



## The effects of annealing temperature on RF-coated GZO thin films on n-Si and PET substrates

Nihan Akın Sönmez<sup>1,2\*</sup> , Meltem Dönmez<sup>1</sup> , Buse Cömert<sup>1</sup> , Tarık Asar<sup>1,3</sup> , Barış Kınacı<sup>4</sup> , Süleyman Özçelik<sup>1,3</sup> 

<sup>1</sup>Photonics Application and Research Center, Gazi University, Ankara, 06500, Turkey

<sup>2</sup>Technical Sciences VS, Department of Electrics and Energy, Gazi University, Ankara, 06374, Turkey

<sup>3</sup>Faculty of Science, Department of Physics, Gazi University Ankara, 06500, Turkey

<sup>4</sup>Faculty of Science, Department of Physics, İstanbul University, İstanbul, 34134, Turkey

### Highlights:

- GZO thin film was successfully grown at a particle size of 49.17 nm.
- Flexible UV sensor with photo-sensitivity of 8.07 at 2V was fabricated.
- The obtained sensor has a wide range of applications thanks to its flexibility

### Keywords:

- Gallium-doped Zinc Oxide
- Annealing
- UV Sensor

### Graphical/Tabular Abstract

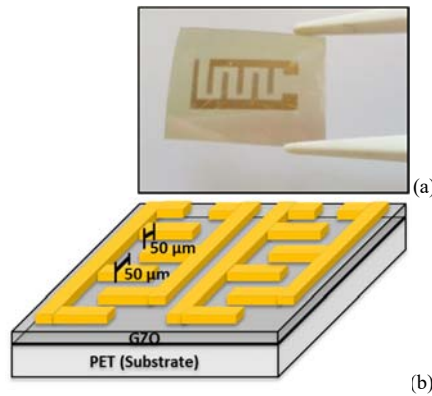


Figure A. a) The fabricated GZO/PET UV sensor and (b) schematic demonstration.

### Article Info:

Research Article  
Received: 31.01.2018  
Accepted: 26.10.2018

### DOI:

10.17341/gazimmfd.571538

### Acknowledgement:

This work was supported by Republic of Turkey Ministry of Development under the project numbers of 2011K120290 and 2016K121220.

### Correspondence:

Author: Nihan Akın Sönmez  
e-mail:  
nihanakin@gazi.edu.tr  
phone: +90 312 202 12 79

**Purpose:** Investigating the effects of annealing temperature on GZO thin films and producing a flexible UV sensor based on GZO thin films.

### Theory and Methods:

GZO thin films were deposited on n-Si and flexible PET substrates with RF Magnetron Sputtering technique at room temperature. In order to observe the effect of annealing temperature, the GZO/n-Si thin film annealed from 100 °C to 600 °C, while the GZO/PET film annealed at 100 °C and 200 °C. The structural, morphological, optical and electrical properties of the films were investigated using XRD, AFM, UV-Vis Spectrometer and Hall effect measurement systems, respectively. The UV sensor fabrication of GZO/PET flexible sample annealed at 200 °C was completed with Au interdigital electrodes with a thickness of 150 nm. Sensitivity of the sensor was determined using I-V measurements in darkness and UV light.

### Results:

The film annealed at 200 °C has the largest particle size of 49.17 nm, the widest  $E_g$  with 3.30 eV and the lowest surface resistance of 0.0027  $\Omega\text{cm}$ . For this reason, the UV sensor based on the flexible GZO/PET film which was annealed at 200 °C was fabricated and UV light photo-sensitivity of the sensor was determined with I-V measurements taken under dark and 365 nm wavelength UV light. The photo-sensitivity of the flexible UV sensor was found to be 8.07.

### Conclusion:

Although the photosensitivity of the flexible GZO/PET based UV sensor is higher than many recent studies, it is thought that sensors with higher sensitivity can be produced by better optimizing the factors affecting the dark current during the sensor production phase.



## n-Si ve PET alttaşlar üzerine RF-kaplanan GZO ince filmlere tavlama sıcaklığının etkileri

Nihan Akın Sönmez<sup>1,2\*</sup>, Meltem Dönmez<sup>1</sup>, Buse Cömert<sup>1</sup>, Tarık Asar<sup>1,3</sup>, Barış Kınacı<sup>4</sup>, Süleyman Özçelik<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>3</sup>Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>4</sup>İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, İstanbul, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- GZO ince filmi 49.17 nm partikül büyüklüğünde başarıyla büyütüldü.
- 2V'da 8.07 foto-hassasiyetli esnek UV sensörü üretildi.
- Elde edilen sensör esnekliği sayesinde geniş uygulama alanına sahiptir.

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 31.01.2018

Kabul: 26.10.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.571538

### Anahtar Kelimeler:

Galyum katkılı çinko oksit,  
tavlama,  
UV sensör

### ÖZET

Mikro takımların uç nokta Frekans Tepki Fonksiyonları (FTF) darbe testi ve modal (biçim) analizi vasıtası ile belirlenememektedir. Ayrıca, mikro işlemler yüksek hızlarda gerçekleştirilmekte ve jiroskopik momentler ve merkezkaç kuvvetleri nedeniyle takım uç nokta FTF'sinde değişimler meydana gelmektedir. Bu çalışmada, mikro takımlar kesici uç geometrisini ve operasyon etkilerini içerecek şekilde analitik olarak modellenmiştir. Ayrıca, iş mili geometrisinin bilinmediği durumlar için deneysel olarak elde edilen durağan iş mili dinamiği ve analitik olarak hesaplanan dönen takım ve tutucu dinamiğinin birleştirilmesini mümkün kılan yeni bir yöntem geliştirilmiştir.

## The effects of annealing temperature on RF-coated GZO thin films on n-Si and PET substrates

### H I G H L I G H T S

- GZO thin film was successfully grown at a particle size of 49.17 nm.
- Flexible UV sensor with photo-sensitivity of 8.07 at 2V was fabricated.
- The obtained sensor has a wide range of applications thanks to its flexibility.

### Article Info

Research Article

Received: 31.01.2018

Accepted: 26.10.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.571538

### Keywords:

Gallium-doped zinc oxide,  
annealing,  
UV sensor

### ABSTRACT

In this study, the effects of thermal annealing on RF-coated GZO thin films on n-Si and PET substrates at room temperature at 200 W RF power were investigated systematically. Deposited film on the n-Si substrate was annealed at range of 100 - 600°C for 1 hour in air at atmospheric pressure with CTA. UV-Vis measurements of flexible films prepared at 100 and 200°C were evaluated due to the deterioration of the PET substrate form at 300°C temperature. The energy band gaps of the films were found as 3.10 and 3.30 eV, respectively. It was revealed from the XRD results that GZO films grown on Si have c-oriented hexagonal wurtzite structure. UV sensor fabrication was performed from the flexible GZO film annealed at 200°C with the highest band gap energy. The UV-light sensitivity of the produced sensor was determined by I-V measurements in light ( $\lambda = 365$  nm) and dark conditions. Photo-sensitivity of the flexible sensor was found to be 8.07 at 2V.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: nihanakin@gazi.edu.tr, meltmdn@gmail.com, busecmrt@gmail.com, trkasar@gazi.edu.tr, bkinaci06@gmail.com, sozcelik@gazi.edu.tr / Tel: +90 312 202 1279

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çinko oksit (ZnO), geniş bant aralıklı (3,37 eV), eksiton bağlanma enerjisi yüksek (60 meV), radyasyona karşı dayanıklı, termal ve kimyasal olarak kararlı bir metal oksittir. ZnO'nun yapısı hekzagonal vücut kristal yapısıdır ve stokiometrik olmaması nedeniyle n-tipi iletkenlik gösterir [1]. Bununla birlikte katkısız ZnO, düşük taşıyıcı konsantrasyonundan dolayı yüksek dirence sahiptir. Katkısız ZnO'da donör seviyeleri oluşturan oksijen boşlukları ve arayer kusurları gibi bazı kusurlar vardır. Bu problemleri aşarak daha iyi kristalitede ve daha iyi elektro-optik özelliklere sahip film elde edebilmek için ZnO, alüminyum (Al), indiyum (In), bor (B) ve galyum (Ga) gibi çeşitli grup-III metalleri ile katkılanabilir [2]. Katkılı olarak üretilen ZnO ince filmleri, görünür bölgedeki yüksek geçirgenliğinden dolayı optik kaplama malzemesi olarak, UV ışık yayan diyotlar, lazerler, sensörler ve fotovoltaiik güneş hücrelerinde katkısız ZnO'ya göre daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Son yıllarda, bahsedilen bu uygulamalar için katlanabilir, taşınması kolay, esnek ve küçük hacimli malzeme geliştirmek önemlidir [3]. Literatürde Al katkılı ZnO (AZO) ve Ga katkılı ZnO (GZO) ince filmlerin polietilen tereftalat (PET) [4], polikarbonat (PC) [5], poliimid (PI) [6], polipropilen adipat (PPA) [7] ve polietilen naftalat (PEN) [8] gibi çeşitli esnek alttaşlar üzerine kaplanması araştırılmıştır.

Daha iyi elektro-optik özelliklere sahip esnek film geliştirilmesi ve bu filmlerin uygulamada kullanılması önemlidir. Aktif malzemesi ZnO ince film olan UV sensörler; uzay araştırma ve iletişim sistemleri, biyomedikal cihazlar, füze erken uyarı sistemleri, hava ve çevre izleme sistemleri ve yüksek sıcaklık plazma araştırmalarında kullanılmaktadır [9]. Ayrıca, ZnO filmlerin tanecik boyutunun ve mikroyapısının UV sensörün duyarlılığını etkilediği bilinmektedir. Kaplama sırasında büyütme veya kaplama sonrası tavlama işlemi uygulanarak filmlerin tanecik boyutu büyütülebilir. Büyük tanecik boyutu ise filmlerin direncinin düşmesini sağlar [10]. Önceki çalışmamızda, GZO ince filmleri n-Si alttaş üzerine 100-200 W RF gücünde magnetron püskürtme tekniği ile kaplanmış ve 200 W'da kaplanan filmin iyi opto-elektronik özelliklere sahip olduğu görülmüştür [11]. Bu çalışmada, 200 W RF güç değerinde n-Si üzerine büyütülen GZO ince filmin fiziksel karakterleri üzerine, numunenin sekiz ay atmosfer ortamında bekletilmesinin ve büyütme sonrası ısı işleminin etkisi incelendi. Ayrıca, GZO filmi RF magnetron püskürtme yöntemi ile 200 W RF güç değerinde esnek PET alttaş üzerine oda sıcaklığında kaplandı. n-Si ve PET alttaş üzerine büyütülen GZO filminin yapısal, elektriksel ve morfolojik

karakterleri n-Si üzerinde büyütülen filmler, optik özellikleri ise PET üzerine büyütülen filmler kullanılarak belirlendi. Ayrıca, esnekliği sayesinde kullanım alanı çeşitliliğine sahip esnek ışık sensörü, 200°C'de tavlanan esnek film üzerine inter dijital elektrotlu olarak geliştirildi ve UV-ışık altında duyarlılığı belirlendi.

## 2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

GZO ince filmler, n-Si (100) [11] ve PET alttaşlar üzerine oda sıcaklığında radyo frekans püskürtme (sputtering, BESTEC) tekniği ile kaplandı. Alttaşlar sisteme yüklenmeden hemen önce, kimyasal yolla temizlendi. Kaplamalarda; %3'lük Ga katkılanmış, 4" çapında, %99,99 saflıkta ZnO seramik hedef malzemesi kullanıldı. Filmlerin üretimi süresince alttaş sıcaklığı, kaplama basıncı ve hedef-numune arası mesafe gibi kaplamayı etkileyebilecek parametreler sabit tutuldu. Kaplama parametreleri Tablo 1'de görülmektedir. Filmlerin kalınlıkları büyütme süresince içerde bulunan kalınlık kontrolü ile takip edildi ve numuneler dışarı çıkartıldığında kalınlıkları Dektak 150 profilometre kullanılarak teyit edildi. (Tablo 1)

Tavlama sıcaklığının etkisini gözlemlemek amacı ile, GZO/n-Si ince film 100°C den 600°C ye kadar, GZO/PET film ise 100°C ve 200°C'de hava ortamında 1'er saat termal tavlama (CTA) sisteminde tavlandı. GZO/n-Si filmlerin yapısal özellikleri X-ışınları kırınımı (XRD, APD 2000 PRO), morfolojik özellikleri yüksek performans atomik kuvvet mikroskobu (hp-AFM, Nanomagetics) ve elektriksel özellikleri Hall etkisi (Hall Effect, Lakeshore) ölçüm sistemleri kullanılarak araştırıldı. Şeffaf PET alttaş üzerine hazırlanan GZO ince filmlerin UV-Vis bölgedeki geçirgenlikleri oda sıcaklığında 200-800 nm dalga boyu aralığında alınan UV-Vis Spektrometre (UV-2600, Shimadzu) ölçümleri ile belirlendi. Karakterizasyonları yapılan GZO filmlerin optimizasyonundan sonra 200°C'de tavlanan GZO/PET esnek numunenin UV sensör fabrikasyonu 150 nm kalınlıklı Au inter dijital elektrotlarının oluşturulması ile tamamlandı (Şekil 1). Tasarımda sensör büyüklüğü 12,5 mm x 7 mm ve kontak alanı boyutları 2 mm x 1 mm'dir. Üretilen sensörün duyarlılığı; karanlıkta ve dalga boyu 365 nm olan UV ışık altında yapılan akım-gerilim (I-V) ölçümleri ile elde edilen veriler kullanılarak belirlendi.

## 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

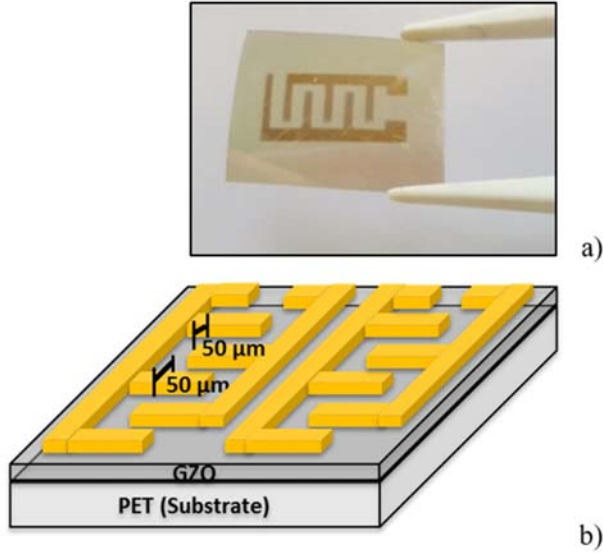
Şekil 2'de oda sıcaklığında RF-püskürtülerek oluşturulan ve 100°C'den 600°C'ye kadar tavlanan GZO/n-Si filmlerin

**Tablo 1.** GZO ince film kaplama parametreleri (The deposition parameters of GZO thin film)

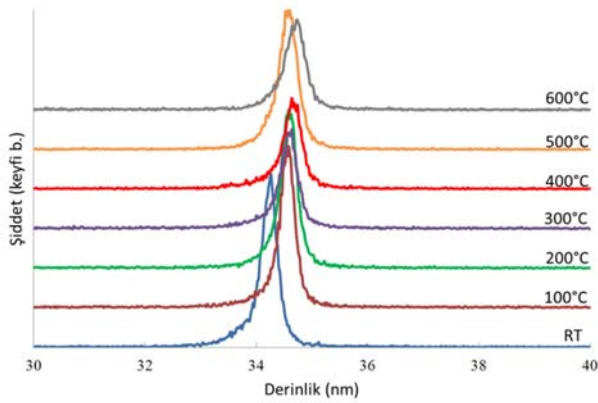
Numune	Güç (W)	Kalınlık (nm)	Kaplama Basıncı (mbar)	Alttaş sıcaklığı (°C)
GZO/n-Si*	200	100	$3,8 \times 10^{-3}$	RT
GZO/PET	200	80	$3,8 \times 10^{-3}$	RT

\*[11]

XRD desenleri verildi. Tüm filmlerin JCPDS card No. 00-036-1451 referansında verilen ve  $34,421^\circ$ 'de yer alan ZnO (002) pikine sahip oldukları gözlemlendi.



**Şekil 1.** a) Üretilen GZO/PET UV sensör ve b) şematik gösterimi  
(a) The fabricated GZO/PET UV sensor and (b) schematic demonstration).



**Şekil 2.** GZO/n-Si ince filmlerin XRD desenleri  
(XRD patterns of GZO/n-Si thin films)

Hegzagonal wurtzite yapıda c-yönelimli olan GZO/n-Si filmlere ait pik yarı genişlik (FWHM) değerleri ve Scherrer ifadesinden [12] hesaplanan partikül büyüklükleri Tablo 2'de verildi. Bu tabloda  $100^\circ\text{C}$  ve  $200^\circ\text{C}$ 'de tavlanan numunelerin en dar ZnO (002) pikine sahip olduğu görülmektedir.  $300^\circ\text{C}$ 'den itibaren FWHM genişlemekte, partikül büyüklüğü azalmaktadır (Şekil 3). Ayrıca, atmosfer ortamında bekletilen GZO ince filminin yüzeyinin oksitlenmesi nedeni ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı, filmin tavlama ile bu etkinin azaldığı anlaşılmaktadır.

Yüzey morfolojisi, geliştirilecek elektro-optik cihazın (dedektör, led, sensör gibi) performansı için oldukça önemli bir faktördür. Çünkü, düzgün olmayan bir yüzey metal-

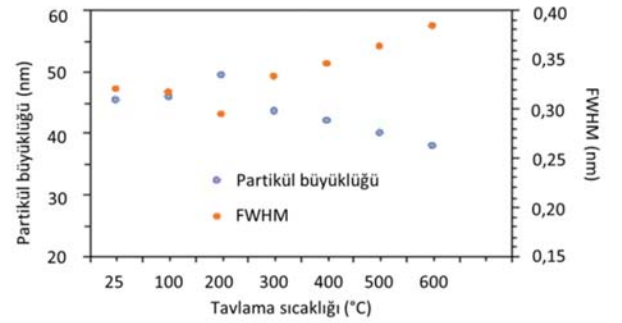
yariletken tabaka arasında bozulmaya sebep olabilir. Bu nedenle, filmlerin partikül büyüklüğü ve bununla birlikte yüzey analiz yöntemleri ile yüzey pürüzlülüğünün ortalama karekök (RMS) değerlerinin belirlenmesi-karşılaştırılması oldukça önemlidir. Bu önem göz önünde bulundurularak, oda sıcaklığında kaplanan ve  $100 - 600^\circ\text{C}$ 'de tavlanan GZO/n-Si ince filmlerin yüzey morfolojileri AFM yöntemi ile incelendi. Tavlanan filmlerin  $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 'lik tarama alanlarındaki üç boyutlu (3D) yüzey görüntüleri Şekil 4'de sunuldu.

**Tablo 2.** GZO/n-Si filmlerin bazı önemli parametreleri  
(some important parameters of GZO thin films)

Sıcaklık ( $^\circ\text{C}$ )	$2\theta$ ( $^\circ$ )	FWHM (nm)	Partikül büyüklüğü (nm)	RMS (nm)
RT*	34,24	0,254	56,48	1,84
RT**	34,23	0,318	45,11	3,02
100	34,55	0,315	45,58	2,11
200	34,57	0,292	49,17	2,74
300	34,58	0,331	43,38	0,58
400	34,64	0,344	41,75	0,61
500	34,56	0,361	39,77	4,57
600	34,69	0,382	37,60	5,18

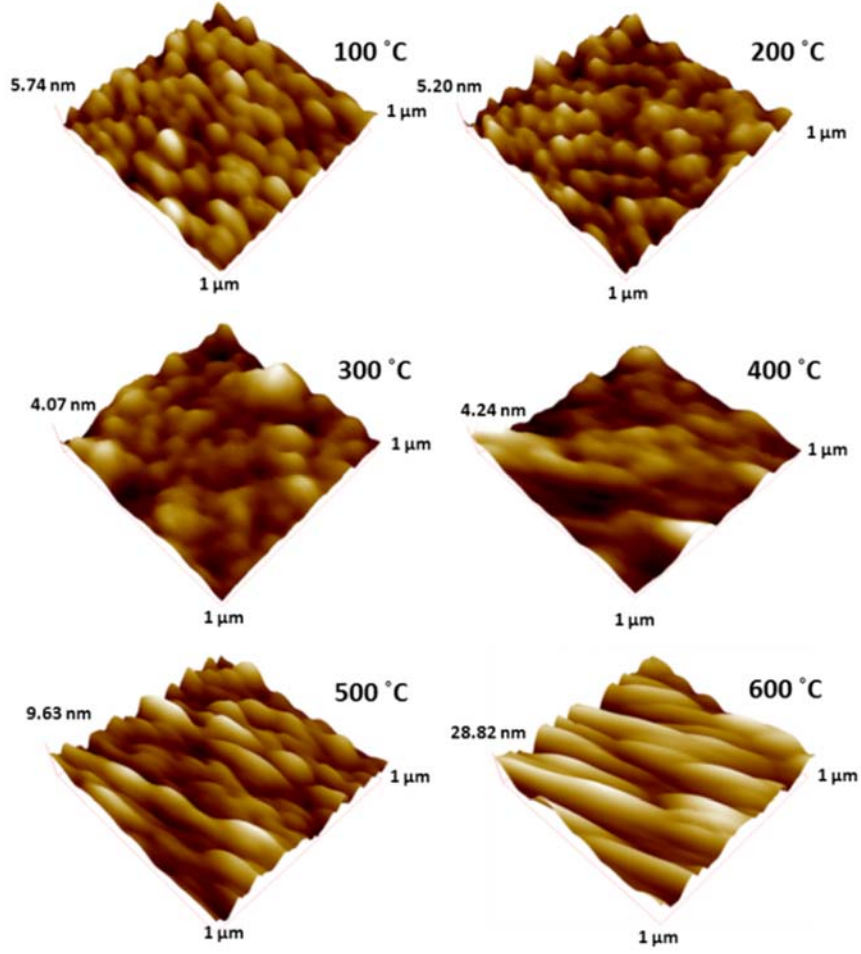
\*[11]

\*\*Kaplama 8 ay sonraki oda sıcaklığı ölçümleri



**Şekil 3.** GZO/n-Si filminin partikül büyüklüğü ve FWHM değerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimi (Variation of the particle size of the GZO/n-Si films and FWHM value depending on annealing temperature)

Görüntülerden  $300^\circ\text{C}$ 'den sonra yüzeyde deformasyonların olduğu görülmekle birlikte  $400^\circ\text{C}$ 'de tavlanan numunenin GZO yüzeyine benzer morfolojiyi koruduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte daha yüksek sıcaklıklarda,  $500$  ve  $600^\circ\text{C}$ 'de, GZO film yüzeyinin diğerlerinden tamamen farklı bir yüzey morfolojisine dönüştüğü gözlenmiştir. Bu sıcaklıklarda Tablo 2'den de görüldüğü gibi yüksek RMS değerlerinin olması partikül büyüklüğü ile değil yapının bozulması ile ilişkilendirilebilir. Yüksek sıcaklıkta yüzeyde meydana gelen deformasyon ve farklı morfolojinin, altta/film arasında meydana gelen gerilmelerden kaynaklandığı gibi yüksek sıcaklıklarda film kararlılığının bozulması ile de açıklanabilir [13]. Ayrıca, homojen olmayan yer yer büyük partiküller RMS değerinin artmasına neden olabilir. Bu morfolojik değerlendirme, sekiz ay atmosfer ortamında bekletilen GZO/Si filminin  $400^\circ\text{C}$ 'ye kadar kararlılığını koruduğunu göstermektedir. Sırası ile



Şekil 4. Tavlanan GZO/n-Si filmlerin 3D AFM görüntüleri (3D AFM images of annealed GZO/n-Si films)

2,11 ve 2,74 nm RMS değerine sahip olan 100 ve 200°C’de tavlanan filmlerin XRD sonuçları ile AFM sonuçlarının uyumlu olduğu söylenebilir. Her iki filmin yüzeyi de homojen ve büyük partiküllüdür. RMS değerlerinin birkaç nanometreden küçük olması UV sensörün daha yüksek duyarlılıkta üretilmesini sağlar [2]. Optik geçirgenlik ölçümlerini değerlendirebilmek ve aynı zamanda geliştirilecek UV Sensörün kullanım alanını çeşitlendirebilmek bakımından n-Si alttaşın yanı sıra ucuz ve hafif esnek PET alttaş üzerine de GZO ince filmler oluşturuldu. Şekil 5’de kaplamasız PET alttaş, 100 ve 200°C’de tavlanan kaplamasız PET ve yine aynı sıcaklıklarda tavlanan GZO/PET ince filmlerin UV-Vis optik geçirgenlik spektrumları verildi. Kaplamasız PET alttaşın görünür bölge geçirgenliği %80 civarında iken, 200°C’de tavlanması ile %50-%60 civarına düşmüştür. 100 ve 200°C’de tavlanan GZO/PET ince filmler görünür bölgede %50 civarında optik geçirgenliğe sahiptir.

GZO/PET filmlerin optik bant aralıkları ( $E_g$ ), optik geçirgenlik verilerinden elde edilen optik soğurma katsayısının foton enerjisi ile değişimini gösteren ve Tauc eşitliği olarak bilinen [14] formül yardımı ile hesaplandı. Filmlerin soğurma spektrumları Şekil 6’da verildi. 100 ve

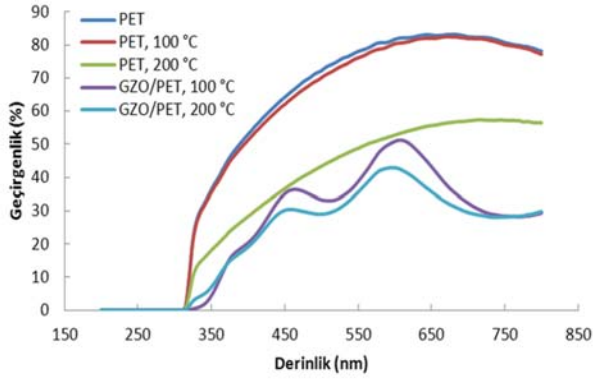
200°C’de tavlanan GZO/PET filmlerin  $E_g$  değerleri sırasıyla 3,10 ve 3,30 eV olarak belirlendi. Hesaplanan  $E_g$  değerleri farklı araştırma grupları tarafından yapılan GZO ince film çalışmaları ile uyumlu olduğu görüldü [15-18]. UV bölgede optik bant aralığına sahip GZO ince film üretilmesi ve güçlü UV soğurulma elde edilmesi UV sensörün ışığa duyarlılık gibi çıktı parametrelerini güçlendirir. GZO/n-Si filmlerin tavlama sıcaklığına bağlı olarak elektriksel parametrelerinin değişimleri oda sıcaklığında Hall Etkisi deneyleri ile irdelendi. Bu filmlerin Hall ölçümleri sonucunda elde edilen yüzey dirençleri Tablo 3’de verildi.

Tablo 3. GZO/n-Si ince filmlere ait yüzey direnci değerleri (The surface resistance values of GZO/n-Si thin films)

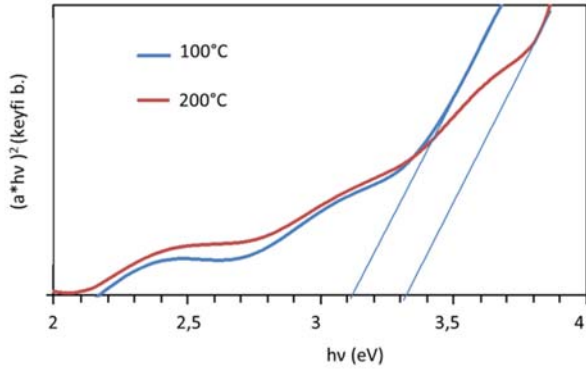
Sıcaklık (°C)	Yüzey Direnci ( $\Omega\text{cm}$ )
RT*	0,0088
100	0,0058
200	0,0027
300	0,0032
400	0,0377
500	$3,1938 \times 10^4$
600	$9,2316 \times 10^2$

\*[11]





**Şekil 5.** PET, tavlama PET alttaşı ve tavlama GZO/PET filmlerin geçirgenliklerinin dalga boyuna göre değişimi  
(The change in transmittance of PET, annealed PET substrate and annealed GZO/PET films depend on the wavelength)



**Şekil 6.**  $(a \cdot hv)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişimi  
(The change in  $(a \cdot hv)^2$  depend on photon energy)

Yapısal ve morfolojik açıdan 300°C'nin altında tavlama sıcaklıklarında daha iyi olan filmlerin düşük sıcaklıklarda yüzey dirençlerinin de düşük olduğu görüldü. Genel olarak, ince filmlerin iletkenliği tane sınırı saçılmasında azalmaya yol açan tane boyutunun azalması ile artar [19]. Ancak bunun tersi durum da olabilmektedir. Nitekim, taneler küçük dahi olsa yüzey durumlarından taneler arasında taşıyıcı hareketinin zorlaşması olabilmektedir [20]. 500 ve 600°C için elde edilen 4,57 ve 5,18 nm RMS pürüzlülük değerleri bu elektriksel sonuçlara bir gösterge niteliğindedir. Tablo 3'deki veriler, püskürtme tekniği ile geliştirilen GZO filminin 400°C'ye kadar öz direnç karalılığına sahip olduğunu göstermektedir.

Yapılan analizler neticesinde, 100 ve 200°C'de tavlamanın yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özellikler bakımından GZO filmlerin kalitesini artırdığı görüldü. Bununla birlikte, 200°C'de tavlama film 49,17 nm ile en büyük partikül büyüklüğüne, 3,30 eV ile en geniş yasak enerji aralığına ( $E_g$ ) ve 0,0027  $\Omega\text{cm}$  ile en düşük yüzey direncine sahiptir. Bu nedenle, 200°C'de tavlama esnek GZO/PET filminin aktif malzeme olarak kullanıldığı UV sensör fabrikasyonu yapılarak (Şekil 1), karanlık ve 365 nm dalga boylu UV-ışık altında alınan I-V ölçümleri ile UV ışık foto-duyarlılığına bakıldı. Foto-duyarlılık;

$$K = I_{uv}/I_{karanlık} \quad (1)$$

Eş. 1 ile belirlendi. Burada; uygulanan gerilime bağlı olarak,  $I_{uv}$ , UV-ışık altında oluşan fotoakımı,  $I_{karanlık}$  ise ışık olmayan ortamda oluşan akımı göstermektedir. Esnek UV sensörün foto-duyarlılığı 8,07 olarak bulundu. Bu foto-duyarlılık değeri, yakın geçmişte yapılan ZnO sensör çalışmalarına [21, 22] kıyasla daha yüksektir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada; GZO ince filmi, PET alttaşı üzerine oda sıcaklığında radyo frekans püskürtme tekniği ile kaplandı. Üretilen GZO/PET ve GZO/n-Si(100) [11] filmlerin yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özellikleri üzerine büyütme sonrası tavlama sıcaklığının etkisi belirlendi. Si alttaşı üzerine geliştirilen ve sekiz ay atmosfer ortamında bekletilen GZO filminin 400°C'ye kadar yapısal ve öz direnç kararlılığını koruduğu belirlendi. Tavlama numuneler arasında, 49,17 nm ile en büyük partikül büyüklüğüne, 3,30 eV ile en geniş yasak enerji aralığına ve 0,0027  $\Omega\text{cm}$  ile en düşük öz dirence sahip olması nedeni ile 200°C'de tavlama GZO/PET esnek numunesi için UV sensör fabrikasyonu yapıldı. Üretilen sensörün foto-duyarlılığı 2V'da 8,07 olarak belirlendi. Yüksek bir foto-duyarlılık elde edilmiş olmasına rağmen, sensör üretimi aşamasında karanlık akımı etkileyen faktörlerin daha iyi optimize edilmesi ile daha yüksek duyarlılığa sahip sensörlerin üretilebileceği düşünülmektedir.

#### 5. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Kalkınma Bakanlığı'nın 2011K120290 ve 2016K121220 kodlu projeleri ile desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Manouni A. El., Manjon F.J., Perales M., Mollar M., Mari B., Lopez M.C., Ramos Barrado J.R., Effect of thermal annealing on ZnO: Al thin films grown by spray pyrolysis, *Superlatt. Microstruct.* 42, 134-139, 2007.
2. Akin N., Baskose U.C., Kinaci B., Cakmak M., Ozcelik S., AZO thin film-based UV sensors: effects of RF power on the films, *Appl. Phys. A.* 119, 965-970, 2015.
3. Gong L., Lu J., Ye Z., Transparent and conductive Ga-doped ZnO films grown by RF magnetron sputtering on polycarbonate substrates, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 94, 937-941, 2010.
4. Kao J.Y., Hsu C.Y., Chen G.C., Wen D.C., The characteristics of transparent conducting Al-doped zinc oxide thin films deposited on polymer substrates, *J Mater Sci: Mater Electron*, 23, 1352-1360, 2012.
5. Lee J., Lee D., Lim D., Yang K., Structural, electrical and optical properties of ZnO: Al films deposited on flexible organic substrates for solar cell applications, *Thin Solid Films*, 515, 6094-6098, 2007.
6. Wang X., Zeng X., Huang D., Zhang X., Li Q., The properties of Al doped ZnO thin films deposited on various substrate materials by RF magnetron sputtering, *J Mater Sci: Mater Electron*, 23, 1580-1586, 2012.

7. Hao X., Ma J., Zhang D., Yang T., Ma H., Yang Y., Cheng C., Huang J., Thickness dependence of structural, optical and electrical properties of ZnO: Al films prepared on flexible substrates, *Appl. Surf. Sci.*, 183, 137-142, 2001.
8. Kim J.M., Thiyagarajan P., Rhee S.W., Deposition of Al-doped ZnO films on polyethylene naphthalate substrate with radio frequency magnetron sputtering, *Thin Solid Films*, 518, 5860-5865, 2010.
9. Panda S.K., Jacob C., Preparation of transparent ZnO thin films and their application in UV sensor devices, *Solid-State Electronics*, 73, 44-50, 2012.
10. Comert B., Akin N., Donmez M., Saglam S., Ozcelik S., Titanium Dioxide Thin Films as Methane Gas Sensors, *IEEE Sensors Journal*, 16, 8890-8896, 2016.
11. Akin N., Kinaci B., Ozen Y., Ozcelik S., Influence of RF power on the opto-electrical and structural properties of gallium-doped zinc oxide thin films, *J Mater Sci: Mater Electron*, 28, 7376-7384, 2017.
12. Klug H.P., Alexander L.E., *X-ray Diffraction Procedures*, Wiley, New York. 1974.
13. Kim, M.S., Yim, K.G., Cho, M.Y., Leem, J.Y., Lee, D.Y., Kim, J.S., Kim, J.S., Son, J.S., Post-Annealing Effects on the Structural and the Optical Properties of ZnO Thin Films Grown by Using the Hydrothermal Method, *Journal of the Korean Physical Society*, 58, 3, 2011.
14. Sengupta J., Sahoo R.K., Mukherjee C.D., Effect of annealing on the structural, topographical and optical properties of sol-gel derived ZnO and AZO thin films. *Materials Letters*, 83, 84-87, 2012.
15. Tsay C.Y., Wu C.W., Lei C.M., Chen F.S., Lin C.K., Microstructural and optical properties of Ga-doped ZnO semiconductor thin films prepared by sol-gel process, *Thin Solid Films*, 519 (5), 1516-1520, 2010.
16. Park S.M., Ikegami T., Ebihara K., Effects of substrate temperature on the properties of Ga-doped ZnO by pulsed laser deposition, *Thin Solid Films*, 513 (1), 90-94, 2006.
17. Rao T.P., Kumar M.S., Hussain N.S., Effects of thickness and atmospheric annealing on structural, electrical and optical properties of GZO thin films by spray pyrolysis, *Journal of Alloys and Compounds*, 541, 495-504, 2012.
18. Gonçalves G., Elangovan E., Barquinha P., Pereira L., Martins R., Fortunato E., Influence of post-annealing temperature on the properties exhibited by ITO, IZO and GZO thin films, *Thin Solid Films*, 515 (24), 8562-8566, 2007.
19. Hua fu Z., Chengxin L., Hanfa L., Changkun Y., Influence of the sputtering pressure on the properties of transparent conducting zirconium doped zinc oxide films prepared by RF magnetron sputtering, *J. Semicond.*, 30, 41-44, 2009.
20. Zhong A., Tan J., Huang H., Chen S., Wang M., Xu S., Thickness effect on the evolution of morphology and optical properties of ZnO films, *App. Surf. Sci.* 257, 4051-4055, 2011.
21. Hu Z.Q., Deng H., Xie J., Li Y., Zu X.T., Ultraviolet photoconductive detector based on Al doped ZnO films prepared by sol-gel method, *App. Surf. Sci.* 253, 476-479, 2006.
22. Mohite S.V., Rajpure K.Y., Synthesis and characterization of Sb doped ZnO thin films for photodetector application, *Optical Materials* 36, 833-838, 2014.

