



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

## ***In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ince filmlerin yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi: gaz sensörü uygulamaları***

### *Investigation of the structural, morphological, optical and electrical properties of In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films: gas sensor applications*

*Yazar(lar) (Author(s)): Tarık ASAR<sup>1</sup>, Burak KORKMAZ<sup>2</sup>, H. İbrahim EFKERE<sup>3</sup>, Nihan AKIN<sup>4</sup>, Süleyman ÖZÇELİK<sup>5</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-2430-0599*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-2671-1022*

*ORCID<sup>3</sup>: 0000-0001-7456-0738*

*ORCID<sup>4</sup>: 0000-0002-2609-9657*

*ORCID<sup>5</sup>: 0000-0002-3761-3711*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Asar T., Korkmaz B., Efker H.İ., Akın N. ve Özçelik S., “In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ince filmlerin yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi: gaz sensörü uygulamaları”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 265-271, (2018).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.403971

# $In_2O_3$ İnce Filmlerin Yapısal, Morfolojik, Optik ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi: Gaz Sensörü Uygulamaları

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Tarık ASAR<sup>1,2,\*</sup>, Burak KORKMAZ<sup>1,2</sup>, H. İbrahim EFKERE<sup>2</sup>, Nihan AKIN<sup>2</sup>, Süleyman ÖZÇELİK<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 06500, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi, 06500, Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 08.02.2017 ; Kabul/Accepted : 09.07.2017)

## ÖZ

Bu çalışmada, RF magnetron püskürtme yöntemi ile 50W ve 100W güç değerlerinde, iki adet  $In_2O_3$  ince film üretildi. Üretilen ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri belirlendi.  $In_2O_3$  ince filmlerin sensör fabrikasyonları tamamlanarak,  $In_2O_3$  gaz sensörleri elde edildi. Gaz sensörleri; butan gazı konsantrasyonu, uygulama voltajı ve sensör çalışma sıcaklığı değiştirilerek test edildi. Test sonuçları incelendiğinde, üretilen her iki sensörün de farklı sensör çalışma sıcaklığı ve gaz konsantrasyonları için kullanıma uygun olduğu görüldü.

**Anahtar Kelimeler:** Metal oksit yarıiletken, indiyum oksit, gaz sensörü.

## Investigation of the Structural, Morphological, Optical and Electrical Properties of $In_2O_3$ Thin Films: Gas Sensor Applications

### ABSTRACT

In this study, two  $In_2O_3$  thin films were prepared at 50W and 100W target power by using RF magnetron sputtering technique. The structural, morphological and optical properties of the produced thin films were investigated. The  $In_2O_3$  gas sensors were produced by completing the fabrications of  $In_2O_3$  thin films. The gas sensors were tested with changing butane gas concentration, application voltage and sensor operating temperature. When the test results were examined, it was seen that both of the produced sensors were found to be suitable for using with different sensor operating temperatures and gas concentrations.

**Keywords:** Metal oxide semiconductor, indium oxide, gas sensor.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Metal oksitler; eşsiz fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı, son zamanlarda sıkça çalışılmaktadır [1–3]. Metal oksit malzemeler içerisinde; geniş bant aralığı (3.5 eV – 3.7 eV), yüksek elektriksel iletkenlik ve yüksek optik geçirgenlik gibi önemli fonksiyonel özelliklere sahip olan indiyum oksit ( $In_2O_3$ ) ince filmler dikkat çekmektedir [4–6].  $In_2O_3$  ince filmlerin optik, yapısal ve elektriksel özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla; püskürtme [7,8], buharlaştırma [9,10], atomik tabaka epitaksiyel büyütme [11], dönel kaplama [12], sol-gel [13] gibi metotlar kullanılmaktadır. Bu geliştirilebilir özelliklerinin birleşimi, indiyum oksit ince filmlerin, güneş hücrelerinde [14], organik ışık yayan diyotlarda [15] veya gaz sensörleri [16] gibi optoelektronik uygulamalarda kullanılmasına imkân vermektedir.

$SnO_2$ ,  $In_2O_3$  gibi gaz sensörleri, atmosferdeki zararlı ve zehirli gazların algılanması, izlenmesi ve kontrol edilmesi konularında hayati rol oynamaktadır [17]. Bu gaz sensörlerinin arasında yer alan  $In_2O_3$  gaz sensörü, hava ortamında çalıştırıldığında, havadaki oksijen molekülleri indiyum oksit yüzeyi tarafından tuzaklanır ve oksijen molekülü iyonlaşır ( $O_2^-$ ,  $O^-$ ,  $O^{2-}$ ). Böylece, yüzeye yakın kısımda yük taşıyıcılarının sayısı artar ve bir tüketim bölgesi oluşur. Bu durumdaki  $In_2O_3$  gaz sensörü, etanol buharı gibi indirgeyici bir gaza maruz bırakılırsa, indirgeyici gaz ile iyonlaşmış oksijene sahip tüketim bölgesi etkileşir. Bu karşılıklı indirgeyici gazın oksitlenmesi ile sonuçlanır. Bu oksitlenme fenomeni,  $In_2O_3$  yüzeyinden oksijen iyonlarının ayrılmasına ve dolayısıyla bariyer yüksekliğinin azalmasına neden olur. Bariyer yüksekliğinin azalması ise, iletkenliğin artmasına yol açar [17]. Bariyer yüksekliğindeki ve iletkenlikteki bu değişim, uygun elektronik düzenekler ile algılanır. Elektronik devreler tarafından işlenen bu

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : trkasar@gazi.edu.tr

değişim, sesli ve ya görüntülü ikaz olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada, *RF* magnetron püskürtme yöntemi ile *50W* ve *100W RF* gücü değerlerinde iki adet katkısız  $In_2O_3$  ince film üretildi. Üretilen filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri belirlendi.  $In_2O_3$  ince filmlerin sensör fabrikasyonları tamamlanarak, iki adet (*Sens-1* ve *Sens-2*) gaz sensörü elde edildi. Bu gaz sensörleri; bütan gazı konsantrasyonu, uygulama voltajı ve sensör çalışma sıcaklığı değişimine göre test edildi.

## 2. DENEYSSEL DETAYLAR

### (EXPERIMENTAL DETAILS)

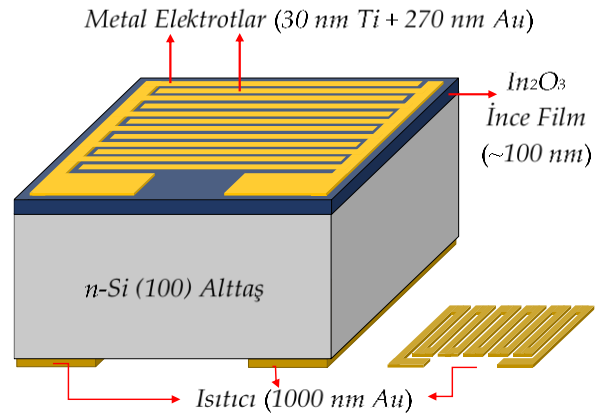
İndiyum oksit ( $In_2O_3$ ) ince filmler, farklı  $In_2O_3$  hedef gücü değerlerinde, *n-Si (100)* ve *cam* alttaşlar üzerine oda sıcaklığında radyo frekans püskürtme (sputtering) tekniği ile kaplandı. Alttaşlar sisteme yüklenmeden hemen önce, kimyasal yolla temizlendi. Kaplamalarda (%99.98) saflık oranına sahip  $In_2O_3$  hedef malzeme kullanıldı. Hedeflerin güç değişimlerinin kaplamaya etkisini incelemek amacıyla, *50W* ve *100W* güç değerlerinde, sırasıyla, *InOx-1* ve *InOx-2* olarak isimlendirilen iki numune üretildi. Numunelerin üretimi sırasında; alttaş sıcaklığı, kaplama basıncı ve hedef-numune arası mesafe gibi kaplamayı etkileyebilecek diğer kaplama parametreleri sabit tutuldu. Kaplama parametreleri Çizelge 1’de verildi.

Üretimi tamamlanan numunelerin hedeflenen kalınlıkta ince filmlere sahip olup olmadığı, profilometre cihazı ile tayin edildi. İstenilen kalınlıkta olduğu teyit edilen ince filmlerin yapısal özellikleri X-ışınları kırınım difraktometresi (*XRD*), morfolojik özellikleri atomik kuvvet mikroskobu (*AFM*) ve optik özellikleri ultraviyole-görünür (*UV-VIS*) spektrometre ölçümleri ile belirlendi.

**Çizelge 1.**  $In_2O_3$  ince film kaplama parametreleri (Deposition parameters of  $In_2O_3$  Thin Films)

Numune Adı		<i>InOx-1</i>	<i>InOx-2</i>
Hedef Türü		$In_2O_3$	$In_2O_3$
Hedef Gücü	(W)	50	100
Alttaş sıcaklığı	(°C)	22	22
Kaplama Basıncı	( <i>mtorr</i> )	30	30
Hedef-Numune Arası Mesafe	( <i>cm</i> )	12	12
Kaplama Süresi	( <i>Dakika</i> )	45	30
Kalınlık	( <i>nm</i> )	98	97

Yapısal, morfolojik ve optik özellikleri belirlenen  $In_2O_3$  ince filmlerin sensör fabrikasyonları ise Şekil 1’de gösterilen, ısıtıcı ve metal elektrotların oluşturulması ile tamamlandı. Fotolitografik süreçler kullanılarak elde edilen ısıtıcı ve elektrotların metalizasyonunda; ısıtıcılar için *1000 nm* altın, elektrotlar için ise *30 nm* titanyum, üzerine *270 nm* altın kaplaması yapıldı. Fabrikasyonu tamamlanarak, Şekil 1’de şematize edildiği üzere sensöre dönüştürülen  $In_2O_3$  ince filmler *Sens-1* ve *Sens-2* olarak isimlendirildi.



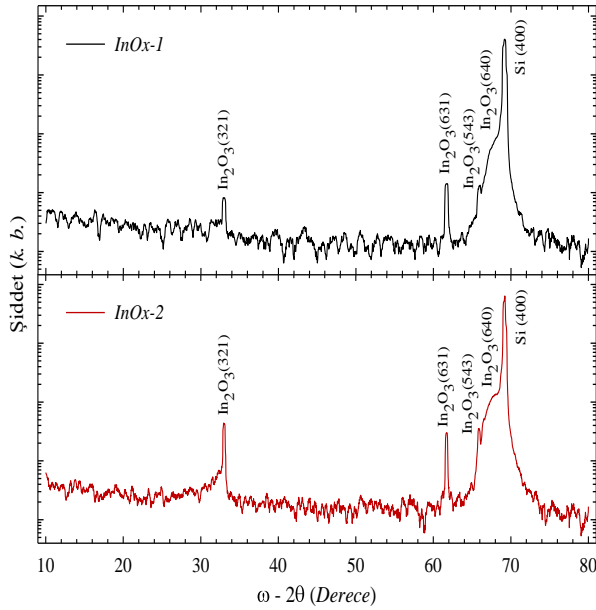
**Şekil 1.**  $In_2O_3$  gaz sensörünün şematik gösterimi (The schematic demonstration of  $In_2O_3$  gas sensor).

Üretilen sensörler; *250 ppm*, *500 ppm* ve *750 ppm* bütan gazı konsantrasyonlarında, *0V*, *1V*, *2V*, *3V*, *4V* ve *5V* uygulama voltajı değerlerinde ve *100°C* ve *300°C* çalışma sıcaklıklarında *Gaz Sensörü Test Sistemi* kullanılarak test edildi. Test sisteminde; *500 °C*’lik ısıtıcılı dört kontak sonda istasyonuna sahip şeffaf ölçüm odası, azot ve bütan gazlarını  $\pm 0.5$  hassasiyetle ayarlama imkanı sağlayan iki adet kütle akış kontrolörü (*Sierra SmartTrak100 MFC*), bilgisayar tarafından kontrol edilebilir endüstriyel tip akım-gerilim ölçer (*Fluke 289*), iki adet güç kaynağı (*Yıldırım Elektronik Y-0012*) ve  $10^{-2}$  *mbar*’lık vakum pompası yer almaktadır.

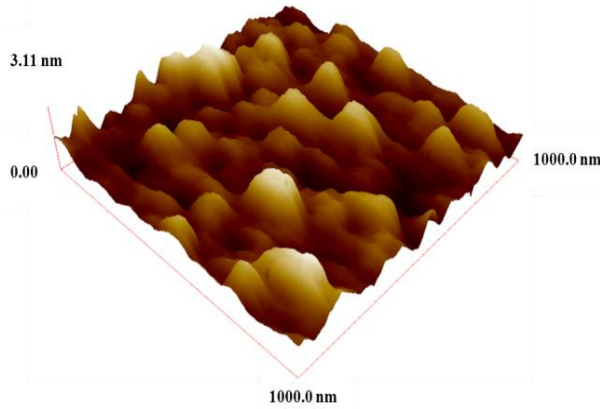
## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

### (RESULTS AND DISCUSSION)

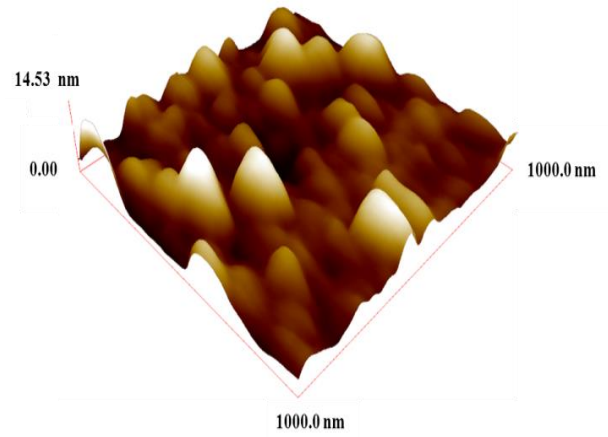
Şekil 2’de yer verilen  $In_2O_3/n-Si$  yapısının *XRD*  $\omega-2\theta$  taramasında; en şiddetli kırınım piki *n-Si* alttaşın kaynaklanmaktadır [18]. Diğer kırınım pikleri ise  $In_2O_3$  ince filme ait  $In_2O_3$  (321),  $In_2O_3$  (631),  $In_2O_3$  (543) ve  $In_2O_3$  (640) düzlemlerinde oluşan *XRD* saçılmalarından meydana gelmektedir. Oluşan bu kırınım piklerinin pik pozisyonları, *JCPDS No.06-0416*’da yer alan kırınım pik pozisyonları ile uyum içerisindedir. Bu durum, *n-Si* alttaş üzerine  $In_2O_3$  ince filmlerin cisim-merkezli kübik (*bcc*) polikristal yapıya sahip olarak üretildiğini göstermektedir [19–21]



**Şekil 2.**  $In_2O_3/n-Si$  yapılarına ait XRD  $\omega-2\theta$  desenleri ( $\omega-2\theta$  XRD patterns of  $In_2O_3/n-Si$  structures) 50W ve 100W güç değerlerinde katkısız olarak kaplanan  $In_2O_3$  ince filmlerin yüzey morfolojileri atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanılarak incelendi. Filmlerin  $1 \mu m \times 1 \mu m$ 'lik tarama alanlarındaki iki boyutlu (2D) yüzey görüntüleri sırasıyla, Şekil 3 ve Şekil 4'te sunuldu.



**Şekil 3.**  $InOx-1$  ince filmin yüzey morfolojisi (The surface morphology of  $InOx-1$  thin film)



**Şekil 4.**  $InOx-2$  ince filmin yüzey morfolojisi (The surface morphology of  $InOx-2$  thin film)

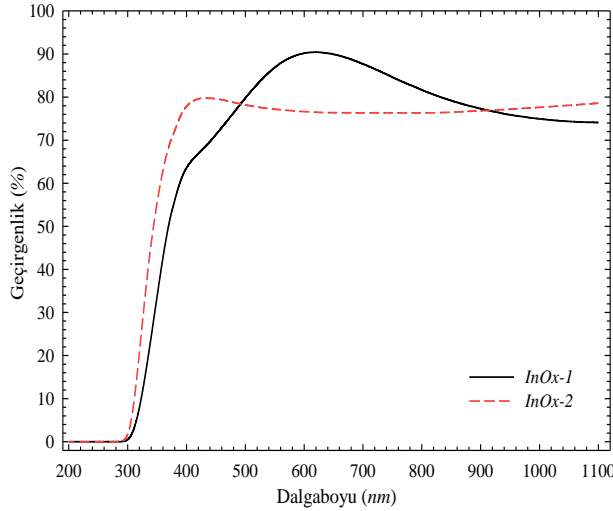
Gaz sensörü gibi geliştirilecek herhangi bir optoelektronik cihazın performansı için, yüzey homojenliği oldukça önemlidir. Bu çalışmada, üretilen her iki filmin de yüzeyi oldukça homojen olmakla birlikte filmlerin yüzeylerinde elektriksel kırılmalara, bir anlamda elektrotlar ile kısa devreler oluşturabilecek kusurlara (defect) da rastlanmadı. Ayrıca,  $In_2O_3$  ince filmlerin yüzey morfolojilerinden elde edilen yüzey pürüzlülüğünün karekök ortalaması ( $RMS$ ) ve tanecik boyutu değerleri;  $InOx-1$  ve  $InOx-2$  örnekleri için sırasıyla;  $0.484 \text{ nm}$ ,  $1.876 \text{ nm}$  ve  $20.15 \text{ nm}$ ,  $23.60 \text{ nm}$  olarak belirlendi ve Çizelge 2’de verildi.

Çizelge 2’den artan kaplama gücü ile  $RMS$  değerinin ve tanecik boyutunun arttığı görülmektedir.  $RMS$  değerinin AFM gibi yüzey görüntüleme sistemlerinde birkaç nanometre civarında olması, malzeme yüzeyinin kaliteli olduğunu gösterir. Ancak; gaz sensörleri gibi bazı aygıtlarda;  $RMS$  değerinin birkaç nanometreden daha yüksek olması, büyük tanecik boyutundan ötürü sensör algılama yüzeyinin genişlemesine ve dolayısıyla, sensör hassasiyetinin de artmasına neden olabilmektedir. Elde edilen AFM sonuçları dikkate alındığında;  $InOx-2$  numunesinden üretilen gaz sensörünün;  $InOx-1$  numunesinden üretilen gaz sensöründen daha yüksek duyarlılığa sahip olması beklenebilir [22].

**Çizelge 2.**  $In_2O_3$  ince filmlere ait AFM bulguları (The AFM results of  $In_2O_3$  thin films)

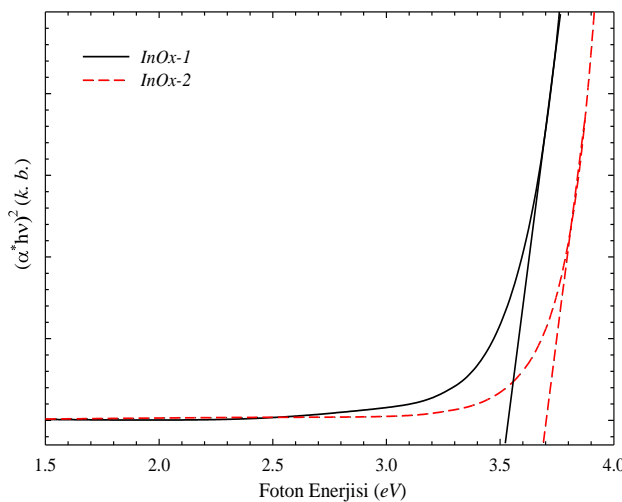
Numune	Hedef Gücü (W)	$In_2O_3$ İnce Film Kalınlığı (nm)	RMS (nm)	Tanecik Boyutu (nm)
$InOx-1$	50	98	0.484	20.15
$InOx-2$	100	97	1.876	23.60

$In_2O_3$  ince filmlerin optik özellikleri ise; cam alttaşlar üzerine kaplanmış örneklerin, 200 nm - 1100 nm dalgaboyu aralığındaki, UV-VIS spektrometre ölçümleri ile belirlendi. Ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak; Şekil 5 ve Şekil 6'da verilen Geçirgenlik - Dalgaboyu ve  $(\alpha \cdot h\nu)^2$  - Foton Enerjisi grafikleri çizildi.



Şekil 5.  $In_2O_3$  ince filmlere ait Geçirgenlik-Dalgaboyu grafiği (The Transmittance-Wavelength graph of  $In_2O_3$  thin films)

Numunelere ait Geçirgenlik - Dalgaboyu grafikleri incelendiğinde,  $In_2O_3$  ince filmlerin; %80 - %90 geçirgenliğe sahip oldukları görülmektedir. Her ne kadar, belirli dalgaboylarında  $InOx-1$  numunesi  $InOx-2$  numunesinden daha yüksek geçirgenliğe sahip olsa da  $InOx-2$  numunesi geniş bir spektrumda homojen bir geçirgenlik sergilemesi sebebiyle tercih edilebilir.



Şekil 6.  $In_2O_3$  ince filmlere ait  $(\alpha \cdot h\nu)^2$ -Foton Enerjisi grafiği (The  $(\alpha \cdot h\nu)^2$ -Photon Energy graph of  $In_2O_3$  thin films)

$InOx-1$  ve  $InOx-2$  yarıiletken ince filmlerin yasak enerji aralıkları,  $(\alpha \cdot h\nu)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişiminden (Şekil 6), sırasıyla, 3.52 eV ve 3.69 eV olarak belirlendi. Belirlenen yasak enerji değerlerinin, literatür ile uyumlu olduğu görüldü [4,23,24].

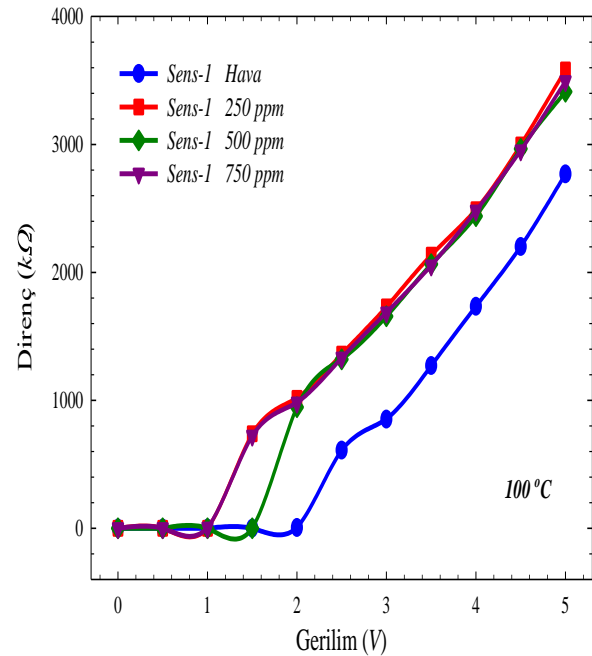
Yapısal, morfolojik ve optik özellikleri belirlenen indiyum oksit ince filmlerin, fabrikasyonları tamamlanarak; gaz duyarlılığı gibi sensör çıktı parametreleri belirlendi.

Gaz sensörlerinin gaz duyarlılıkları ( $S$ ); ortamda gaz olmadan oluşan direncin ( $R_{Hava}$ ), algılanması istenilen gazın ortama verilmesi ile oluşan dirence ( $R_{Gaz}$ ) oranı olarak karşımıza çıkmaktadır [17].

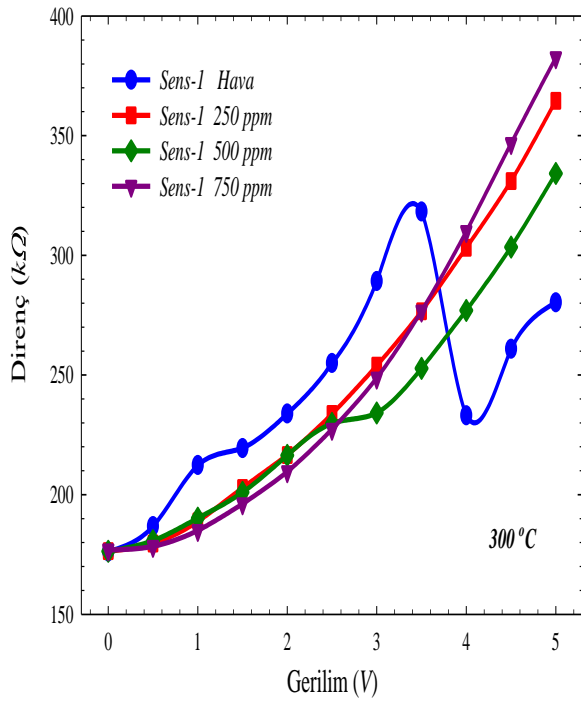
$$S = \frac{R_{Hava}}{R_{Gaz}} \quad (1)$$

O halde; sensörlerin direnç değerlerinin belirlenmesi için gerekli olan elektriksel ölçümlerin; ilk önce sensörlerin test edileceği ortama gaz verilmeden, yani hava ortamında ve daha sonra da duyarlılığının belirlenmesi istenilen gaz ortamında yapılması gerekmektedir.

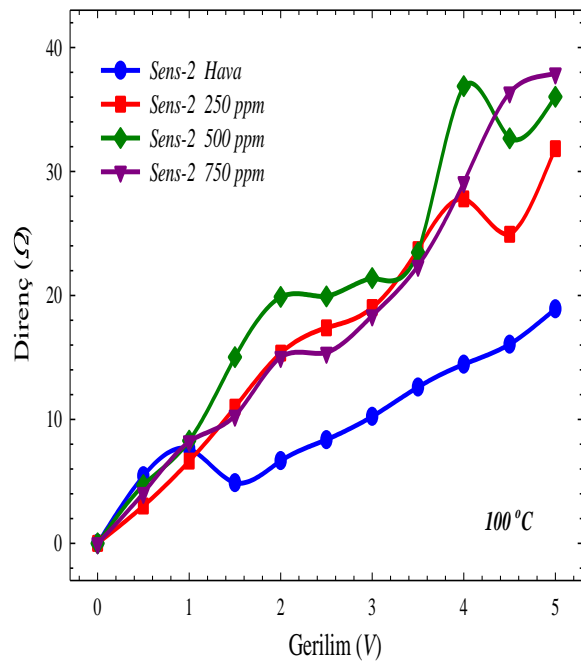
Üretimi tamamlanan gaz sensörlerinin gaz sensörü test sistemindeki elektriksel ölçümleri; 1V'luk artışlarla 0V – 5V uygulama voltajı aralığında, 100 °C ve 300 °C sensör çalışma sıcaklığında; 250 ppm, 500 ppm ve 750 ppm'lik bütan gazı ortamlarında alındı. Elde edilen verilerin kullanılmasıyla çizilen direnç-gerilim ( $R$ - $V$ ) grafikleri Şekil 7-10'da verildi.



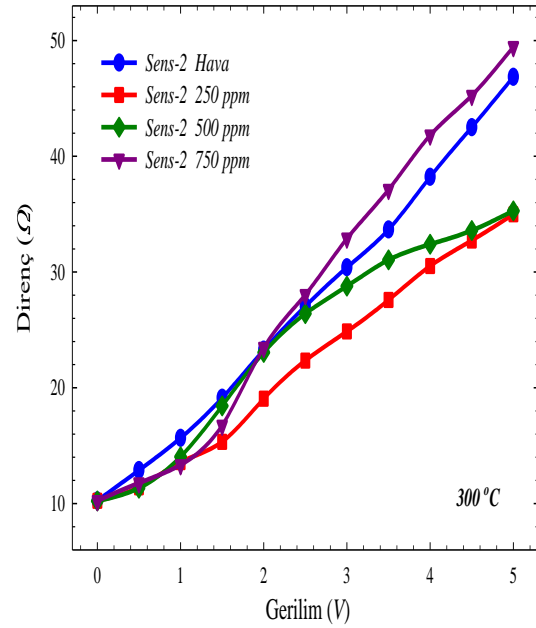
Şekil 7. Sens-1 gaz sensörünün 100 °C çalışma sıcaklığındaki R-V grafiği. (The R-V graph of Sens-1 gas sensor at 100 °C operating temperature)



Şekil 8. Sens-1 gaz sensörünün 300 °C çalışma sıcaklığındaki R-V grafiği. (The R-V graph of Sens-1 gas sensor at 300 °C operating temperature)



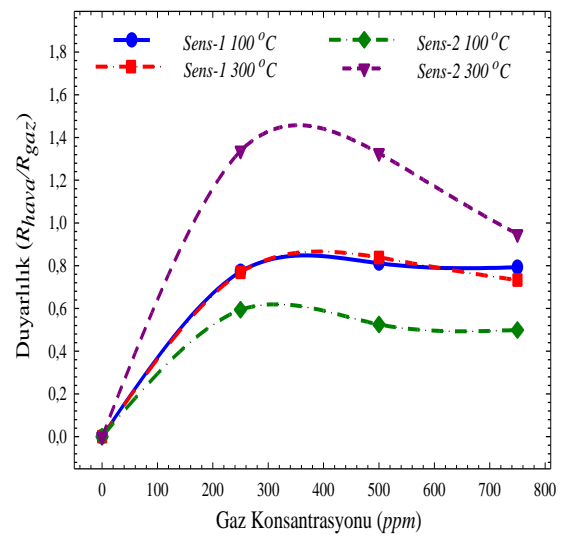
Şekil 9. Sens-2 gaz sensörünün 100 °C çalışma sıcaklığındaki R-V grafiği. (The R-V graph of Sens-2 gas sensor at 100 °C operating temperature)



Şekil 10. Sens-2 gaz sensörünün 300 °C çalışma sıcaklığındaki R-V grafiği. (The R-V graph of Sens-2 gas sensor at 300 °C operating temperature)

Elde edilen direnç değerleri ve Eşitlik.(1) kullanılarak, gaz sensörlerinin bütan gazına karşı duyarlılıkları hesaplandı. Gaz sensörlerinin, farklı sıcaklıklarda ve 5V uygulama voltajındaki duyarlılık - gaz konsantrasyonu değişimi incelendi ve Şekil 11’de verildi.

Şekil 11’den de anlaşılacağı üzere; Sens-1 gaz sensöründe sensör çalışma sıcaklığının etkisi gözlenmezken, Sens-2 gaz sensöründe sensör çalışma sıcaklığının etkisi ortaya çıkmıştır.



Şekil 11. 5V uygulama voltajında çalıştırılan In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gaz sensörlerinin bütan gaz konsantrasyonuna bağlı duyarlılıkları (The sensitivities of the In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gas sensors depend on butane gas concentration at 5V applied voltage)



*Sens-2* gaz sensöründe sensör çalışma sıcaklığı;  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  olarak ayarlandığında, gaz konsantrasyonu değişimine bağlı olarak, sensör duyarlılığı  $0.4 - 0.6$  aralığında değişim sergilerken;  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  olarak ayarlandığında, gaz konsantrasyonu değişimine bağlı olarak, sensör duyarlılığı  $0.9 - 1.5$  aralığında değişim sergilemektedir. Duyarlılıktaki bu artış, çalışma sıcaklığının  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  olarak ayarlanması ile, *Sens-2* gaz sensörünün daha verimli kullanılabilceğini göstermektedir. Ayrıca, üretilen iki sensör  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  sensör çalışma sıcaklığında ele alındığında, her ne kadar *Sens-1* gaz sensörünün duyarlılığı, *Sens-2* gaz sensörünün duyarlılığından daha iyi olsa da, gaz sensörlerinin elektronik devreler ile birlikte kullanımlarındaki sensör çalışma sıcaklığına duyarlılıkları da önem arz etmektedir. Bu açıdan; *Sens-1* gaz sensörünün aksine, *Sens-2* gaz sensörünün sensör çalışma sıcaklığına duyarlı oluşu, *Sens-2* gaz sensörünü bir adım öne çıkardığı düşünülmektedir. Elde edilen elektriksel sonuçlar, morfolojik sonuçlar ile birlikte ele alındığında; *Sens-2* gaz sensörünün duyarlılığındaki bu artış; RMS değerinin ve tanecik boyutunun *Sens-1* gaz sensöründen daha büyük olması ile ilişkilendirilebilir [22].

Bunların yanı sıra, *Sens-1* gaz sensörünün  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  sensör çalışma sıcaklığındaki duyarlılığının, aynı sensör çalışma sıcaklığındaki *Sens-2* sensörünün duyarlılığından yüksek olması; düşük ısıtıcı gücü, yani bir başka deyişle düşük güç tüketimi olması anlamına gelmektedir. Bu açıdan, *Sens-1* gaz sensörü; düşük güç tüketimi istenilen, ancak duyarlılığın çok fazla yüksek olmasının beklenmediği gaz algılama devrelerinde kullanılabilir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada; RF magnetron püskürtme yöntemi ile  $50\text{ W}$  ve  $100\text{ W}$  güç değerlerinde hazırlanan, cisim-merkezli kübik (*bcc*) polikristal yapıya sahip,  $\text{In}_2\text{O}_3$  ince filmlere ve bu ince filmlerden üretilen gaz sensörlerine yer verildi. İnce filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri belirlendi. Yüzey pürüzlülüğünün karekök ortalaması ve tanecik boyutu değerleri; *InOx-1* ve *InOx-2* örnekleri için sırasıyla;  $0.484\text{ nm}$ ,  $1.876\text{ nm}$  ve  $20.15\text{ nm}$ ,  $23.60\text{ nm}$  olarak bulundu. Filmlerin %80 - %90 geçirgenliğe sahip oldukları görüldü. Yasak enerji aralıkları, sırasıyla;  $3.52\text{ eV}$  ve  $3.69\text{ eV}$  olarak belirlendi.  $\text{In}_2\text{O}_3$  ince filmlerin sensör fabrikasyonları tamamlanarak, *Sens-1* ve *Sens-2* gaz sensörleri üretildi. Bu gaz sensörleri; farklı bütan gazı konsantrasyonlarında ( $0-750\text{ ppm}$ ), farklı uygulama voltajı değerlerinde ( $0-5\text{ V}$ ) ve farklı çalışma sıcaklıklarında ( $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) test edildi. *Sens-1* gaz sensörünün aksine, *Sens-2* gaz sensörünün sensör çalışma sıcaklığına duyarlı olduğu görüldü. Yüksek duyarlılıkta çalışan gaz sensörlerinin, sensör çalışma sıcaklığının değişimine ihtiyaç duydukları düşünüldüğünde, bu özelliği ile *Sens-2* gaz sensörü ön plana çıkmaktadır. Ancak, her iki gaz sensörü;  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  sensör çalışma sıcaklığındaki elektriksel özellikleriyle ele alındığında; *Sens-1* gaz sensörü; *Sens-2* sensöründen daha yüksek duyarlılığa sahip olduğu görülmektedir. Bu

özellik, *Sens-1* gaz sensörünü; düşük güç tüketimi, düşük duyarlılık beklenen gaz algılama devrelerinde kullanılabilir hale getirmektedir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Kalkınma Bakanlığı (Proje No: 2011K120290) tarafından desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] T. Asar, B. Korkmaz, S. Özçelik, "Effect of platinum doping on the structural and electrical properties of  $\text{SnO}_2$  thin films", *J. Exp. Nanosci.*, 11: 1285–1306, (2016).
- [2] B. Kinaci, T. Asar, S.Ş. Çetin, Y. Özen, K. Kizilkaya, "Electrical characterization of  $\text{Au}/\text{ZnO}/\text{TiO}_2/\text{n-Si}$  and  $(\text{Ni}/\text{Au})/\text{ZnO}/\text{TiO}_2/\text{n-Si}$  Schottky diodes by using current-voltage measurements", *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, 14: 959–963, (2012).
- [3] B. Coskun, T. Asar, U. Akgül, K. Yildiz, Y. Atici, "Investigation of structural and electrical properties of Zirconium dioxide thin films deposited by reactive RF sputtering technique", *Ferroelectrics*, 502: 147–158, (2016).
- [4] D. Liu, W. Lei, S. Qin, L. Hou, Z. Liu, Q. Cui, et al., "Large-scale synthesis of hexagonal corundum-type  $\text{In}_2\text{O}_3$  by ball milling with enhanced lithium storage capabilities", *J. Mater. Chem. A*, 1: 5274–5278, (2013).
- [5] M.A. Islam, M. Nuruzzaman, R.C. Roy, J. Hossain, K.A. Khan, "Investigation of Electrical and Optical Transport Properties of N-type Indium Oxide Thin Film", *Am. J. Eng. Res.*, 4: 62–67, (2015).
- [6] H.I. Yeom, J.B. Ko, G. Mun, S.H.K. Park, "High mobility polycrystalline indium oxide thin-film transistors by means of plasma-enhanced atomic layer deposition", *J. Mater. Chem. C*, 4: 6873–6880, (2016).
- [7] A.H.M.Z. Alam, P.K. Saha, T. Hata, K. Sasaki, "High-rate reactive deposition of indium oxide films on unheated substrate using ozone gas", *Thin Solid Films*, 352: 133–137, (1999).
- [8] C.E. Wickersham, J.E. Greene, "The effect of substrate bias on the electrical and optical properties of  $\text{In}_2\text{O}_3$  films grown by RF sputtering", *Phys. Status Solidi*, 47: 329–337, (1978).
- [9] S. Naseem, M. Iqbal, K. Hussain, "Optoelectrical and structural properties of evaporated indium oxide thin films", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 31: 155–162, (1993).
- [10] K.G. Gopchandran, B. Joseph, J.T. Abraham, P. Koshy, V.K. Vaidyan, "The preparation of transparent electrically conducting indium oxide films by reactive vacuum evaporation", *Vacuum*, 48: 547–550, (1997).
- [11] T. Asikainen, M. Ritala, W.-M. Li, R. Lappalainen, M. Leskelä, "Modifying ALE grown  $\text{In}_2\text{O}_3$  films by benzoyl fluoride pulses", *Appl. Surf. Sci.*, 112: 231–235, (1997).
- [12] W.-Y. Chung, G. Sakai, K. Shimano, N. Miura, D.-D. Lee, N. Yamazoe, "Preparation of indium oxide thin film by spin-coating method and its gas-sensing properties", *Sensors Actuators B Chem.*, 46: 139–145, (1998).
- [13] A. Gurlo, M. Ivanovskaya, A. Pfau, U. Weimar, W. Göpel, "Sol-gel prepared  $\text{In}_2\text{O}_3$  thin films", *Thin Solid Films*, 307: 288–293, (1997).

- [14] C.G. Granqvist, "Transparent conductive electrodes for electrochromic devices: A review", *Appl. Phys. A Solids Surfaces*, 57: 19–24, (1993).
- [15] C.C. Wu, C.I. Wu, J.C. Sturm, a. Kahn, "Surface modification of indium tin oxide by plasma treatment: An effective method to improve the efficiency, brightness, and reliability of organic light emitting devices", *Appl. Phys. Lett.*, 70: 1348, (1997).
- [16] T. Takada, K. Suzuki, M. Nakane, "Highly sensitive ozone sensor", *Sensors Actuators B. Chem.*, 13: 404–407, (1993).
- [17] K.K. Makhija, A. Ray, R.M. Patel, U.B. Trivedi, H.N. Kapse, "Indium oxide thin film based ammonia gas and ethanol vapour sensor", *Bull. Mater. Sci.*, 28: 9–17, (2005).
- [18] C. Suryanarayana, M.G. Norton, "X-ray Diffraction: A Practical Approach.", (1998).
- [19] D. Selvakumar, N. Dharmaraj, N.S. Kumar, V.C. Padaki, "Oxygen Sensing Properties of Platinum Doped Indium Oxide Nanoparticles Prepared by Hydrothermal Method", *Synth. React. Inorganic, Met. Nano-Metal Chem.*, 45: 753–758, (2015).
- [20] F.Z. Henari, A.A. Dakhel, "Investigation of nonlinear optical properties of gold nanograins embedded in indium oxide films by reflection Z-scan using continuous laser", *J. Appl. Phys.*, 108: 123109, (2010).
- [21] Z. Li, P. Zhang, T. Shao, J. Wang, L. Jin, X. Li, "Different nanostructured In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for photocatalytic decomposition of perfluorooctanoic acid (PFOA)", *J. Hazard. Mater.*, 260: 40–46, (2013).
- [22] M. Suche, N. Katsarakis, S. Christoulakis, S. Nikolopoulou, G. Kiriakidis, "Low temperature indium oxide gas sensors", *Sensors Actuators B.*, 118: 135–141, (2006).
- [23] M. Mazouchi, S. Poduri, M. Dutta, "Growth and Characterization of Indium Oxide, Zinc Oxide and Cadmium Sulfide Nanowires by Vapor-Liquid-Solid Growth Technique", *Appl. Phys. Res.*, 6: 55–63, (2014).
- [24] N.G. Pramod, S.N. Pandey, P.P. Sahay, "Sn-doped In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocrystalline thin films deposited by spray pyrolysis: Microstructural, optical, electrical, and formaldehyde-sensing characteristics", *J. Therm. Spray Technol.*, 22: 1035–1043, (2013).