

---

*Araştırma Makalesi / Research Article*

---

## Termal buharlaştırma yöntemi ile üretilen *n-ZnO/p-Si* heteroeklem kontakların elektriksel ve optiksel karakterizasyonu

Abdullah OZKARTAL\*

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Van  
(ORCID: 0000-0002-1556-6141)

---

### Öz

Bu çalışmada, *n-ZnO* ince filmi hem *p-Si* yarıiletkeni ve hem de mikroskop camı üzerinde termal buharlaştırma yöntemi ile üretildi. *n-ZnO* ince filmler, *UV-Vis* spektroskopisi, X-ışını kırınımı (XRD) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ile incelendi. *n-ZnO/p-Si* diyotların elektriksel özellikleri karanlıkta ve oda sıcaklığında, akım-voltaj (*I-V*) ve kapasitans-voltaj (*C-V*) ölçümleri ile belirlendi. Üretilen numunelerin idealite faktörü (*n*), engel yüksekliği ( $\Phi_b$ ) ve seri direnci ( $R_s$ ), *I-V* ve *C-V* ölçümlerinden ve Cheung fonksiyonlarından hesaplandı. Ayrıca *n-ZnO/p-Si* diyotların fotodiyot özellikleri 100 mW/cm<sup>2</sup> ve AM 1.5 aydınlatma altında incelendi.

**Anahtar kelimeler:** Fotodiyot, *n-ZnO/p-Si* heteroeklem kontak, *ZnO* ince film, termal buharlaştırma.

---

## Electrical and optical characterization of *n-ZnO/p-Si* heterojunction contacts produced by thermal evaporation method

### Abstract

In this study, *n-ZnO* thin film was produced on both *p-Si* semiconductor and microscope glass by thermal evaporation method. *n-ZnO* thin films were analyzed by *UV-Vis* spectroscopy, X-ray diffraction (XRD) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX). The electrical properties of *n-ZnO/p-Si* diodes were investigated by current-voltage (*I-V*) and capacitance-voltage (*C-V*) measurements in the dark and at room temperature. The ideality factor (*n*), barrier height ( $\Phi_b$ ) and series resistance ( $R_s$ ) of the produced samples were calculated from *I-V* and *C-V* measurements and Cheung functions. In addition, photodiode properties of *n-ZnO/p-Si* diodes were investigated under 100 mW/cm<sup>2</sup> and AM 1.5 illumination.

**Keywords:** Photodiode, *n-ZnO/p-Si* heterojunction contact, *ZnO* thin film, thermal evaporation.

---

### 1. Giriş

Güneş pilleri güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren aygıtlardır. Genelde yarıiletken *p-n* kontaklardan oluşan güneş pilleri, arayüzey bölgesine kadar güneş ışığını geçirebilen yarıiletken malzemelere ihtiyaç duyar. Yüksek oranda güneş ışığını geçirme özelliğine sahip yarıiletken malzemelere güneş pillerinin pencere materyali olarak isimlendirilir. Yarıiletken metal oksit ince filmler, ışığı iyi geçiren yapısıyla diyot yapılarında pencere materyali olarak kullanılmaktadır. Fotovoltaik özellik taşıyan *NiO*, *ZnO*, *CuO*, *SnO<sub>2</sub>* ve *ITO* gibi metal oksit ince filmler güneş pili üretimlerinde yaygın bir şekilde araştırılmaktadır. *ZnO* metal oksiti kararlı ve etkin yapısal özelliklerinden dolayı en yoğun çalışılmış bir ince filmidir [1-17].

Metal oksit ince filmler, sol-jel, püskürtme yöntemi (spray pyrolysis), döndürerek kaplama (spin coating), rf-dc magnetron püskürtme, atomik tabaka biriktirme gibi birden çok yöntemle üretilebilmektedir. *ZnO* ince filmi bir çok materyal ile *p-n* veya Schottky diyotların yapımında çok farklı tekniklerle üretilerek incelenmiştir. *n-ZnO/p-Si* heteroeklem yapısı da püskürtme yöntemi [18-19],

---

\*Sorumlu yazar: [abdullahozkartal@yyu.edu.tr](mailto:abdullahozkartal@yyu.edu.tr)

Geliş Tarihi: 23.06.2021, Kabul Tarihi: 01.09.2021

magnetron püskürtme yöntemi [20-24], sol-jel yöntemi [25-28], atomik tabaka biriktirme yöntemi [29-30] ve termal buharlaştırma yöntemi [31-32] ile üretilmiş ve sonuçları rapor edilmiştir.

Bu çalışmada, diğer üretim yöntemlerine göre daha kolay, basit ve ucuz bir yöntem olan termal buharlaştırma yöntemini kullandık. İstenen kalınlıkta üretilme olanağı sunan termal buharlaştırma yöntemi hedef materyale de en az zarar veren bir yöntemdir. Ayrıca kıyasla daha hassas olan organik malzemelerle de çok rahat bir şekilde kullanılabilir. Daha önce çalışılmış olan termal buharlaştırma yöntemi ile üretilen *n-ZnO/p-Si* heteroeklem diyotlarda rapor edilmemiş olan fotodiyot özellikleri ve kapasitans-voltaj (*C-V*) elektriksel özellikleri bu çalışmada belirlendi ve rapor edildi. Diğer yöntemlerle üretilen diyotların özellikleri ile karşılaştırıldı ve yorumlandı.

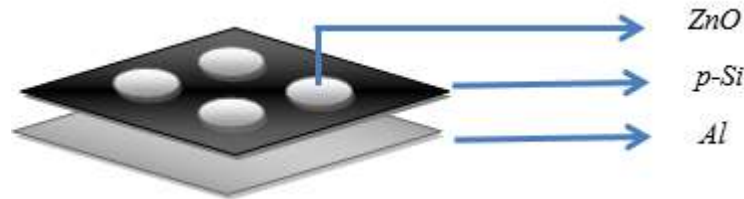
## 2. Materyal ve Metot

*n-ZnO/p-Si* heteroeklem diyotları üretiminde 450 µm kalınlığında,  $\rho=1-10 \Omega \cdot \text{cm}$  öz dirençli, [100] kristal yöneliminde bor (B) katkılı, *p* tipi *Si* yarıiletken kristali kullanıldı. *Si* yarıiletken kristaller, organik ve mekanik kirliliklerden kimyasal olarak temizlemek için sırasıyla aseton ve metanolde 10 dakika süre ile ultrasonik temizleme cihazında yıkandı. Her işlemten sonra deiyonize su ile durulandı. Daha sonra örnekler sırasıyla RCA1 ( $\text{NH}_4+\text{H}_2\text{O}_2+6\text{H}_2\text{O}$ ) ve RCA2 ( $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O}_2+6\text{H}_2\text{O}$ ) çözeltilerinde 10 dakika kaynatıldı. Bu işlemlerden sonra HF:H<sub>2</sub>O (%10 seyreltilmiş) içinde 30 sn süreyle daldırıldı ve tekrar deiyonize su ile durulanmıştır [33]. En son olarak numuneler bir nitrojen (N<sub>2</sub>) atmosferi altında kurutuldu ve hemen ince film kaplamak için vakum cihazına (Edwards Auto, model-306) yerleştirildi.

Vakum cihazındaki basınç  $1.33 \times 10^{-6}$  kPa' a düştüğünde % 99,99 saflıktaki alüminyum (Al) metali 15 mm x 20 mm yüzey alana sahip *p-Si* kristalinin mat yüzeyine buharlaştırıldı. Al ile kaplanan numune vakum cihazından çıkarıldı ve omik kontak olması için 580 °C sıcaklığında ve nitrojen ortamındaki kuvars cam fırında 3 dak. süre ile ısıl tavlama yapıldı [33].

*p-n* kontak yapılmak üzere, Sigma-Aldrich'ten satın alınan % 99,99 saflıkta toz halindeki çinko oksit (ZnO), hem omik kontağı yapılmış *p-Si* kristalin parlatılmış yüzeyine ve hem de temizlenmiş mikroskop camı üzerine buharlaştırıldı. ZnO ince film kalınlığı (~200 nm) vakum cihazındaki kalınlık ölçer sensör yardımı ile tesbit edilmiştir. Her biri daire şeklindeki diyotların etkin yüzey alanı  $3.14 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$  dir. ZnO ince filmi ile kaplanan mikroskop camlar, ZnO ince filmlerin optiksel ve yapısal analizlerinde kullanılmıştır.

*n-ZnO/p-Si* heteroeklem diyotların akım-voltaj (*I-V*) ölçümleri, Keithley (model 6487) pikoampermetre/voltaj kaynağı kullanılarak oda sıcaklığında, karanlıkta ve güneş simülatörü altında alınmıştır. Üretilen numunelerin şematik gösterimi Şekil 1' de verilmiştir.



Şekil 1. *n-ZnO/p-Si/Al* yapısının şematik gösterimi

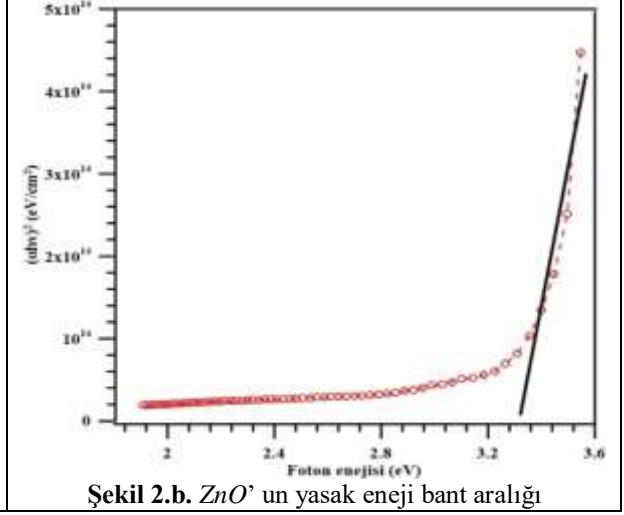
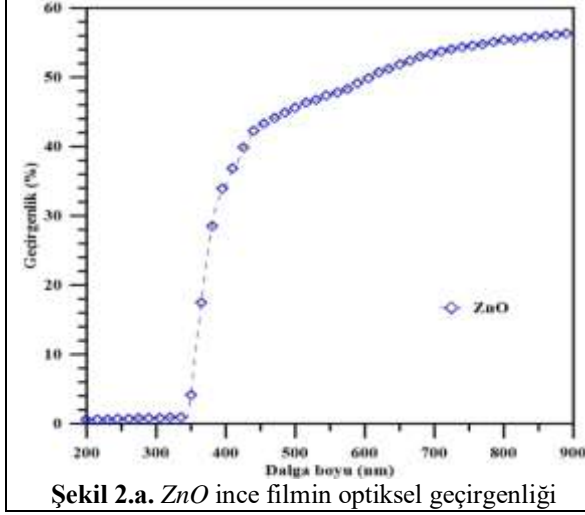
## 3. Bulgular ve Tartışma

### 3.1. Optiksel ve Yapısal Analiz

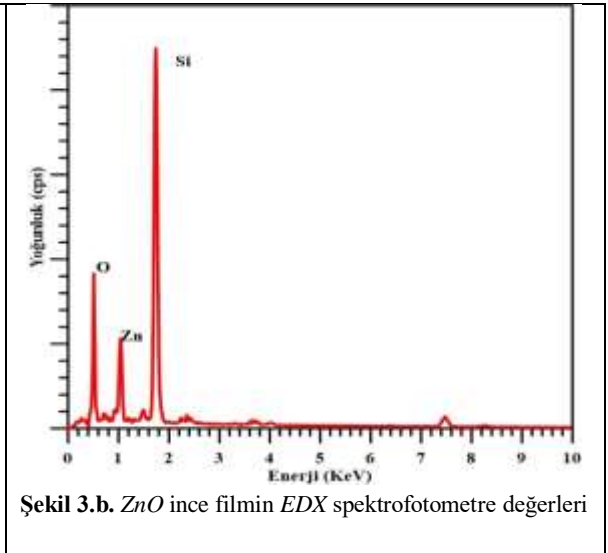
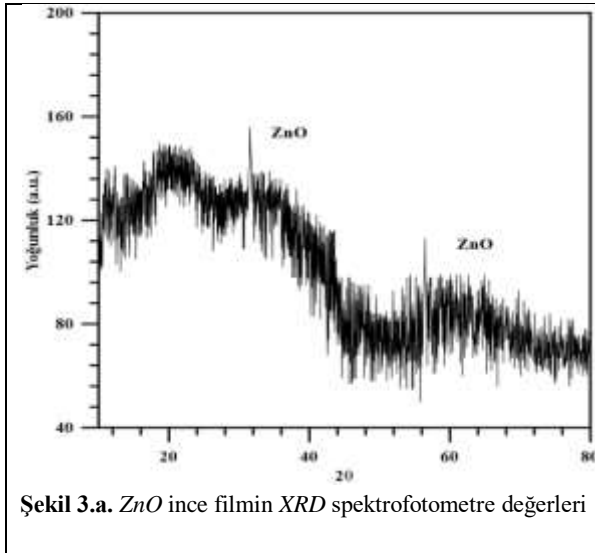
Optiksel geçirgenlik, *UV-Vis* spektrofotometresi (Shimadzu-model 2450) yardımıyla incelenmiştir. Nanometre boyutunda hassasiyetle ince film üretme kolaylığı sunan termal buharlaştırma yöntemi ile mikroskop camı üzerinde üretilen yaklaşık 200 nm kalınlığında *ZnO* ince film optiksel geçirgenlik grafiği Şekil 2.a'da gösterilmektedir.  $(ah\nu)^2$ 'nin foton enerjisine  $h\nu$  bağımlılığı Şekil 2.b' de verilmiştir.  $(ah\nu)^2$ 'ye karşı  $h\nu$  ilişkisi için doğrusal bağımlılık, *ZnO* için doğrudan izinli geçişin gerçekleştiğini gösterir. Optiksel yasak enerji bant aralığı değeri ( $E_g$ ) aşağıdaki Denklem (1)' den hesaplanabilir [27].

$$\alpha hv = A(hv - E_g)^p \quad (1)$$

burada  $\alpha$ , absorpsiyon katsayısı,  $A$  enerjiden bağımsız bir sabit ve  $h$  plank sabitidir.  $p$  üssü geçişin doğasına bağlıdır. Sırasıyla izin verilen doğrudan, izin verilen doğrudan olmayan, yasak doğrudan ve yasak doğrudan olmayan geçişler için  $p = 1/2, 2, 3/2$  ve  $3$  [27].  $ZnO$ 'nun izin verilen bir doğrudan bant aralığına sahip olduğu iyi bilinmektedir ve bant aralığı hesaplaması için  $p=1/2$  kullanılmıştır. Buradan  $ZnO$  ince filmin  $E_g$ ' sini, 3.32 eV olarak hesaplandı.  $ZnO$  ince filmin yasak bant enerjisi, sol-gel ve püskürtme yöntemleri ile elde edilen örneklerindeğerleri ile uyumlu olduğu görülmektedir [18, 27].



Cam üzerine buharlaştırılan  $ZnO$  filmlerinin X-ışını kırınım ( $XRD$ ) diyagramı Şekil 3.a.' da gösterilmektedir.  $XRD$  ölçümü,  $ZnO$ ' nun kristal özelliklerini belirlemek için kullanılır. Açıkça gösteriyor ki;  $2\theta$ ' nın  $34.5^\circ$  (002) ve  $54.5^\circ$  (110)' deki zayıf ve geniş pikleri, çok zayıf bir kristallikten ziyade amorf bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.



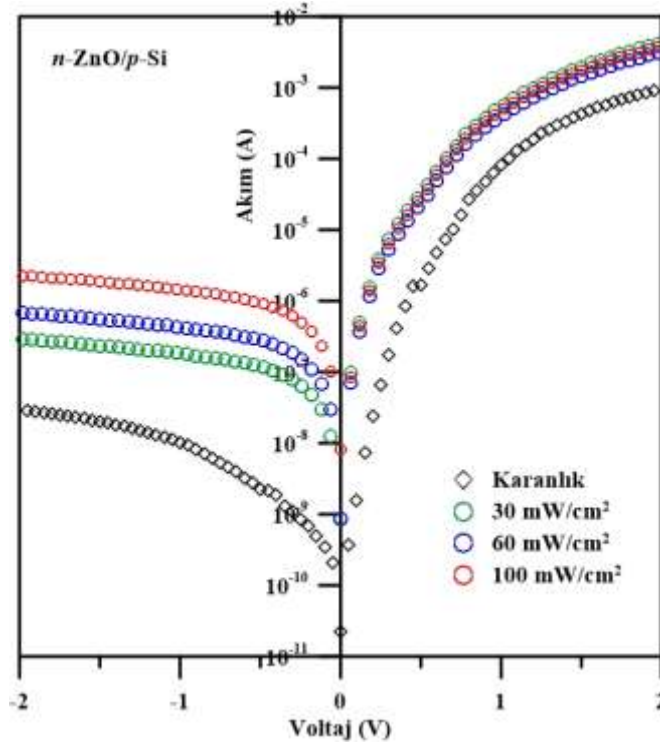
Şekil 3.b' e,  $ZnO$  ince filmi için elde edilen  $EDX$  sonuçlarını gösterir ki, çinko ve oksijen atomlarının varlığını açıkça görülmektedir. Yüksek Si piki, alt tabaka olarak kullanılan mikroskop camından kaynaklanmaktadır.

### 3.2. Elektriksel Analiz

Üretilen numunelerin  $I$ - $V$  karakteristikleri literatürde Termiyonik Emisyon (TE) teorisine göre, ideal olmayan şartlarda düz besleme akımı şu şekilde ifade edilmektedir [34, 35, 36].

$$I = I_0 \left[ \exp\left(-\frac{e(V-IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

Burada  $n$ , idealite faktörü;  $k$ , Boltzmann sabiti;  $T$ , Kelvin cinsinden oda sıcaklığı;  $e$ , elektronun yükü ve  $V$ , diyota düz besleme olarak uygulanan voltaj;  $R_s$ , seri direnç ve  $I_0$ ,  $V=0$ ' da  $\ln I$  eksenini düz çizgi kesişiminden elde edilen doyma akımıdır. Üretilen numunelerin  $I$ - $V$  grafikleri Şekil 4' te verilmiştir. Şekil 4.'ten anlaşılacağı gibi, üzerine düşen aydınlanma şiddetindeki artış ile diyotun ters beslem bölgesindeki akım yoğunluğunda dikkate değer artış oluşmaktadır. Bununla birlikte aydınlanma şiddetinin düz beslem voltaj bölgesine her hangi bir katkısının olmadığı görülmektedir.



Şekil 4.  $n$ - $ZnO/p$ - $Si$  diyotların  $\ln I$ - $V$  grafikleri

$$I_0 = AR^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \quad (2)$$

Denklem (2)'deki  $R^*$ , değeri  $p$ - $Si$  yarıiletkeni için  $32 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$  olan Richardson sabitidir [37];  $A$ , yarıçapı 1 mm olan etkin diyot alanıdır;  $\Phi_b$ , diyodun engel yüksekliğidir.

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (3)$$

İdealite faktörü  $n$ , Denklem (3) yardımıyla  $\ln I$ - $V$  grafiğinin düz beslem kısmındaki eğimin fitinden elde edilerek hesaplanır. İdealite faktörü metal-yarıiletken kontaklarda 1 değerine oldukça yakın olması beklenirken,  $p$ - $n$  heteroeklem diyotlarda idealite faktörünün 1 değerinden oldukça uzaktır. Bunun nedeni olarak kontak arayüzey durumlarına, seri direncin büyüklüğüne ve arayüzey tabakalarına atfedilir. Burada da ön görüldüğü gibi  $n$ - $ZnO/p$ - $Si$  heteroeklem diyotların idealite faktörü 1.79 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu idealite faktörü değeri aynı yöntemle üretilmiş Sharma ve ark.'nın elde

ettiği 3.5 değerinden daha iyi bir değerdir [31]. Aynı yöntemle üretilen diğer çalışmada ise Reen ve ark. oldukça büyük olduğu için hesaplamamışlardır [32].

$$e\Phi_b = kT \cdot \ln \left( \frac{AR^*T^2}{I_0} \right) \quad (4)$$

Diyotların engel yükseklikleri  $\Phi_b$ , Denklem (4) yardımıyla hesaplanmaktadır [37, 38]. *n-ZnO/p-Si* heteroeklem diyotların engel yüksekliği 0.74 eV olarak hesaplanmıştır.

Bununla birlikte, diyotların idealite faktörü, engel yükseklikleri ve seri direnç değerleri Cheung ve Cheung yöntemi ile hesaplama yapılarak sonuçların kararlılığı gösterilmiştir [39]. Cheung ve Cheung fonksiyonları Denklem (5) ve Denklem (6)' da verilmiştir;

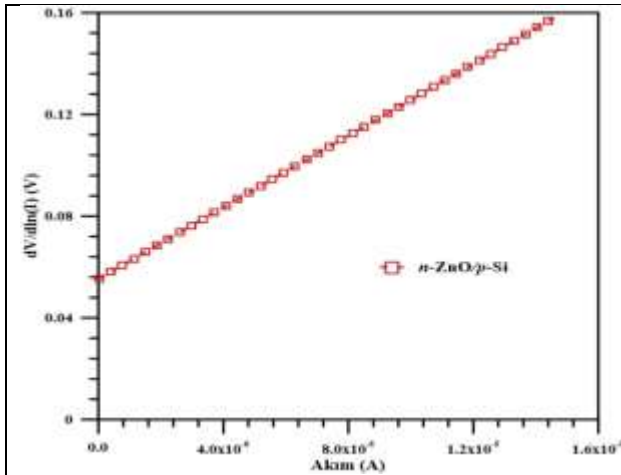
$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_S \quad (5)$$

$$H(I) = n\Phi_b + IR_S \quad (6)$$

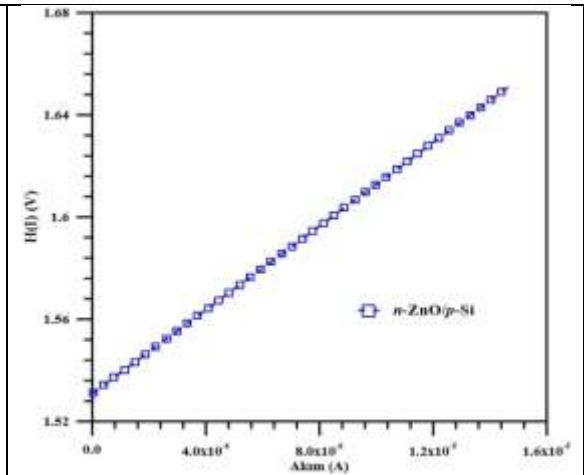
Denklem (5) ve Denklem (6)' ya göre idealite faktörü, bariyer yüksekliği ve seri dirençleri Şekil 5.a' daki  $dV/d(\ln I)$ - $I$  grafiklerinden ve Şekil 5.b' deki  $H(I)$ - $I$  grafiklerinden elde edilmiştir. Üretilen diyotların bu grafiklerden elde edilen elektriksel parametrelerin deneysel değerleri Tablo 1.' de verilmiştir.

**Tablo 1.** *n-ZnO/p-Si* diyotların elektriksel parametrelerin deneysel değerleri

Örnekler	$n$ ( $I$ - $V$ )	$n$ ( <i>Cheung</i> )	$\Phi_b$ (eV) ( $I$ - $V$ )	$\Phi_b$ (eV) ( <i>Cheung</i> )	$\Phi_b$ (eV) ( $C$ - $V$ )	$R_S$ ( $\Omega$ ) ( $dV/d\ln I$ )- $I$	$R_S$ ( $\Omega$ ) ( $H(I)$ )- $I$
<i>n-ZnO/p-Si</i>	1.79	2.09	0.74	0.72	0.82	7368	8692



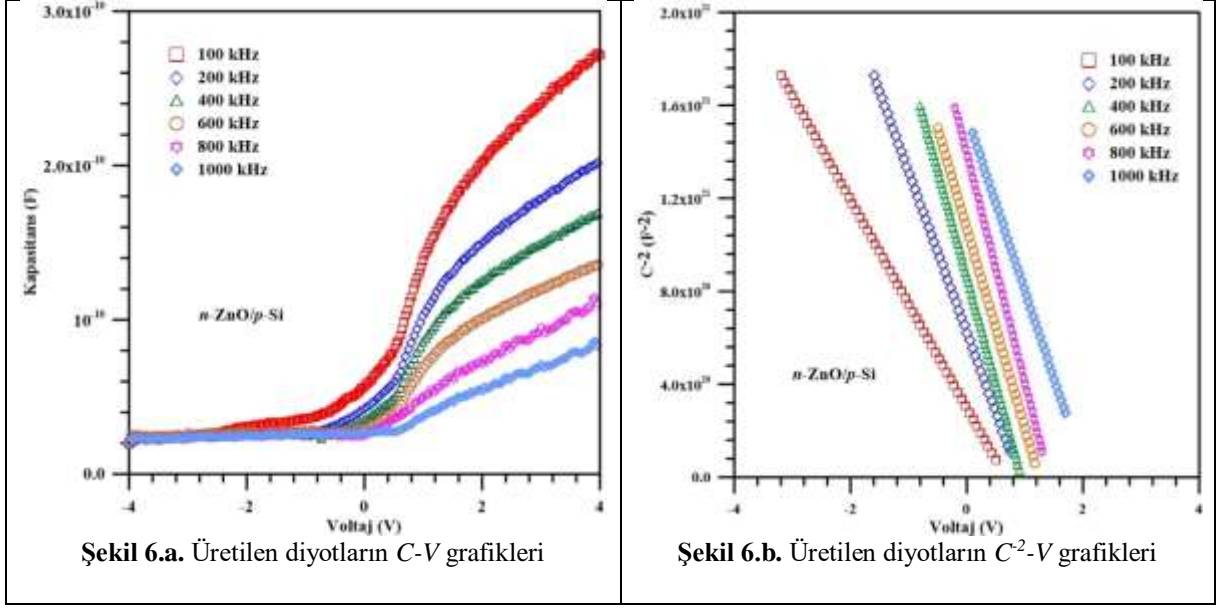
**Şekil 5.a.** *n-ZnO/p-Si* diyotların  $dV/d(\ln I)$ - $I$  grafiği



**Şekil 5.b.** *n-ZnO/p-Si* diyotların  $H(I)$ - $I$  grafiği

Bir diyotun elektriksel özelliklerini karakterize eden en temel ölçümlerinden biri de kapasitans-voltaj ( $C$ - $V$ ) ölçümüdür.  $C$ - $V$  ölçümleri Agilent 4294 Precision Impedance Analyzer cihazı ile yapıldı.

Üretilen diyotların oda sıcaklığında ve çeşitli frekanslarda ölçülen C-V grafiği Şekil 6.a' da verilmiştir. C-V ölçümünden elde edilen  $C^{-2}$ -V grafiği de Şekil 6.b' de verilmiştir.



Şekil 6.a'da, -4 V ile +4 V aralığında *n-ZnO/p-Si* heteroeklem diyotların C-V ölçümünün ters ve düz besleme bölgesi gösterilmektedir. Şekil 6.a' dan da görüldüğü gibi düz beslem bölgesinde artan voltaj ile kapasitanslarında kendi diyot karakterlerine uygun olarak artmıştır. Tüm diyotlar genel olarak ölçülen kapasitansları uygulanan voltaja ve frekansa bağımlılık gösterir. Kapasitansın voltaja ve frekansa bağıllığı üretim şartlarında oluşan kirlilik derecelerine, yüksek seri dirence, arayüzey durumlarına ve arayüzey katmanları gibi diyotların belirli özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 6.b' de üretilen diyotların ters beslemedeki  $C^{-2}$ -V grafiğinin bir doğrusal olduğu görülmektedir. Bu doğrusallık Schottky diyot ile uyumlu olduğunu ve arayüzey tabakası teorisi ile açıklanabilmektedir [35]. Doğrultucu kontaklarda, arayüzey katmanı kapasitansı Denklem (7) ile verilmektedir [36].

$$C^{-2} = \frac{2(V_d - V)}{q\epsilon_s N_a} \quad (7)$$

Burada  $V_d$ ,  $C^{-2}$ -V grafiğinin doğrusal kısmından elde edilen sıfır gerilimdeki difüzyon potansiyelidir;  $V$ , diyota uygulana gerilimdir;  $q$ , elektronun yükü;  $\epsilon_s$ , *p-Si* yarıiletkeninin dielektrik sabitidir ve değeri 11.2'dir [36];  $N_a$ , *B* katkılı *p-Si* yarıiletkeninde katkılamağa bağlı olarak oluşan akseptör yoğunluğudur ve Denklem (7) yardımıyla akseptör yoğunluğu Denklem (8) gibi hesaplanır.

$$N_a = \frac{2}{q\epsilon_s\epsilon_0 A^2} \frac{dV}{d(C^{-2})} \quad (8)$$

$C^{-2}$ -V karakteristiğinden bariyer yüksekliği şu şekilde elde edilir;

$$\Phi_b = (C_2 V_d + V_p) \quad (9)$$

Burada  $C_2=1/n$  ve  $V_p$ , p-tipi yarıiletkenin değerlik bandının kenarına göre elde edilen  $E_f$  'ye eşittir.  $E_f$ , Fermi enerji seviyesidir ve Denklem (10) şeklinde hesaplanır.

$$E_f = kT \ln \left( \frac{N_c}{N_a} \right) \quad (10)$$

Burada  $N_c$ , yarıiletkenin iletkenlik bandındaki durumların etkin yoğunluğu olarak adlandırılır.  $p$ -Si yarıiletken için oda sıcaklığında,  $N_c = 3.35 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  [35].  $C^2$ - $V$  grafiğinden elde edilen elektriksel parametreler Tablo 2.'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Üretilen diyotların  $C^2$ - $V$  grafiğinden elde edilen elektriksel parametreleri

$f$ (kHz)	$V_d$ (V)	$E_f$ (eV)	$N_a$ ( $\text{cm}^{-3}$ ) $\times 10^{13}$	$\Phi_b$ (eV)
100	0.67	0.30	2.73	0.67
200	0.91	0.31	1.86	0.82
400	1.17	0.32	1.41	0.97
600	1.25	0.32	1.50	1.02
800	1.41	0.32	1.31	1.11
1000	1.96	0.32	1.71	1.41

Bu çalışmanın amacı,  $n$ -ZnO/ $p$ -Si diyotların performanslarını termal buharlaştırma yöntemi kullanarak araştırmaktır. Üretilen numunelerin  $I$ - $V$  ve  $C$ - $V$  ölçümlerinin grafikleri çizilmiştir. Diyotların hesaplanan elektriksel parametreleri Tablo 1. ve Tablo 2.'de gösterilmektedir. Numunelerin idealite faktörleri seri dirençleri ihmal edilerek Denklem (3)'e göre  $I$ - $V$  grafiğinin düz besleme bölgesindeki doğrusal eğimlerinden hesaplanmıştır. Etkin engel yükseklikleri de Denklem 4. kullanılarak hesaplanmıştır.  $p$ - $n$  diyotta arayüzey oksidasyonu ve arayüzey bölgesindeki rekombinasyon nedeniyle 1.79 olarak hesaplanmıştır. Bu değer termal buharlaştırma yöntemi ile elde edilen  $n$ -ZnO/ $p$ -Si diyotları içinde en iyi değerdir. Ayrıca bu değer, püskürtme yöntemi [18], sol-jel yöntemi [27], atomik katman biriktirme yöntemi [29] ile uyumludur. Engel yükseklikleri de beklendiği gibi  $p$ - $n$  yapısının 0.74 eV olarak hesaplandı. Bulunan bu idealite faktörü ve engel yükseklik değerleri literatür ile uyum içindedir.

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Termal buharlaştırma yöntemi ile üretilen  $n$ -ZnO/ $p$ -Si diyotların  $3.13 \times 10^4$  doğrultma faktörü ile iyi bir doğrultucu özellik göstermiştir. Yöntem, film homojenliği, kalınlık kontrolü için diğer biriktirme yöntemlerine tercih edilmiştir. Bazı diyot ve fotovoltaik parametreler karanlıkta ve aydınlatma koşullarında, oda sıcaklığında hesaplanmıştır. Karanlıkta ve çeşitli aydınlatma altında ölçülen  $I$ - $V$  değerlerinden fotodiyot özelliğe sahip olduğu anlaşılmıştır. İdealite faktörü ve engel yüksekliği sırasıyla 1.79 ve 0.74 eV olarak bulundu. Ayrıca cihazın  $C$ - $V$  karakterizasyonları oda sıcaklığında incelenmiştir. Cihazın  $C$ - $V$  ölçümleri, kapasitans değerlerinin frekansa bağlı olduğunu göstermiştir. Daha önce termal buharlaştırma yöntemi ile hesaplanmamış olan  $C$ - $V$  değerleri de bu çalışma ile hesaplanmış ve rapor edilmiş oldu. Bu deneysel sonuçlar, ZnO ince film yapılarının bazı fotovoltaik ve optoelektronik uygulamalarda kullanılabileceğini göstermiştir.

#### Teşekkür

Bu çalışma, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından FYL-2018-7203 proje numarası ile finansal olarak desteklenmiştir.

#### Yazarların Katkısı

Bu makaledeki tüm katkı yazara aittir.

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

**Kaynaklar**

- [1] Krunks M., Mellikov E., 1995. Zinc oxide thin films by the spray pyrolysis method, *Thin Solid Films*, 270: 33-36.
- [2] Paraguay F.D., Estrada W.L., Acosta D.R.N., Andradeb E., Miki-Yoshida M., 1999. Growth, structure and optical characterization of high quality ZnO thin films obtained by spray pyrolysis, *Thin Solid Films*, 350: 192-202.
- [3] Ayouchi R., Leinena D, Martina F., Gabasa M., Dalchieleb E., Ramos-Barrado J.D., 2003. Preparation and characterization of transparent ZnO thin films obtained by spray pyrolysis, *Thin Solid Films*, 426: 68-72.
- [4] Zaier A., Meftah A., Jaber A.Y., Abdelaziz A.A., Aida M.S., 2015. Annealing effects on the structural, electrical and optical properties of ZnO thin films prepared by thermal evaporation technique, *Journal of King Saud University-Science*, 27: 356-360.
- [5] Wang Y.G., Lau S.P., Lee H.W., Yu S.F., Tay B.K., Zhang X.H., Tse K.Y., Hng H.H., 2003. Comprehensive study of ZnO films prepared by filtered cathodic vacuum arc at room temperature, *Journal of Applied Physics*, 94(3), 1597-1604.
- [6] Hames Y., Alpaslan Z., Kosemen A., San S.E., Yerli Y., 2010. Electrochemically grown ZnO nanorods for hybrid solar cell applications, *Solar Energy* 84: 426-431.
- [7] Hasim S.N.F., Abdul Hamid M.A., Shamsudin R., Jalar A., 2009. Synthesis and characterization of ZnO thin films by thermal evaporation, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 70: 1501-1504.
- [8] Abdallah B., Kakhia M., Obaide A., 2021. Morphological and structural studies of ZnO nanotube films using thermal evaporation technique, *Plasmonics*, <https://doi.org/10.1007/s11468-021-01420-x>.
- [9] Chrissanthopoulos A., Baskoutas S., Bouropoulos N., Dracopoulos V., Pouloupoulos P., Yannopoulos S.N., 2011. Synthesis and characterization of ZnO/NiO p-n heterojunctions: ZnO nanorods grown on NiO thin film by thermal evaporation, *Photonics and Nanostructures*, 9: 132-139.
- [10] Yao B.D., Chan Y.F., Wang N., 2002. Formation of ZnO nanostructures by a simple way of thermal evaporation, *Applied Physics Letters*, 81(4): 757-759.
- [11] Patel M., Kim H.S., Kim J., Yun J.H., Kim S.J., Choi E.H., Park H.H., 2017. Excitonic metal oxide heterojunction NiO/ZnO solar cells for all transparent module integration, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 170: 246-253.
- [12] Vyas S., Giri P., Singh S., Chakrabarti P., 2015. Comparative study of as-deposited ZnO thin films by thermal evaporation, pulsed laser deposition and RF sputtering methods for electronic and optoelectronic applications, *Journal of Electronic Materials*, 44(10): 3401-3407.
- [13] Bouhssira N., Abed S., Tomasella E., Cellier J., Mosbah A., Aida M.S., Jacquet M., 2006. Influence of annealing temperature on the properties of ZnO thin films deposited by thermal evaporation, *Applied Surface Science*, 252: 5594-5597.
- [14] Fouad O.A., Ismail A.A., Zaki Z.I., Mohamed R.M., 2006. Zinc oxide thin films prepared by thermal evaporation deposition and its photocatalytic activity, *Applied Catalysis B: Environmental*, 62: 144-149.
- [15] Utlu G., 2019. Structural investigation of ZnO thin films obtained by annealing after thermal evaporation, *Sakarya University Journal of Science*, 23(4): 650-656.
- [16] Herediaa E., Bojorgea C., Casanova J., Canepaa H., Craievichb A, Kellermann G., 2014. Nanostructured ZnO thin films prepared by sol-gel spin-coating, *Applied Surface Science*, 317: 19-25.
- [17] Orak I., Kocyigit A., Turut A., 2017. The surface morphology properties and respond illumination impact of ZnO/n-Si photodiode by prepared atomic layer deposition technique, *Journal of Alloys and Compounds*, 691: 873-879.
- [18] Özmen A., Aydogan Ş., Yilmaz M., 2019. Fabrication of spray derived nanostructured n-ZnO/p-Si heterojunction diode and investigation of its response to dark and light, *Ceramics International*, 45: 14794-14805.
- [19] Bedia F.Z., Bedia A., Benyoucef B., Hamzaoui S., 2014. Electrical characterization of n-ZnO/p-Si heterojunction prepared by spray pyrolysis technique, *Physics Procedia*, 55: 61-67.



- [20] Lee J.Y, Choi Y.S., Kim J.H., Park M.O., Im S., 2002. Optimizing n-ZnO/p-Si heterojunctions for photodiode applications, *Thin Solid Films*, 403: 553-557.
- [21] Jeong I.S., Kim J.H., Im S., 2003. Ultraviolet-enhanced photodiode employing n-ZnO/p-Si structure, *Applied Physics Letters*, 83: 2946-2948.
- [22] Chaabouni F., Abaab M., Rezig B., 2006. Characterization of n-ZnO/p-Si films grown by magnetron sputtering, *Superlattices and Microstructures*, 39: 171-178.
- [23] Cho S.G., Lee D.U., Pak S.W., Nahm T.U., Kim E.K., 2012. Fabrication of a n-ZnO/p-Si heterojunction diode by ultra-high vacuum magnetron sputtering, *Thin Solid Films*, 520: 5997-6000.
- [24] Tata S., Chabane L., Zebbar N., Trari M., Kechouane M., Rahal A., 2020. Study of morphological and electrical properties of the ZnO/p-Si heterojunction: Application to sensing efficiency of low concentration of ethanol vapor at room temperature, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 109: 104926.
- [25] Yakuphanoglu F., Caglar Y., Caglar M., Ilican S., 2010. ZnO/p-Si heterojunction photodiode by sol-gel deposition of nanostructure n-ZnO film on p-Si substrate, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 13: 137-140.
- [26] Aksoy S., Caglar Y., 2012. Effect of ambient temperature on electrical properties of nanostructure n-ZnO/p-Si heterojunction diode, *Superlattices and Microstructures* 51: 613-625.
- [27] Ocak Y.S., 2012. Electrical characterization of DC sputtered ZnO/p-Si heterojunction, *Journal of Alloys and Compounds* 513: 130-134.
- [28] Algün G., 2018. ZnO kaplama miktarının n-ZnO/p-Si heteroeklem güneş hücresinin verimliliğine etkisi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, 13 (2): 154-163.
- [29] Orak İ., 2016. The performances photodiode and diode of ZnO thin film by atomic layer deposition technique, *Solid State Communications*, 247: 17-22.
- [30] Kima H., Jungb M.J., Choib S., Choi B.J., 2020. ALD growth of ZnO on p-Si and electrical characterization of ZnO/p-Si heterojunctions, *Materials Today Communications*, 25: 101265.
- [31] Sharma S., Periasamy C., 2014. A study on the electrical characteristic of n-ZnO/p-Si heterojunction diode prepared by vacuum coating technique, *Superlattices and Microstructures*, 73: 12-21.
- [32] Reem Sami Ali R.S., P, Sharba K.S., Jabbar A.M., Chiad S.S., Abass K.H., Habubi N.F., 2020. Characterization of ZnO thin film/p-Si fabricated by vacuum evaporation method for solar cell applications, *NeuroQuantology*, 18 (1): 26-31.
- [33] Ozkartal A. 2019. Characterization of the ITO/p-Si/Al contacts produced by thermal evaporation. *Vacuum*, 168: 108799.
- [34] Ziel A., 1968. *Solid State Physical Electronics*, second ed. Prentice-Hall, New Jersey.
- [35] Sze S.M., 1981. *Physics of Semiconductor Devices*, second ed. Wiley, New York.
- [36] Rhoderick E.H., Williams R.H., 1978. *Metal-Semiconductor Contacts*. Oxford University Press.
- [37] Ozkartal A., Temirci C., 2016. Relationship between photovoltaic and diode characteristic parameters in the Sn/p-Si Schottky type photovoltaics, *Solar Energy*, 132: 96–102.
- [36] Özmenteş R., Temirci C., Ozkartal A., Ejderha K., Yildirim N. 2018. Characterization of CuO/n-Si heterojunction solar cells produced by thermal evaporation. *Materials Science-Poland*, 36 (4): 668-674.
- [37] Cheung S.K., Cheung N.W., 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics, *Applied Physics Letters*, 49 (2): 85–90.