



## Termal Buharlaştırma Yöntemiyle Hazırlanan Al/TiO<sub>2</sub>/p-Si Schottky Diyotun Elektriksel Özelliklerinin Sıcaklık ve Aydınlanma Şiddetine Bağlı İncelenmesi

Ömer SEVGİLİ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Bingöl Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Bingöl, Türkiye  
 Ömer SEVGİLİ ORCID No: 0000-0003-1740-1444

\*Sorumlu yazar: [omersevgili06@gmail.com](mailto:omersevgili06@gmail.com)

(Alınış: 07.05.2021, Kabul: 24.05.2021, Online Yayınlanma: 25.06.2021)

### Anahtar Kelimeler

Termal buharlaştırma, TiO<sub>2</sub>, Fotoakım, Sıcaklığa bağlılık, Aydınlanma şiddetine bağlılık, Elektriksel özellikler

**Öz:** Bu çalışmada kullanılan Al/TiO<sub>2</sub>/p-Si Schottky Diyotu (SD) termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak oluşturuldu. Aygıtın elektriksel özellikleri geniş sıcaklık aralığında ve farklı aydınlanma şiddetlerine bağlı olarak gerçekleştirildi. Sıcaklığa bağlı ölçümler 20 K adım aralıklarla 100 K ve 320 K aralığında gerçekleştirildi. Artan sıcaklıkla birlikte, aygıtın idealite faktörü değeri 4,878'den 2,305'e kadar azalmaktayken, engel yüksekliği ise 0,287 eV'den 0,714 eV'e kadar artmaktadır. Aygıt için elde edilen diyot parametreleri literatürdeki çeşitli yöntemlerle elde edilen benzer yapılarla karşılaştırıldı. Yerli oksit tabaka, kirlilikler, tüketim bölgesi kalınlığı gibi nedenlerden dolayı arayüzey durumlarının değerinin 10<sup>14</sup> eV<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup> mertebesinde olduğu sonucuna varıldı. Işık şiddetine bağlı olarak gerçekleştirilen ölçümlerde idealite faktörü değeri artan ışık şiddetiyle 2,238'den 2,868'e kadar artmaktayken, engel yüksekliği değeri 0,645 eV'den 0,574 eV'ye kadar azalmaktadır. Ayrıca yapının fotoakım-zaman grafiği çizilerek ışığa tepkisi incelendi ve aygıtın ışığa tepki süresinin 0,26 s'den az olduğu bulundu.

275

## Investigation of Dependent on Temperature and Illumination Density Electrical Properties of Al/TiO<sub>2</sub>/P-Si Schottky Diode Prepared by Thermal Evaporation

### Keywords

Thermal evaporation, TiO<sub>2</sub>, Photocurrent, Temperature dependence, Illumination intensity dependence, Electrical properties

**Abstract:** The Al/TiO<sub>2</sub>/p-Si Schottky Diode (SD) used in this study was fabricated using the thermal evaporation method. The electrical properties of the device were carried out in a wide temperature range and different illuminance intensities. Temperature dependent measurements were carried out at between 320 K and 100 K step by 20 K. With the increasing temperature, the ideality factor value of the device decreases from 4.878 to 2.305 and the barrier height increases from 0.287 eV to 0.714 eV. The diode parameters obtained in this study were compared with similar structures obtained by various methods in the literature. It was concluded that the value of the interface states was the order of 10<sup>14</sup> eV<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup> due to reasons such as the local oxide layer, impurities, thickness of depletion layer. In measurements performed depending on the illuminance intensity, the value of the ideality factor increases from 2,238 to 2,868 with increasing illuminance intensity, while the barrier height value decreases from 0,645 eV to 0,574 eV. In addition, the photocurrent-time graph of the structure was drawn and its response to light was examined. The response time of the device to light was found to be less than 0.26 s.

### 1. GİRİŞ

Son yıllarda yapılan çalışmalar Metal-Yarıiletken (MY) kontak olarak bilinen Schottky diyotların (SD) aygıt teknolojisinde önemli bir yere sahip olmasından dolayı bu tip yapıların güvenilirliği ve performansı üzerine odaklanmış durumdadır [1–3]. Bundan dolayı MY tipi SD diyotlar metal ile yarıiletken arasında geleneksel olarak kullanılan SiO<sub>2</sub> gibi malzemeler yerine TiO<sub>2</sub>,

HfO<sub>2</sub>, ZnO ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi yüksek dielektriğe sahip alternatif arayüzey tabakaları kullanılarak Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MY) ya da Metal-Polimer-Yarıiletken (MPY) yapılar dönüşürmektedir [4–13]. SiO<sub>2</sub> ile karşılaştırıldığında bu arayüzey tabakalarının en önemli avantajı düşük arayüzey durumlarına sahip olmaları ve yüksek dielektrik geçirgenliğe sahip olmalarıdır. Bu tür yüksek dielektrik materyal kullanılması aygıtın yüksek idealite faktörü (n), seri direnci (R<sub>s</sub>) ve arayüzey durumlarının (N<sub>ss</sub>) azalmasını

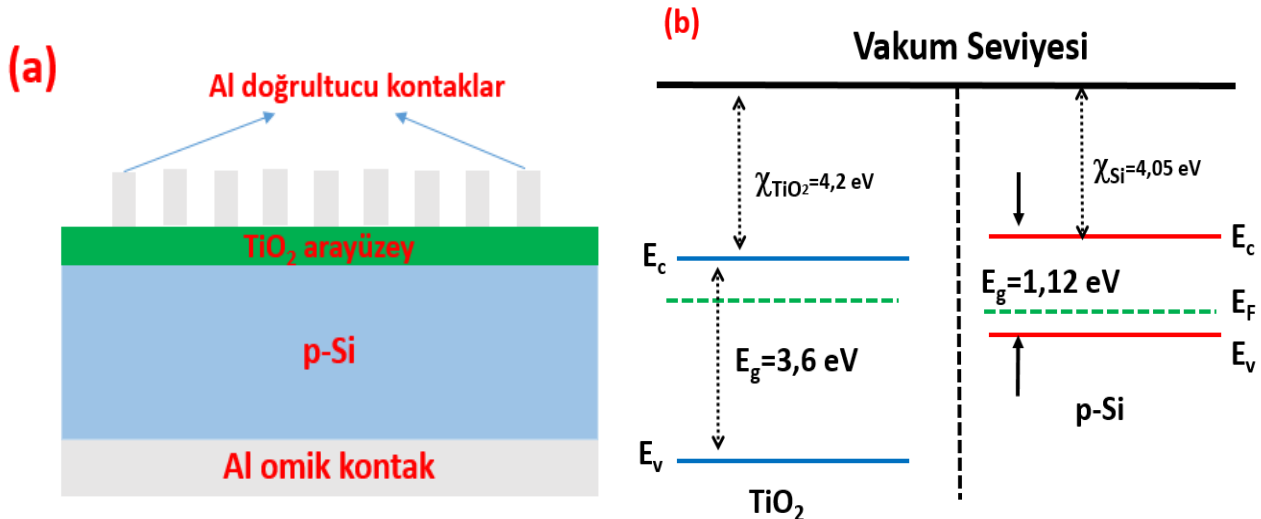
sağlar. Böylece aygıtın performansı ve güvenilirliği önemli ölçüde geliştirilebilir.

Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı, yüksek dielektrik materyaller arasında, optik özellikleri ve ilginç kimyasal yapıya sahip olmasından dolayı Titanyum dioksit ( $\text{TiO}_2$ ) diğer materyallere oranla araştırmacılar tarafından daha çok ilgi görüyor. Ayrıca  $\text{TiO}_2$  kimyasal, optik ve elektrik özelliklerinden dolayı literatürde kapsamlı olarak incelenmektedir.  $\text{TiO}_2$  iyi bilinen ve yarı iletken teknolojisinde en çok araştırılan materyallerden birisidir. Geniş bant aralığına (3.05 eV) sahip olan  $\text{TiO}_2$ , düşük sızıntı akım yoğunluğu, yüksek termal stabilite ve yüksek dielektrik sabitinden dolayı SD, güneş pili ve sensör uygulamalarında potansiyel bir adaydır [10,11,14–16].  $\text{TiO}_2$  esas olarak katalizör destekleri, filtreler, kaplamalar, foto-iletkenler ve dielektrik malzemeler olarak uygulanır.  $\text{TiO}_2$  tabanlı aygıtların performansı ve güvenilirliği özellikle metal-yarıiletken arayüzündeki  $\text{TiO}_2$  tabakasının oluşumuna, tavlama sıcaklığına, arayüzünde arayüz durumlarının yoğunluğuna ( $N_{ss}$ ), cihazların seri direncine ( $R_s$ ) ve homojen olmama durumlarına bağlıdır. Lee ve ark. [17], arayüzey tabakasının büyümesi sonucu kaçak akımda azalma meydana geldiğini öne sürmüşlerdir.

Bu çalışmada, termal buharlaştırma yöntemiyle hazırlanan Al/ $\text{TiO}_2$ /p-Si Schottky Diyotun elektriksel özellikleri incelendi. Aygıtın elektriksel özellikleri üzerine sıcaklık ve aydınlanma şiddeti etkisinin daha iyi anlaşılması adına bu fiziksel koşullardaki ölçümler geniş bir aralıkta gerçekleştirildi. Ayrıca elde edilen veriler, literatürde fabrikasyonu ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiş  $\text{TiO}_2$  arayüzeyine sahip çeşitli aygıtların elektriksel özellikleri ile karşılaştırıldı. Arayüzey durumları aygıtın elektriksel özelliklerini etkilediğinden bu durumların etkisini ayrıntılı incelemek için farklı sıcaklıklardaki  $N_{ss}$ -( $E_{ss}$ - $E_c$ ) grafiği çizilerek arayüzey durumlarının davranışını incelendi. Fotoaygıtlar için önemli bir parametre olan fotoyanıt, fabrikasyonu yapılan aygıtın fotoakım-zaman grafiği çizilerek incelendi.

## 2. MATERYAL VE METOT

Al/ $\text{TiO}_2$ /p-Si SD'nin hazırlanması için öncelikle 1-10  $\Omega$ -cm özdirençli, (101) yönelimli ve 500  $\mu\text{m}$  kalınlıklı Boron katkılı p-Si ultrasonik banyoda sırasıyla beşer dakika boyunca aseton, isopropanol ve deiyonize su ile yıkandı. Yıkanan kristal kuru nitrojen gazı ile iyice kurutuldu. Kimyasal olarak temizlenen kristal hemen termal buharlaştırma sistemine alındı ve burada arka mat yüzeyin tamamına yaklaşık  $10^{-6}$  Torr'da yüksek saflıkta (%99.999) Al buharlaştırıldı. Daha güvenilir ve daha düşük bir omik kontak elde etmek için Al kaplı kristal  $450^\circ\text{C}$ 'de 5 dk boyunca tavlandı. Böylelikle omik kontak oluşturulmuş oldu. Arayüzey tabakasını oluşturmak için ise omik kontağı oluşturulan kristalin ön yüzüne termal buharlaştırma sisteminde  $10^{-6}$  Torr'da üzerinden akım geçen molibden flama yardımıyla toz haldeki  $\text{TiO}_2$  (Sigma-Aldrich, ~25 nm ortalama parçacık boyutu, %99,5 saflık) buharlaştırıldı. Elde edilen bu arayüzey tabakasının kalınlığı ( $\delta_i$ ) 1 MHz'deki yalıtkan tabaka kapasitansından ( $C_i = \epsilon_i \epsilon_0 A / \delta_i$ ) yaklaşık 20.4 nm olarak hesaplanmıştır. Yük geçişinin yarıiletken taraftan metal tarafa geçişini kolaylaştırmak amacıyla doğrultucu ya da diğer adıyla Schottky kontağı yapmak için ise üzerinde 1 mm yarıçaplı gölge maske yardımıyla kristalin arayüzey kaplı tarafına termal buharlaştırma sisteminde  $10^{-6}$  Torr'da yüksek saflıkta (%99.999) Al buharlaştırıldı. Böylece 1 mm çaplı ve yaklaşık 100 nm kalınlığında bir kontak elde edilmiş oldu. Böylelikle Al/ $\text{TiO}_2$ /p-Si SD fabrikasyonu tamamlanmış oldu. Tamamlanan aygıtın şematik gösterimi ve enerji bant diyagramı Şekil 1 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Diyotun hem farklı sıcaklıktaki hem de farklı aydınlanma şiddetleri altındaki akım-grilim (I-V) ölçümleri Keithley 2400 source meter kullanılarak gerçekleştirildi. Sıcaklığa bağlı ölçümlerde aygıt iç ortamı karanlık olan bir kreyostat içerisine yerleştirilerek bilgisayar yardımıyla sıcaklık kontrolü sağlanarak her sıcaklıktaki I-V ölçümü tek tek gerçekleştirildi. Aydınlanma şiddetine bağlı ölçümler ise karanlık ve farklı aydınlatma koşullarında bir solar simülasyon yardımıyla her aydınlatma şiddetindeki I-V ölçümleri tek tek gerçekleştirildi.

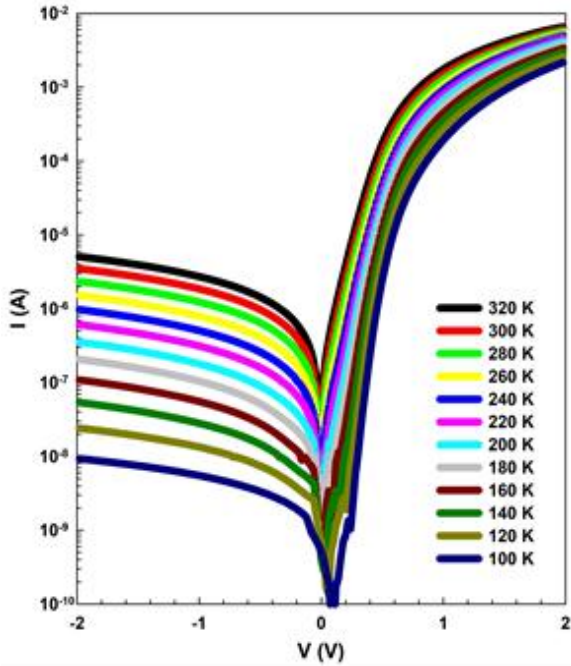


Şekil 1. Al/ $\text{TiO}_2$ /p-Si SD'nin (a) şematik gösterimi (b) enerji bant diyagramı

### 3. BULGULAR

#### 3.1. Sıcaklığa Bağlı Elektriksel Özellikler

Al/TiO<sub>2</sub>/p-Si SD için sıcaklığa bağlı I-V ölçümleri 20 K adımlarla 100 K ile 320 K aralığında gerçekleştirildi. Aygıt için elde edilen I-V-T grafiği Şekil 2’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi yaklaşık 0,5 V’den sonra arayüzey tabakası (TiO<sub>2</sub>) ve p-Si kristalinin kalınlıklarının neden olduğu diyotunun seri direncinden (R<sub>s</sub>) dolayı tüm sıcaklık değerleri için I-V-T grafiğinde lineerlik bozularak bir bükülme meydana geliyor [18,19]. Dahası, artan sıcaklıkla ve uygulanan gerilimle birlikte doğru beslemde akım değeri üsten olarak artıyor. Bu durum I-V grafiğinin bu şekilde davranışının sıcaklığa güçlü bir şekilde bağlı olduğunun göstergesidir. Doğrultma Oranı (DO) bir diyotun I-V grafiğinin doğrultma kalitesini belirler. Buna göre DO doğru beslem akımının (I<sub>F</sub>) ters beslem akımına (I<sub>R</sub>) oranı olarak tanımlanır. Aygıt için her bir sıcaklık değerinde ± 2V’de hesaplanan DO değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Hem Tablo 1 hem de Şekil 3’den görülüyor ki aygıt bütün sıcaklıklar için iyi bir DO değerine sahiptir ve sıcaklığın azalmasıyla birlikte DO değeri artmaktadır.



Şekil 2. Çeşitli sıcaklıklarda Al/TiO<sub>2</sub>/p-Si SD için elde edilen I-V-T grafiği

Bir diyota uygulanan gerilim ile akım arasındaki ilişki genellikle Termiyonik Emisyon (TE) teorisi ile tanımlanır. TE’ye göre bu iki parametre arasındaki ilişki Eşitlik 1.’deki gibi verilir [16,20–22].

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (1)$$

Burada I<sub>0</sub> doyma akımı, n ise idealite faktörüdür ve bunlar aşağıdaki gibi tanımlanırlar [20,23–25];

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{B0}}{kT}\right) \quad (2)$$

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

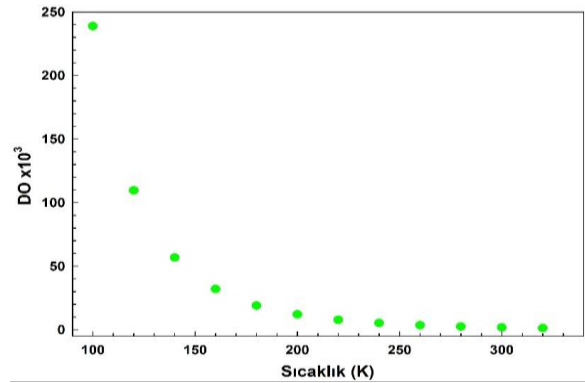
Burada A diyot alanı, A\* Richardson sabiti (p-Si için 32 A cm<sup>-2</sup>K<sup>-2</sup>), k Boltzman sabiti (1,38x10<sup>-23</sup> J K<sup>-1</sup>), T ise Kelvin cinsinden sıcaklıktır. Ayrıca Eşitlik 2.’de verilen Φ<sub>B0</sub> sıfır beslemdeki engel yüksekliğidir ve aşağıdaki gibi tanımlanır [20,21,26];

$$\Phi_{B0} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (4)$$

Aygıtın I-V-T grafiğinin her bir sıcaklık değerleri için bu sıcaklıklara ait lineer bölgelerinin eğimleri, x eksenini kestiği noktalar ve Eşitlik 2.-4. kullanılarak hesaplanan n, I<sub>0</sub> ve Φ<sub>B0</sub> değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

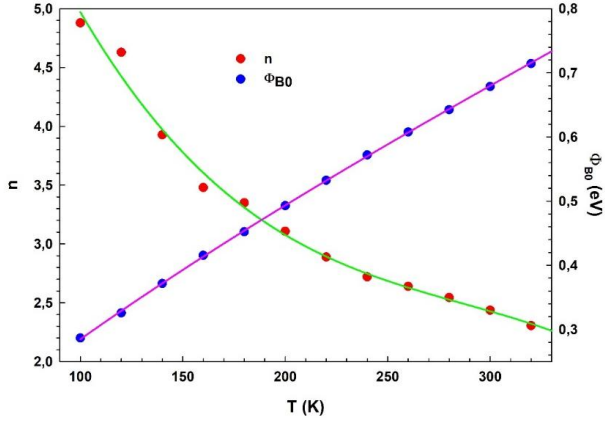
Tablo 1. Çeşitli sıcaklıklarda Al/TiO<sub>2</sub>/p-Si SD için elde edilen n, I<sub>0</sub>, Φ<sub>B0</sub>, R<sub>s</sub> ve R<sub>sh</sub> değerleri

T (K)	n	I <sub>0</sub> (A)	Φ <sub>B0</sub> (eV)	R <sub>s</sub> (Ω)	R <sub>sh</sub> (kΩ)	DO x10 <sup>3</sup> (± 2V)
320	2,305	1,48x10 <sup>-7</sup>	0,714	307,31	390,83	1,27
300	2,437	9,23x10 <sup>-8</sup>	0,679	322,11	569,58	1,77
280	2,544	5,49x10 <sup>-8</sup>	0,643	338,29	847,33	2,51
260	2,639	2,89x10 <sup>-8</sup>	0,608	361,34	1303,14	3,61
240	2,720	1,45x10 <sup>-8</sup>	0,572	388,20	2035,52	5,24
220	2,889	7,89x10 <sup>-9</sup>	0,533	418,32	3254,14	7,78
200	3,107	3,91x10 <sup>-9</sup>	0,493	460,62	5585,28	12,12
180	3,350	1,82x10 <sup>-9</sup>	0,452	506,46	9616,87	18,99
160	3,479	5,38x10 <sup>-10</sup>	0,416	569,48	18236,69	32,02
140	3,928	2,11x10 <sup>-10</sup>	0,372	647,88	36812,01	56,82
120	4,628	7,68x10 <sup>-11</sup>	0,326	751,03	82240,56	109,51
100	4,878	9,12x10 <sup>-12</sup>	0,287	894,45	213631,6	238,84



Şekil 3. DO’nun sıcaklığa bağlı değişimi.

Tablo 1 ve Şekil 4’ten de görüldüğü gibi sıcaklık artmasıyla n değeri azalırken Φ<sub>B0</sub> değeri artmaktadır. Bu da gösteriyor ki hem n değeri hem de Φ<sub>B0</sub> değeri uygulanan sıcaklık değerlerine güçlü bir şekilde bağlıdır. Temel olarak, akım iletimi sıcaklıkla ilişkili bir süreçtir. Bundan dolayı elektronlar daha düşük sıcaklıklarda düşük engelden geçebilirken daha yüksek sıcaklıklarda yüksek engeli aşabilecek yeterli enerjiye sahip olduklarından dolayı yüksek engelden geçebilirler. Dahası, artan sıcaklıkla birlikte engel yüksekliğindeki artış, sıcaklık ile ilişkili tuzakların ve rekombinasyon merkezlerinin meydana gelmesi yoluyla TiO<sub>2</sub>/p-Si metal-yarıiletken yapıların tükenme bölgesindeki donör konsantrasyonundaki azalma ile açıklanabilir [27].

Şekil 4. n ve  $\Phi_{B0}$  değerlerinin sıcaklık ile ilişkisi

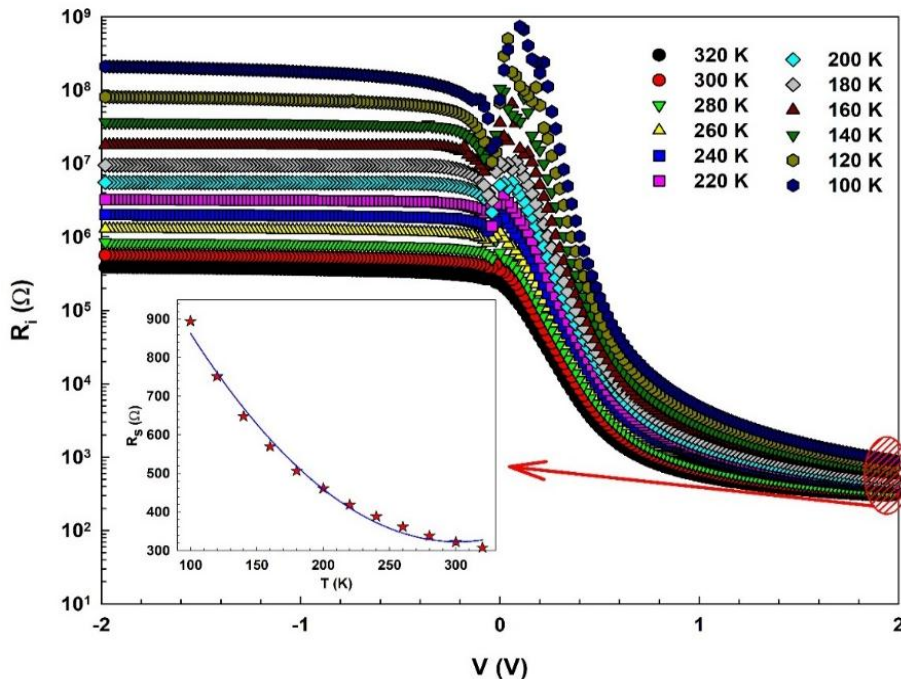
Termal kaplama haricinde çeşitli yöntemler kullanılarak  $\text{TiO}_2$  arayüzey tabakası oluşturulması literatürde mevcuttur [14,28–31]. Farklı yöntemler kullanılarak oluşturulan  $\text{TiO}_2$  arayüzeyine sahip SD'ler için TE teorisi kullanılarak elde edilen n,  $I_0$  ve  $\Phi_{B0}$  değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi oda sıcaklığı ve civarında yapılan ölçümlerde arayüzey tabakasını oluşturmak için kullanılan yöntemin farklılığı n,  $I_0$  ve  $\Phi_{B0}$  değerlerini etkilemiştir. Bu çalışmada oluşturulan aygıtın temel diyot parametreleri literatürdeki diğer yöntemlerle elde edilenler ile karşılaştırıldığında n değeri yüksek olarak elde edilmişken engel yüksekliği diğerlerine kıyasla daha küçük bulunmuştur.

Tablo 2. Çeşitli yöntemler kullanılarak oluşturulmuş  $\text{TiO}_2$  arayüzeyine sahip SD için TE kullanılarak elde edilen n,  $I_0$  ve  $\Phi_{B0}$  değerleri

Diyot	Arayüzey Kaplama Yöntemi	T (K)	n	$I_0$ (A)	$\Phi_{B0}$ (eV)	Referans
Al/ $\text{TiO}_2$ /p-Si	Termal kaplama	Oda sıcaklığı	2,437	$9,23 \times 10^{-8}$	0,679	Bu çalışma
Al/ $\text{TiO}_2$ /p-Si	Atomik tabaka kaplama	Oda sıcaklığı	1,04	-	0,80	[14]
Au/ $\text{TiO}_2$ (rutile)/n-Si	DC magnetron püskürtme yöntemi	295	2,59	-	0,72	[28]
Al/ $\text{TiO}_2$ /p-Si	Daldırma süreç yöntemi	300	1,51	$1,64 \times 10^{-8}$	0,722	[29]
Al/ $\text{TiO}_2$ /n-Si	Spin-coating	300	1,93	$1,83 \times 10^{-11}$	0,93	[30]
Ni/n- $\text{TiO}_2$ /p-Si/Al	Darbeli lazer biriktirme	300	-	-	0,59	[31]

Diyotların ideallikten sapmasına neden olan bir başka parametre de yapının direncidir ( $R_i$ ). Aygıt için Ohm Yasası [20] ( $R_i = dV/dI$ ) kullanılarak hesaplanan  $R_i$ -V grafiği Şekil 5'te verilmiştir. Doğru öngerilimlemedeki  $R_i$  değeri yapının seri direncine ( $R_s$ ) karşılık gelirken ters öngerilimdeki  $R_i$  değeri ise yapının şönt direncine ( $R_{sh}$ ) karşılık gelir. İdeal durumda  $R_s$  değeri oldukça küçük olması gerekirken  $R_{sh}$  değeri oldukça büyük olması gerekir. Aygıt için  $R_i$ 'nin doğru ve ters beslemdeki değerleri kullanılarak hesaplanan  $R_s$  ve  $R_{sh}$

değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca  $R_s$ 'nin sıcaklıkla ilişkisi Şekil 5'in içerisinde verilmiştir. Bu şekilden ve Tablo 1'den görüldüğü gibi azalan sıcaklıkla birlikte yapının  $R_s$  değeri artmaktadır. Daha düşük sıcaklıklarda daha düşük termal enerjiye sahip elektronların varlığından dolayı, bariyeri geçen serbest taşıyıcı konsantrasyonu azalacak ve akım iletimi, daha düşük bariyer yüksekliğine sahip yamalar boyunca hakim olacaktır. Böylece  $R_s$  değeri artacaktır.

Şekil 5. Çeşitli sıcaklıklarda Al/ $\text{TiO}_2$ /p-Si SD için elde edilen  $R_i$ -V grafiği



Arayüzey durumları ( $N_{ss}$ ) bir diyotun elektrik ve dielektrik özelliklerini etkiler ve idealden sapmasına neden olur. Yani arayüzey tabakası ve yarıiletken arasında yerleşmiş  $N_{ss}$ 'lerin varlığı aygıtın akım-gerilim ve kapasitans-gerilim ölçümlerine etki eder.  $N_{ss}$  enerjiye bağlı değişim grafiği aşağıdaki eşitlikler ve doğru beslem I-V verileri kullanılarak hesaplanabilir [32,33].

$$n(V) = \frac{q}{kT} \left\{ \frac{V - IR_s}{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)} \right\} \quad (5a)$$

$$\phi_e = \phi_{B0} + \left(1 - \frac{1}{n(V)}\right) (V - IR_s) \quad (5b)$$

$$E_{ss} - E_v = q(\phi_e - V) \quad (5c)$$

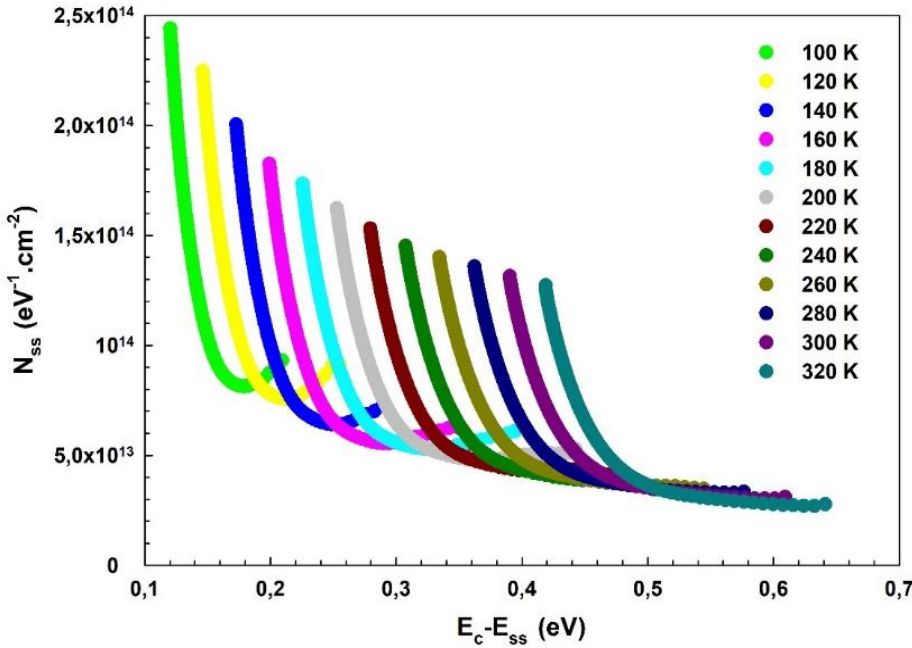
$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left\{ \frac{\epsilon_i}{\delta_i} (n(V) - 1) - \frac{\epsilon_s}{w_D} \right\} \quad (5d)$$

Burada  $\phi_e$  efektif engel yüksekliği diğer parametreler literatürde belirtilmiştir [34–37]. Eşitlik 5a.-5d. kullanılarak aygıt için elde edilen  $N_{ss} - (E_{ss} - E_v)$  grafiği Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'dan da görüldüğü gibi, arayüzey tabakasından dolayı sarkan bağlar pasifleşmiştir ve verilen enerji bölgesinde diyot için  $N_{ss}$  değerleri düşüktür. Ayrıca, arayüzey tabakası hem taşıyıcıların metal-yarı iletken bağlantısından içeri girmesini engeller hem de yarı iletken yüzeydeki aktif sarkan bağları etkisiz hale getirir [38]. Metal ile

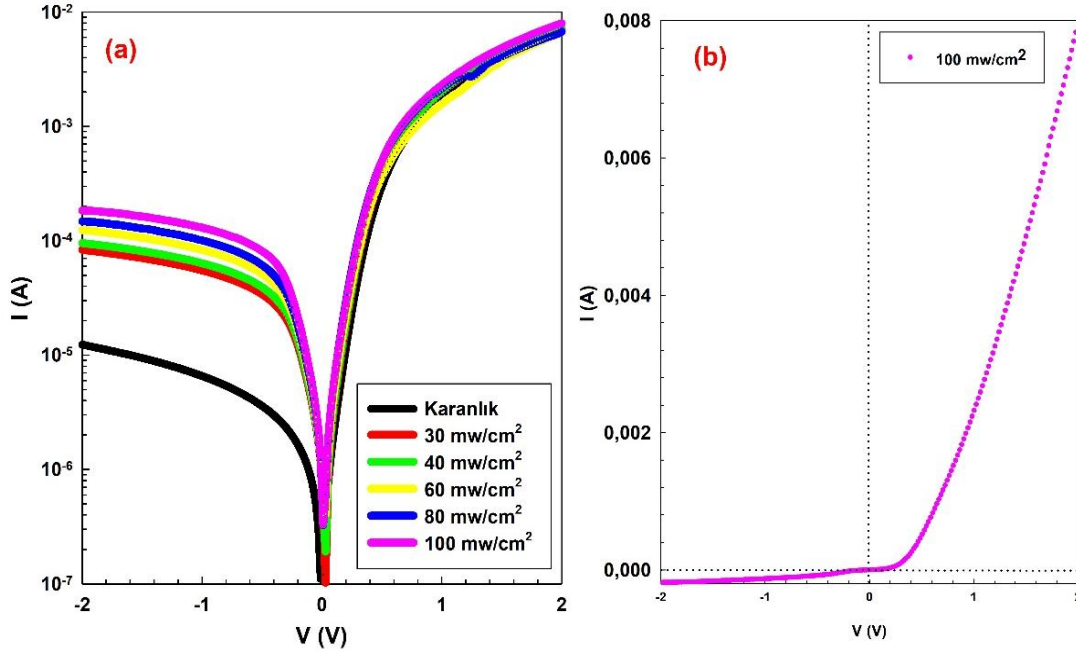
yarıiletken arasında doğal yolla oluşan ince bir yerli oksit tabaka, kirlilikler, tüketim bölgesi kalınlığı ve arayüzey tabakasının yüksek dielektrik değere sahip olması arayüzey durumlarının yüksek olmasına neden olur.

### 3.2. Aydınlanma Şiddetine Bağlı Elektriksel Özellikler

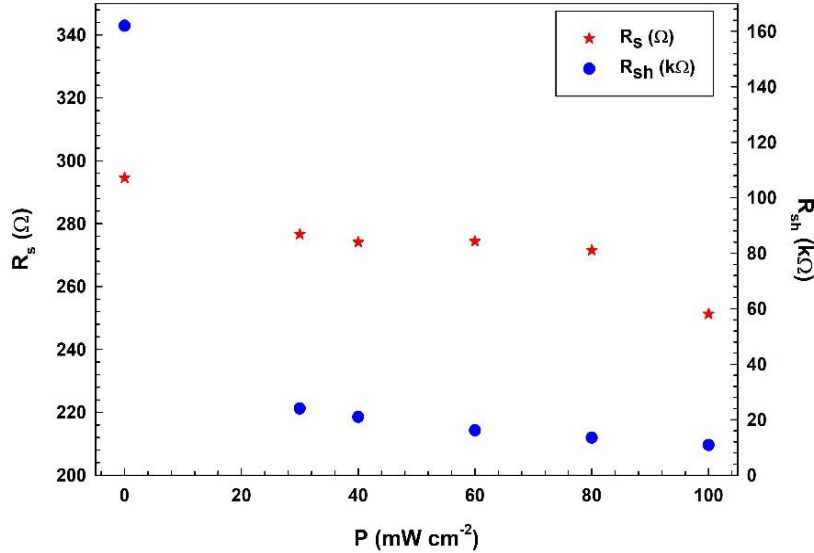
Fabrikasyonu gerçekleştirilen aygıtın çeşitli aydınlanma şiddetine bağlı yarı logaritmik I-V grafiği Şekil 7 (a)'da gösterilmiştir. Şekil 7 (b)'de ise aygıtın  $100 \text{ mW cm}^{-2}$ 'deki linner I-V grafiği verilmiştir. Şekil 7 (a)'da görüldüğü gibi özellikle ters beslemde akım aydınlanma şiddetine bağlı olarak artıyor. Çünkü böyle ışığa maruz kalan bir yapıda ters beslemde akımın artması, yarıiletkendeki taşıyıcıların ışığa maruz kaldıklarında valans bandından iletim bandına geçmesiyle gerçekleşir. Sonucunda da ters beslem akımı artar. Çeşitli aydınlanma şiddetleri altında aygıt için TE teorisi (Eşitlik 1.-4.) ve Ohm yasası kullanılarak elde edilen temel elektriksel parametreler Tablo 3'de verilmiştir. Tablodan da görülüyor ki, ışık şiddetine bağlı olarak idealite faktörü artarken engel yüksekliği azalıyor. Ayrıca hem  $R_s$  hem de  $R_{sh}$  değerinin aydınlatma şiddetine bağlı değişimi Şekil 8'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi aydınlatma şiddetinin atmasıyla beraber aygıtın hem  $R_s$ 'nin hem de  $R_{sh}$ 'in değişiklik olmaktadır.



Şekil 6. Çeşitli sıcaklıklarda Al/TiO<sub>2</sub>/p-Si SD için elde edilen  $N_{ss} - (E_{ss} - E_v)$  grafiği



Şekil 7. Al/TiO<sub>2</sub>/p-Si SD'nin (a) çeşitli aydınlatma şiddeti altında yarı-logaritmik I-V grafiği (b) 100 mW cm<sup>-2</sup>'deki lineer I-V grafiği



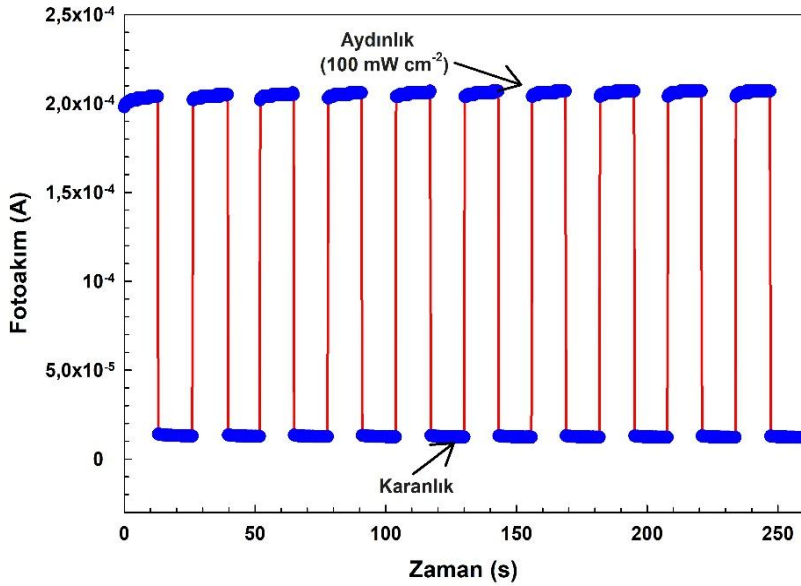
Şekil 8. R<sub>s</sub> ve R<sub>sh</sub> değerinin farklı aydınlatma yoğunluğuna göre değişimi

Tablo 3. Çeşitli aydınlatma şiddetlerinde Al/TiO<sub>2</sub>/p-Si SD için elde edilen n, I<sub>0</sub>, Φ<sub>B0</sub>, R<sub>s</sub> ve R<sub>sh</sub> değerleri

P (mW/cm <sup>2</sup> )	n	I <sub>0</sub> (A)	Φ <sub>B0</sub> (eV)	R <sub>s</sub> (Ω)	R <sub>sh</sub> (kΩ)
0	2,238	3,39x10 <sup>-7</sup>	0,645	294,55	161,96
30	2,548	7,54x10 <sup>-7</sup>	0,624	276,66	24,01
40	2,584	8,73x10 <sup>-7</sup>	0,620	274,12	21,01
60	2,739	1,19x10 <sup>-6</sup>	0,612	274,34	16,13
80	2,826	1,72x10 <sup>-6</sup>	0,603	271,54	13,52
100	2,868	5,28x10 <sup>-6</sup>	0,574	251,29	10,87

Aygıtın elektron-hol rekombinasyonunu incelemek için -2 V'ta fotoakım-zaman grafiği çizilmiş ve Şekil 9'da verilmiştir. Ölçüm anahtar açık (100 mW cm<sup>-2</sup>) ve anahtar kapalı konumda yapılmıştır. Anahtar açık konuma getirildiğinde artan serbest yük taşıyıcılarından dolayı akım aniden artıyor ve maksimum değerine ulaşıyor [39–42]. Anahtar kapatıldığı zaman yük taşıyıcılarının tuzaklanması sonucu akım aniden minimum değerine ulaşıyor ve anahtar açık konuma

getirene kadar sabit kalıyor [39–42]. Aydınlanma yoğunluğuna yanıt, yükselme süresi ve düşme süresi değerlendirilerek elde edildi. Hem yükselme hem de düşüşteki gerçek tepki sürelerinin yaklaşık 0,26 saniyeden az olduğu bulundu. İki bitişik veri noktası arasında ölçülen zaman aralığı, ekipmanın zamansal çözünürlüğü ile sınırlıdır. Hızlı yanıt, elektron-hol çiftlerinin yüksek verimli bir üretimini ve ayrılmasını ortaya çıkarır.



Şekil 9. Al/TiO<sub>2</sub>/p-Si SD'un -2 V' da 100 mW cm<sup>-2</sup> aydınlatma şiddeti altında fotoakım-zaman grafiği

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak elde edilen Al/TiO<sub>2</sub>/p-Si SD'nin elektriksel özellikleri hem sıcaklık hem de aydınlanma şiddetine bağlı olarak incelendi.  $n$ ,  $I_0$ ,  $\Phi_{B0}$  ve  $R_s$  gibi temel diyot parametreleri hem aydınlanma hem de sıcaklığa bağlı olarak hesaplandı. Sıcaklığa ve aydınlanma şiddetine bağlı sonuçlar gösterdi ki idealite faktörü,  $n$  aydınlanma şiddeti arttıkça artarken sıcaklık arttıkça azalıyor.  $\Phi_{B0}$  aydınlanma şiddeti arttıkça artarken sıcaklık arttıkça azalıyor ve  $R_s$  ise hem aydınlatma şiddeti hem de sıcaklık arttıkça azalıyor. Sıcaklığa bağlı arayüzey durumları incelendi ve  $N_{ss}$  değerinin  $10^{14}$  eV<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup> sınırında olduğu gözlemlendi.  $N_{ss}$ 'in böyle yüksek çıkması oksit tabaka, kirlilikler ve tüketim bölgesi kalınlığına atfedildi. Ayrıca fabrike edilen diyotun aydınlanma şiddetine bağlı ışığa tepkimesi incelendi.

#### KAYNAKLAR

- [1] Çiçek O, Tecimer HU, Tan SO, Tecimer H, Altındal Ş, Uslu I. Evaluation of electrical and photovoltaic behaviours as comparative of Au/n-GaAs (MS) diodes with and without pure and graphene (Gr)-doped polyvinyl alcohol (PVA) interfacial layer under dark and illuminated conditions. *Composites Part B: Engineering*. 2016;98:260–8.
- [2] Uslu H, Altındal Ş, Tunc T, Uslu İ, Mammadov TS. The Illumination Intensity and Applied Bias Voltage on Dielectric Properties of Au/Polyvinyl Alcohol (Co, Zn-Doped)/n-Si Schottky Barrier Diodes. *Journal of Applied Polymer Science*. 2011;120:322–8.
- [3] 3. Soylu M, Yakuphanoglu F. Photovoltaic and interface state density properties of the Au/n-GaAs Schottky barrier solar cell. *Thin Solid Films*. 2011;519(6):1950–4.
- [4] Zhang SX, Kundaliya DC, Yu W, Dhar S, Young SY, Salamanca-Riba LG, et al. Niobium doped TiO<sub>2</sub>: Intrinsic transparent metallic anatase versus highly resistive rutile phase. *Journal of Applied Physics*. 2007;102(1):1–5.
- [5] Leng YX, Huang N, Yang P, Chen JY, Sun H, Wang J, et al. Influence of oxygen pressure on the properties and biocompatibility of titanium oxide fabricated by metal plasma ion implantation and deposition. *Thin Solid Films*. 2002;420–421:408–13.
- [6] Truong L, Fedorenko YG, Afanaşev V V., Stesmans A. Admittance spectroscopy of traps at the interfaces of (1 0 0) Si with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, and HfO<sub>2</sub>. *Microelectronics Reliability*. 2005;45(5–6):823–6.
- [7] Guo HY, Ye ZG. Electric characterization of HfO<sub>2</sub> thin films prepared by chemical solution deposition. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*. 2005;120(1–3):68–71.
- [8] Coey JMD. D<sup>0</sup> Ferromagnetism. *Solid State Sciences*. 2005;7(6):660–7.
- [9] Altuntas H, Bengi A, Aydemir U, Asar T, Cetin SS, Kars I, et al. Electrical characterization of current conduction in Au/TiO<sub>2</sub>/n-Si at wide temperature range. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2009;12(6):224–32.
- [10] Mathews NR, Morales ER, Cortés-Jacome MA, Toledo Antonio JA. TiO<sub>2</sub> thin films - Influence of annealing temperature on structural, optical and photocatalytic properties. *Solar Energy*. 2009;83(9):1499–508.
- [11] Li W, Ni C, Lin H, Huang CP, Shah SI. Size dependence of thermal stability of TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Journal of Applied Physics*. 2004;96(11):6663–8.
- [12] Zeyrek S, Altındal Ş, Yüzer H, Bülbül MM. Current transport mechanism in Al/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/p-Si (MIS) Schottky barrier diodes at low temperatures. *Applied Surface Science*. 2006;252(8):2999–3010.
- [13] Tataroğlu A, Altındal Ş. Characterization of current-voltage (I-V) and capacitance-voltage-

- frequency (C–V–f) features of Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) Schottky diodes. *Microelectronic Engineering*. 2006;83(3):582–8.
- [14] Karabulut A, Orak İ, Türüt A. The photovoltaic impact of atomic layer deposited TiO<sub>2</sub> interfacial layer on Si-based photodiodes. *Solid-State Electronics*. 2018;144:39–48.
- [15] Bengi A, Aydemir U, Altındal Ş, Özen Y, Özçelik S. A comparative study on the electrical characteristics of Au/n-Si structures with anatase and rutile phase TiO<sub>2</sub> interfacial insulator layer. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010;505(2):628–33.
- [16] Orak İ, Karabulut A. Frequency and voltage dependence of electrical conductivity, complex electric modulus, and dielectric properties of Al/Alq<sub>3</sub>/p-Si structure. *Turkish Journal of Physics*. 2020;44(1):85–94.
- [17] Lee BH, Jeon Y, Zawadzki K, Qi W-J, Lee J. Effects of interfacial layer growth on the electrical characteristics of thin titanium oxide films on silicon. *Applied Physics Letters*. 1999;74(21):3143–5.
- [18] Kaya A, Sevgili, Altındal, Öztürk MK. Current-conduction mechanism in Au/n-4H-SiC Schottky barrier diodes. *Indian Journal of Pure and Applied Physics*. 2015;53(1):56–65.
- [19] Özdemir MC, Sevgili Ö, Orak İ, Turut A. Determining the potential barrier presented by the interfacial layer from the temperature induced I–V characteristics in Al/p-Si Structure with native oxide layer. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2021;125:105629.
- [20] Sze SM. *Physics of Semiconductor Devices*. 2nd ed. New York: Wiley; 1981. 362–380.
- [21] Karabulut A. Barrier height modification in Au/Ti/n-GaAs devices with a HfO<sub>2</sub> interfacial layer formed by atomic layer deposition. *Bulletin of Materials Science*. 2019;42(1):1–11.
- [22] Farooq WA, Elgazzar E, Dere A, Dayan O, Serbetci Z, Karabulut A, et al. Photoelectrical characteristics of novel Ru(II) complexes based photodiode. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2019;30(6):5516–25.
- [23] Çiçek O, Altındal Ş, Azizian-Kalandaragh Y. A Highly Sensitive Temperature Sensor Based on Au/Graphene-PVP/n-Si Type Schottky Diodes and the Possible Conduction Mechanisms in the Wide Range Temperatures. *IEEE Sensors Journal*. 2020;20(23):14081–9.
- [24] Karabulut A, Sarılmaz A, Özel F, Orak İ, Şahinkaya MA. A novel device fabricated with Cu<sub>2</sub>NiSnS<sub>4</sub> chalcogenide: Morphological and temperature-dependent electrical characterizations. *Current Applied Physics*. 2020;20(1):58–64.
- [25] Karabulut A, Orak İ, Türüt A. Electrical characteristics of Au/Ti/HfO<sub>2</sub>/n-GaAs metal-insulator-semiconductor structures with high-k interfacial layer. *International Journal of Chemistry and Technology*. 2018;2(2):116–22.
- [26] Orak İ. The performances photodiode and diode of ZnO thin film by atomic layer deposition technique. *Solid State Communications*. 2016;247:17–22.
- [27] Bakkaloğlu ÖF, Ejderha K, Efeoğlu H, Karataş Ş, Türüt A. Temperature dependence of electrical parameters of the Cu/n-Si metal semiconductor Schottky structures. *Journal of Molecular Structure*. 2021;1224:129057.
- [28] Kınacı B, Şebnem Çetin S, Bengi A, Özçelik S. The temperature dependent analysis of Au/TiO<sub>2</sub> (rutile)/n-Si (MIS) SBDs using current–voltage–temperature (I–V–T) characteristics. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2012;15(5):531–5.
- [29] Pakma O, Serin N, Serin T, Altındal Ş. The double Gaussian distribution of barrier heights in Al/TiO<sub>2</sub>/p-Si (metal-insulator-semiconductor) structures at low temperatures. *Journal of Applied Physics*. 2008;104(1):014501.
- [30] Erdal MO, Kocuyigit A, Yıldırım M. Temperature dependent current-voltage characteristics of Al/TiO<sub>2</sub>/n-Si and Al/Cu:TiO<sub>2</sub>/n-Si devices. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2019;103:104620.
- [31] Kumar A, Sharma KK, Chand S, Kumar A. Investigation of barrier inhomogeneities in I-V and C-V characteristics of Ni/n-TiO<sub>2</sub>/p-Si/Al heterostructure in wide temperature range. *Superlattices and Microstructures*. 2018;122:304–15.
- [32] Card HC, Rhoderick EH. Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1971;4:1589–601.
- [33] Gencer Imer A, Korkut A, Farooq WA, Dere A, Atif M, Hanif A, et al. Interface controlling study of silicon based Schottky diode by organic layer. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2019;30(21):19239–46.
- [34] Sevgili Ö. On the examination of temperature-dependent possible current-conduction mechanisms of Au/(nanocarbon-PVP)/n-Si Schottky barrier diodes in wide range of voltage. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2021;32, 10112–22.
- [35] Demirezen S, Altındal Yerişkin S. A detailed comparative study on electrical and photovoltaic characteristics of Al/p-Si photodiodes with coumarin-doped PVA interfacial layer: the effect of doping concentration. *Polymer Bulletin*. 2020;77(1):49–71.
- [36] Rajagopal Reddy V, Choi C-J. Microstructural, chemical and electrical characteristics of Au/magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)/n-GaN MIS junction with a magnetite interlayer. *Vacuum*. 2019;164:233–41.
- [37] Boughdachi S, Azizian-Kalandaragh Y, Badali Y, Altındal Ş. Facile ultrasound-assisted and microwave-assisted methods for preparation of Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>-PVA nanostructures: exploring their pertinent structural and optical properties and comparative studies on the electrical, properties of Au/(Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>-PVA)/n-Si Schottky struct. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2017;28(23):17948–60.



- [38] Reddy VR. Electrical properties of Au/polyvinylidene fluoride/n-InP Schottky diode with polymer interlayer. *Thin Solid Films*. 2014;556:300–6.
- [39] Bube RH. *Photoconductivity of Solids*. New York: Wiley; 1960.
- [40] Yakuphanoglu F, Şenkal BF. A hybrid p-Si/poly(1,4-diaminoanthraquinone) photoconductive diode for optical sensor applications. *Synthetic Metals*. 2009;159(3):311–4.
- [41] Yakuphanoglu F. Transparent metal oxide films based sensors for solar tracking applications. *Composites Part B: Engineering*. 2016;92:151–9.
- [42] Gupta RK, Yakuphanoglu F. Photoconductive Schottky diode based on Al/p-Si/SnS<sub>2</sub>/Ag for optical sensor applications. *Solar Energy*. 2012;86(5):1539–45.