğin tespiti için bu işlem 1 saatlik periyod ile 4-5 kez tekrarlandı ve sensörün

direncinde benzer davranışlar gözlemlendi. Şekil 4.17’ de dikkat çeken diğer bir durum ise Sensör-2’nin Sensör-1’den daha yüksek duyarlılığa ve düşük tepki süresine sahip olmasıdır. Bu ise %5 oranında Pt ile katkılanmış sensörün duyarlılık ve tepki süresi açısından daha avantajlı olduğunu göstermektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, CTS110, CTS111 ve CTS112 numaralı Pt:SnO₂ yarıiletken ince filmlerin eş püskürtme sistemi ile n-tipi silisyum ve cam alttaşlar üzerine püskürtme metodu ile kaplandı. Kaplanan numunelerin yapısal özellikleri XRD desenlerinin, morfolojik özellikleri AFM cihazı ile yüzey görüntülerinin ve optik özellikleri UV-Vis sistemi ile optik geçirgenlikleri analiz edilmesiyle belirlendi. Özellikleri incelenen ve optimize edilen numunelerden CTS111 ve CTS112 numaralı numune rejimleri kullanılarak, Al₂O₃ alttaş üzerine maske hizalama sistemi ile Sensör-1 ve Sensör-2 olarak isimlendirilen sensör fabrikasyonları gerçekleştirildi. Fabrikasyonu tamamlanan numunelerin gaz sensör sistemi ile akım-gerilim, direnç değişimi gibi temel parametreleri belirlendi.

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen sensörler ele alındığında; Sensör-1 gaz sensöründe sensör çalışma sıcaklığının etkisi gözlenmezken, Sensör-2 gaz sensöründe sensör çalışma sıcaklığının etkisi ortaya çıktığı görüldü. Sensör-2 gaz sensöründe sensör çalışma sıcaklığı; 100 °C olarak ayarlandığında, gaz konsantrasyonu değişimine bağlı olarak, sensör duyarlılığı 0,23 civarında değişim sergilerken; 300 °C olarak ayarlandığında, gaz konsantrasyonu değişimine bağlı olarak, sensör duyarlılığı 0,45'den büyük bir değişim sergilemektedir. Duyarlılıktaki bu artış, çalışma sıcaklığının 300 °C olarak ayarlanması ile Sensör-2 gaz sensörünün daha verimli kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, üretilen iki sensörlerin 100 °C sensör çalışma sıcaklığında ve 10 sscm bütan gazı konsantrasyonunda Sensör-1'in duyarlılığı 0,34, Sensör-2 gaz sensörünü öne çıkardığı düşünülmektedir. Elde edilen elektriksel sonuçlar, morfolojik sonuçlar ile birlikte ele alındığında; Sensör-2 gaz sensörünün duyarlılığındaki bu artış, Sensör-2 gaz sensörünü oluşturan Pt:SnO₂'nin kristalliğinin daha iyi olması ile ilişkilendirilebilir görülse de asıl etkinin, aktif malzemenin iletkenliğine olumlu katkı sağladığı düşünülen Pt katkı atomları ile Sn atomlarının örgü uyumu oluşturmamasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Bu yorum, uygun Pt katkısının sensör çıktı parametrelerini iyileştireceği fikrini desteklemekle birlikte, Pt miktarının artırılmasının sensör çıktı parametreleri ve üretim maliyeti açısından bir dezavantaj oluşturacağını da unutmamak gerekmektedir.

KAYNAKLAR

1. Ansari, Z. A., Ansari, S. G., Ko, T. and Oh, J - H. (2002). Effect of MoO₃ doping and grain size on SnO₂-enhancement of sensitivity and selectivity for CO and H₂ gas sensing. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 87, 105-114.
2. Asar T., Korkmaz B., Efkere H.İ., Akın N., Özçelik S. (2018). In₂O₃ İnce Filmlerin Yapısal, Morfolojik, Optik ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi: Gaz Sensörü Uygulamaları. *Politeknik Dergisi*. 2, 265-271.
3. Asar T., Korkmaz B., Özçelik S. (2016). Effect of platinum doping on the structural and electrical properties of SnO₂ thin films. *Journal of Experimental Nanoscience*, 11(16), 1285-1306.
4. Batzill, M., Diebold, U., (2005). The surface and materials science of tin oxide. *Progress in Surface Science*, 79(2-4), 47–154.
5. Berna, A., (2010). Metal Oxide Sensors for Electronic Noses and Their Application to Food Analysis. *Sensors*, 10, 3882-3910.
6. Bochenkov, V. E., Sergeev, G. B. (2010). *Sensitivity, Selectivity and Stability of Gas-Sensitive Metal-Oxide Nanostructures*. American Scientific Publishers.
7. Boylestad, R. and Nashelsky, L. (1998). *Electronic Devices and Circuit Theory* (Seventh Edition). New York/USA: Prentice-Hall, 3-42.
8. Caferov, T. (1998). *Yarıiletken Fiziği-1*. İstanbul. Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, 200.
9. Cömert, B. (2015). *TiO₂ İnce Film Gaz Sensörlerinin Geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
10. Eranna, G., Joshi, B.C., Runthala, D.P., Gupta, R.P. (2004). Oxide Materials for Development of Integrated Gas Sensors-A Comprehensive Review, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 29, 111-188.
11. Hamada, N., Sawada, S.I. and Oshiyama, A. (1992). New onedimensional conductors: graphitic microtubules. *Physical Review Letters*, 68, 1579–1581.
12. Hecht, J. (2008). *Understanding Lasers: An Entry Level Guide* (Third Edition). New Jersey/USA: IEEE Pres, 270-300.
13. Heller, A. (1995). Chemistry and Applications of Photocatalytic Oxidation of Thin Organic Films. *Accounts of Chemical Research*, 28(12), 503-508.
14. Holleman, A. F., Wiberg, E., (2001) *Inorganic chemistry*, San Diego: Academic Press, 79(8), 944.

15. Huang, J. and Wan, Q. (2009). Gas Sensors Based on Semiconducting Metal Oxide One-Dimensional Nanostructures. *Sensors*, 9, 9903-9924
16. Kittel C. (1996). *Katıhal Fiziğine Giriş*. İstanbul. Bilgi Tek Yayıncılık, İstanbul, 22, 434.
17. Neamen, D. A. (2003). *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles* (Third Edition). New York/USA: McGraw-Hill, 1-10.
18. İnternet: Tin(IV) Oxide. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Tin\(IV\)_oxide](https://en.wikipedia.org/wiki/Tin(IV)_oxide), Son Erişim Tarihi: 12.11.2019
19. Seeger, K. (2004). *Semiconductor Physics: An Introduction* (Ninth Edition). Berlin/Germany: Springer-Verlag, 10- 32.
20. Selmi, M., Chaabouni, F., Abaab, M. and Rezig, B. (2008). Preparation and characterization of TiO₂ thin films grown by RF magnetron sputtering. *Physica status solid*, 10, 3368–3372.
21. Shackelford, J. F. (2005). *Introduction to Materials Science for Engineers* (Sixth Edition). New Jersey/USA: Pearson Education, 623-665.
22. Shishiyanu, S. T., Shishiyanu, T.S., Lupan, O.I. (2005). Sensing Characteristics of Tin-Doped ZnO Thin Films as NO₂ Gas Sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 107, 379-386.
23. Bargougui R., Oueslati A., Schmerber G., Ulhaq-Bouillet, C., Colis, S., Hlel, F., Ammar, S. And Dinia, A. (2014). Structural, optical and electrical properties of Zn-doped SnO₂ nanoparticles synthesized by the co-precipitation technique. *Journal of Materials Science Material in Electronics*, 25(5), 2066-2071.
24. Gui, T., Hao, L., Wang, J., Wei, J., Long, H., Lipeng, Y. And Xaoli, D. (2010). Structure and features of SnO₂ thin films prepared by RF reactive sputtering. *Chinese Optics Letter*, 8(S1), 134-136.
25. Kamble, V.B., Bhat, S.V., Umarji, A.M. (2013). Investigating thermal stability of structural defects and its effect on d⁰ ferromagnetism in undoped SnO₂. *Journal of Applied Physics*, 113, 244307.
26. Ginley DS, Bright C. (2000). Transparent conducting oxides. *Material Research Society Bull*, 25, 15-18.
27. Chopra, K.L., Major, S., Pandya, D.K. (1983). Transparent conductors - a status review. *Thin Solid Films*, 102,1-46.
28. Snaith, H.J., Ducati, C. (2010). SnO₂-based dye-sensitized hybrid solar cells exhibiting near unity absorbed photon-to-electron conversion efficiency. *Nano Letter*, 10, 1259-1265.

29. McDowell, M.G., Sanderson, R.J., Hill, I.G. (2008). Combinatorial study of zinc tin oxide thin-film transistors. *Applied Physics Letter*, 92, 2007-2009.
30. Li, Y., Yin, W., Deng, R., Chen, R., Chen, J., Yan, Q., Yao, B., Sun, H., Wei, S.H. and Wu, T. (2012). Realizing a SnO₂-based ultraviolet light-emitting diode via breaking the dipole-forbidden rule. *NPG Asia Materials*, 4, 30-32.
31. Isono, T., Fukuda, T., Nakagawa, K., Usui, R., Satoh, R., Morinaga, E. and Mihara, Y. (2007). Highly conductive SnO₂ thin films for flat-panel displays. *Journal of the Society for Information Display*, 15(2), 161-166.
32. Nelli, P., Faglia, G., Sberveglieri, G., Cereda, E., Gabetta, G., Dieguez, A., Romano-Rodriguez, A. And Morante, J.R. (2000). The aging effect on SnO₂ Au thin film sensors: electrical and structural characterization. *Thin Solid Films*, 371(1-2), 249-253.
33. Hagemeyer, A., Hogan, Z., Schlichter, M., Smaka, B., Streukens, G., Turner, H., Volpe, A., Weinberg, H. And Yaccato, K. (2007). High surface area tin oxide. *Applied Catalysis A: General*, 317(2), 139-148.
34. Paek, S.M., Yoo, E., Honma, I. (2009). Enhanced cyclic performance and lithium storage capacity of SnO₂/graphene nanoporous electrodes with three-dimensionally delaminated flexible structure. *Nano Letter*, 9, 72-75.
35. Bernardi, M.I.B., Soledade, L.E., Santos, I.A., Leite, E.R., Longo, E. and Varela, J.A. (2002). Influence of the concentration of Sb₂O₃ and the viscosity of the precursor solution on the electrical and optical properties of SnO₂ thin films produced by the Pechini method. *Thin Solid Films*, 405(1-2), 228-233.
36. Yan, J., Khoo, E., Sumboja, A. and Lee, P.S. (2010). Facile coating of manganese oxide on tin oxide nanowires with high-performance capacitive behavior. *American Chemical Society Nano*, 4(7), 4247-4255.
37. Scott, J.F. (1998). High-dielectric constant thin films for dynamic random access memories (Dram). *Annual Review of Materials Science*, 28, 79-100.
38. Bose, A.C., Kalpana, D., Thangadurai, P. and Ramasamy, S. (2002). Synthesis and characterization of nanocrystalline SnO₂ and fabrication of lithium cell using nano-SnO₂. *Journal of Power Sources*, 107(1), 138-141.
39. Borse, R.Y., Garde, A.S. (2008). Electrical and gas sensing properties of SnO₂ thick film resistors prepared by screen-printing method. *Sensors Transducers*, 97, 64-73.
40. Hudaya, C., Jeon, B.J., Lee, J.K. (2015). High thermal performance of SnO₂:F thin transparent heaters with scattered metal nanodots. *American Chemical Society Applied Materials Interfaces*, 7, 57-61.
41. Luo, G., Shen, Q., Li, Q., Zhang, D., Wang, C. And Zhang, L. (2011). Corrosion behavior of SnO₂-based electrode ceramics in soda-lime glass liquid. *IOP Conference Series: Materials Science Engineering*, 18(14), 202025.

42. Gu, F., Wang, S.F., Lu, M.K., Zhou, G.J., Xu, D. and Yuan, D.R. (2004). Photoluminescence properties of SnO₂ nanoparticles synthesized by Sol-Gel method. *Journal of Physics Chemistry B*, 108, 8119-8123.
43. Giulio, M.D., Micocci, G., Serra, A. and Tepore, A. (1996). Characteristics of reactively sputtered Pt-SnO₂ thin films for CO gas sensors. *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 14, 2215-2219.
44. Kim, K.H., Park, C.G. (1991). Electrical properties and gas sensing behavior of SnO₂ films prepared by chemical vapor deposition. *Journal Electrochemical Society*, 138, 2408-2412.
45. Schweizer-Berberich, M., Zheng, J.G., Weimar, U., Göpel, W., Barsan, N., Pentia, E. and Tomescu, A. (1996). The effect of Pt and Pd surface doping on the response of nanocrystalline tin dioxide gas sensors to CO. *Sensors Actuators B: Chemical*, 31, 71-75.
46. Kim, H., Auyeung, R.C.Y., Pique, A. (2008). Transparent conducting F-doped SnO₂ thin films grown by pulsed laser deposition. *Thin Solid Films*. 516, 5052-5056.
47. Pena, J., Perez-Pariente, J., Vallet-Regi, M. (2003). Textural properties of nanocrystalline tin oxide obtained by spray pyrolysis. *Journal of Materials Chemistry*, 13, 2290-2296.
48. Du, F., Guo, Z., Li, G. (2005). Hydrothermal synthesis of SnO₂ hollow microspheres. *Materials Letter*, 59, 2563-2565.
49. Manorama, S.V., Gopal, Reddy, C.V., Rao, V.J. (1999). Tin dioxide nanoparticles prepared by sol-gel method for an improved hydrogen sulfide sensor. *Nanostructure Materials*, 11, 643-649.
50. Li, Y., Peng, R., Xiu, X., Zheng, X., Zhang, X. and Zhai, G. (2011). Growth of SnO₂ nanoparticles via thermal evaporation method. *Superlattices Microstructure*, 50, 511-516.
51. Tian, Z.M., Yuan, S.L., He, J.H., Li, P., Zhang, S.Q., Wang, Y.Q. and Liu, L. (2008). Structure and magnetic properties in Mn doped SnO₂ nanoparticles synthesized by chemical co-precipitation method. *Journal Alloys Compounds*, 466, 26-30.
52. Gaggiotti, G., Galdikas, A., Kaciulis, S., Mattogno, G. and Setkus, A. (1995). Temperature dependencies of sensitivity and surface chemical composition of SnO_x gas sensors. *Sensors Actuators B: Chemical*, 25, 516-519.
53. Sinner, M., (2000). *SnO₂ (110) and Nano-SnO₂: characterization by surface analytical techniques*. Doktora Tezi, Tübingen Üniversitesi.
54. Solanki, P.R., Kaushik, A., Agrawal V.V. and Malhotra, B.D. (2011). Nanostructured metal oxide-based biosensors. *NPG Asia Materials*, 3, 17-24.

55. Streetman, B. G. and Banerjee, S. K. (2006). *Solid State Electronic Devices* (Sixth Edition). New Jersey/USA: Prentice-Hall, 1-94, 154-167.
56. Suryanarayana, C. and Norton M. G. (1998). *X-Ray Diffraction: A Practical Approach* (First Edition). New York/USA: Springer Science Business Media, 3-18, 63-160.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KORKMAZ, Burak
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 24.08.1988, Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (533) 608 31 32
 e-mail : burakkorkmaztr@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Fizik	Devam Ediyor
Lisans	Pamukkale Üniversitesi / Fizik	2013
Lise	Aydınlıkevler Anadolu Lisesi	2005

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-Halen	Gazi Teknoloji A.Ş.	Ar-Ge Personeli
2014-2014	Gazi Üniversitesi (BAP)	Uzman

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Asar, T., Korkmaz, B., ve Özçelik, S. (2016). Effect of platinum doping on the structural and electrical properties of SnO₂ thin films. *Journal of Experimental Nanoscience*, 11(16), 1285-1306.

Hobiler

Sinema, Tiyatro, Futbol, Tenis, Yüzme



GAZİ GELECEKTİR..