



## Determination of Electrical and Optical Parameters of Schottky Diode with Metal Complex Interlayer

Fatma Zehra Bayat<sup>1,a</sup>, Hülya Doğan<sup>1,b\*</sup>, Mustafa Şeker<sup>1,c</sup>

<sup>1</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye

\*Corresponding author

### Research Article

#### History

Received: 27/04/2024

Accepted: 14/05/2024

### ABSTRACT

In this article, Ruthenium(II) metal complex was deposited as an intermediate layer on p-type silicon (Si) using the spin coater method. Seventeen (17) Al/Ru(II)complex/p-Si/Al dots were produced under the same conditions, and their current–voltage (I–V) characteristics were taken at room temperature, both in the dark and under 100mW/cm<sup>2</sup> illumination. It was observed that all diodes exhibited rectifying behavior. The ideality factor (n), barrier height (Φ<sub>b</sub>), rectification ratio (RR) and series resistance (R<sub>s</sub>) of each point were determined according to thermionic emission (TE) theory and modified Norde function. In the dark, n and Φ<sub>b</sub> values were found to be in the range of 1.238-2.932 and 0.643-0.874 eV, respectively, for 17 diodes. In addition, the photovoltaic and photodiode properties of one of the Al/Ru(II) complex/p-Si/Al diodes (coded R12) at room temperature were evaluated under different light intensities applied in the dark and at a light intensity of 100 mW/cm<sup>2</sup>, and for electrical characterization, capacitance-voltage (C-V) was measured in the dark environment. Φ<sub>b</sub>, diffusion potential (V<sub>d</sub>) and carrier concentration (N<sub>a</sub>) were calculated from measurements. From the photovoltaic parameters, open circuit voltage (V<sub>oc</sub>), short circuit current (I<sub>sc</sub>), filling factor (FF) and experimental efficiency (η) were calculated for the R12 dot diode and 339x10<sup>-3</sup> V and 13.1x10<sup>-6</sup> A, 62.9% and 0.514%, respectively. It was found to be photosensitivity (R) and specific detectivity (D\*) values were also calculated from the photodiode parameters, and from these experimental findings, it can be said that Ru(II) metal complex thin film-based structures can be used in the development of optoelectronic devices.

**Keywords:** Schottky Diode, Metal Complex, Photovoltaic, Photodiode

## Metal Kompleks Ara Katmanlı Schottky Diyotun Elektriksel ve Optik Parametrelerin Belirlenmesi

### ÖZ

Bu çalışmada Rutenyum(II) metal kompleks p tipi silisyum (Si) üzerine spin kaplayıcı (spin coater) yöntemi ile ara katman olarak biriktirilmiştir. On yedi (17) adet Al/Ru(II)kompleks/p-Si/Al diyot aynı şartlar altında üretilmiş ve bunların akım-voltaj (I–V) özellikleri oda sıcaklığında, hem karanlıkta hem de 100mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma altında alınmıştır. Tüm diyotların doğrultucu davranış sergilediği görülmüştür. Her noktanın idealite faktörü (n), bariyer yüksekliği (Φ<sub>b</sub>), doğrultma oranı (RR) ve seri direnci (R<sub>s</sub>), termiyonik emisyon (TE) teorisi ve modifiye edilmiş Norde fonksiyonuna göre belirlenmiştir. Karanlıkta, n ve Φ<sub>b</sub> değerleri 17 diyot için sırasıyla 1,238- 2,932 ve 0,643- 0,874 eV aralığında bulunmuştur. Ayrıca Al/Ru(II)kompleks/p-Si/Al diyotlarından birisinin (R12 kodlu) oda sıcaklığındaki fotovoltajik ve fotodiyot özelliklerine karanlıkta ve 100 mW/cm<sup>2</sup> ışık yoğunluğunda uygulanan farklı ışık şiddetleri altında ve elektriksel karakterizasyon için karanlık ortamda kapasitans-gerilim (C-V) ölçümlerinden Φ<sub>b</sub>, difüzyon potansiyeli (V<sub>d</sub>) ve taşıyıcı konsantrasyonu (N<sub>a</sub>) hesaplanmıştır. Fotovoltajik parametrelerden açık devre voltajı (V<sub>oc</sub>), kısa devre akımı (I<sub>sc</sub>), dolun faktörü (FF) ve deneysel verimlilik (η) hesaplanmış ve R12 kodlu diyotun bu parametreleri sırasıyla 339x10<sup>-3</sup> V ve 13,1x10<sup>-6</sup> A, % 62,9 ve %0,514 olarak bulunmuştur. Fotodiyot parametrelerinden foto duyarlılık (R) ve spesifik detektivite (D\*) değerleri de hesaplanmış ve bu deneysel bulgulardan, Ru(II) metal kompleks ince film tabanlı yapıların optoelektronik cihazların gelişiminde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Schottky Diyot, Metal Kompleks, Fotovoltajik, Fotodiyot

### Copyright



This work is licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International License

<sup>a</sup> 20209233006@cumhuriyet.edu.tr  
<sup>c</sup> mustafaseker@cumhuriyet.edu.tr

<sup>ib</sup> 0000-0002-4349-7403  
<sup>ib</sup> 30000-0002-3793-8786

<sup>b</sup> hdogan@cumhuriyet.edu.tr

<sup>ib</sup> 0000-0002-5501-2194

**How to Cite:** Bayat FZ, Şeker M, Doğan H (2024) Determination of Electrical and Optical Parameters of Schottky Diode with Metal Complex Interlayer, Journal of Engineering Faculty, 2(1): 16-24.

## Giriş

Fotodiyotlar ters polarma yönünde çalışan ışık enerjisini elektrik akımına dönüştüren yarıiletken optoelektronik cihazlardır. Bir fotodiyot, metal-yarıiletken kontak(schottky), p-n eklemi ve p-i-n bileşenlerden oluşabilir. Elektronik ve optoelektronik cihazlar üzerine yapılan çalışmalar daha çok organometalik bileşikler üzerinde durmaktadır.

Metal kompleksler özellikle fotodiyot, fotodedektör ve optik sensörler gibi optoelektronik teknolojinin ilgi alanı konumuna gelmiştir. [1-4]. Işığı absorbe eden molekül foton enerjisini uyarılmış duruma geçerek kısa süreliğine bu enerjiyi kimyasal enerji olarak depolar[1]. Organometalik yapı olan Ru kompleksleri, üstün fotokimyasal ve fotofiziksel özelliklere sahiptir [3]. Bu tür kompleksler özellikle termal kararlılık, fotokataliz, fotokimya ve elektrokimya gibi uygulamalar için benzersizdir[4]. Bu özellikler, rutenyum (II) komplekslerinin çeşitli uygulamalarının (örneğin, yapay fotosentetikler [5], sensörler [6] ve kataliz [7]) geliştirilmesini sağlamıştır. Bu uygulamalardan boyaya duyarlı güneş pilleri (DSC'ler), geleneksel silisyum tabanlı fotovoltaiik cihazlara alternatif olarak büyük ilgi görmüştür [8,9]. O'Regan ve Gratzel [10] Ru(II) metal kompleksi kullanarak düşük maliyetli, yüksek verimli, boyaya duyarlı bir güneş pili elde ettiler. Ftalosiyanın kompleksleri kullanılarak bir dizi güneş pili ve Schottky diyotu üretilmiştir [11,12]. Dayan ve ark. [13] güneş enerjisi ve optoelektronik uygulamalar için yeni sentezledikleri [Ru(L1)(L2)(NCS)2] kompleksi kullanılarak boyaya duyarlı güneş pili bazlı bir fotodiyot hazırladı. Elde ettikleri optoelektrik sonuçlar, [Ru(L1)(L2)(NCS)2] kompleksine sahip incelenen fotodiyotun optik anahtarlama ve kontrol uygulamaları için optoelektronik cihazlarda kullanılabilir olduğunu gösterdiler[13]. Ocak ve ark. [14] yeni, sentezlenmiş Mn heksaamid (MnHA) organometalik kompleksi ile Schottky diyotlarının oluşma olasılığını göstermiştir. Bu nedenle hem yeni organometalik komplekslerin sentezi hem de bunların cihazların imalatında kullanılması büyük ilgi görmektedir.

Tataroğlu ve ark. [15] damla döküm tekniğini kullanarak Au/Rutenyum(II) kompleksi/n-Si fotodiyotunu hazırladı. Fotodiyotun foto tepki ölçümlerinden sonra foto iletken ve foto kapasitans olarak kendini gösterdiğini bulmuşlardır. M.C Bodur ve ark. [40] spin kaplama yöntemi ile büyütülen Au/Karmin/n-Si/Ag diyotunun farklı ışık yoğunlukları altında fotovoltaiik ve fotodiyot karakteristiklerini belirlemiş ve bu diyotun  $7,45 \times 10^{31}$  lük yüksek bir Açık/Kapalı akım ( $I_{on}/I_{off}$ ) oranına sahip olduğunu belirlemişlerdir.

Yapılan çalışmalar, inorganik bir yarıiletkenin bariyer yüksekliğinin, organik ince bir tabaka kullanılarak arttırılabileceğini veya azaltılabileceğini göstermiştir [16-19]. İnce organik ara yüzey katmanına sahip metal-yarıiletken (MS) cihazların elektriksel ve fotoelektrik özellikleri güneş hücreleri, fotodiyotlar ve Schottky diyotlar için incelenmiştir [20-23]. Güllü ve ark. bir Al/p-Si kontağından (0,50 eV) daha yüksek bir bariyer

yüksekliğine (0,77 eV) sahip bir Al/Orange G/p-Si cihazı üretti [24]. Temirci ve Çakar Cu/rodamin101/p-Si/Al diyot için bariyer yüksekliğini 0,78 eV ve idealite faktörünü 1,54 bulmuşlardır [25]. Bu bariyer yüksekliği ara katmansız Cu/p-Si kontağından daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Özaydın ve ark. [26] spin kaplama yoluyla n-Si levhalar üzerinde ince bir Cu(II) kompleksi tabakası oluşturarak bir Au/Cu(II) kompleksi/n-Si yapısı oluşturdular. Onlar [26] Au/Cu(II) kompleksi/n-Si Schottky diyotun elektriksel parametrelerini ileri yönlü akım-gerilim (I-V) ölçümlerini kullanarak araştırdılar ve parametreleri bir Au/n-Si diyotunkilerle karşı daha yüksek bulmuşlardır.

Bu çalışmada bir Ru(II) metal kompleks yapısı p-Si alttaşı üzerine spin kaplama yöntemi 3000 rpm ile ince film olarak büyütülerek 17 adet Al/Ru(II)/p-Si/Al yapısı elde edilmiştir. Yapının hem elektriksel hem de fotovoltaiik ve bazı fotodiyot karakteristikleri incelendi. Bunun için bu yapının karanlık ve  $100 \text{ mW/cm}^2$  aydınlatma yoğunluğunda Akım-Gerilim (I-V) ölçümleri ve ayrıca karanlıkta bir noktanın Kapasite-Gerilim (C-V) ölçümleri alınmıştır.

## Deneyel Prosedür

Al/Ru(II)/p-Si/Al yapısı, (100) yönelimli,  $525 \mu\text{m}$  kalınlığında ve  $1-10 \Omega \cdot \text{cm}$  aralığında öz dirence sahip p-tipi silisyum yarıiletkeni alttaş olarak kullanılarak üretildi. Kontak yapılmadan önce, p-Si alttaşların yüzeyindeki kirlerinden arındırmak için referansta belirtilen RCA temizleme prosedürü uygulanmıştır[34]. Daha sonra numuneler ve azot ( $\text{N}_2$ ) gazı kullanılarak kurutulmuştur. Ultrasonik bir banyoda kontak metali (Al) aseton, etanol ve deiyonize su ( $18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$  direnç) ile temizlendi. Temizleme sonrasında Al metali, p-Si alttaşlarının mat tarafına  $4 \times 10^{-6}$  Torr basınçta buharlaştırıldı. P-Si alttaşların üzerinde düşük dirençli ohmik kontak sağlamak için  $\text{N}_2$  ortamında  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 3 dakika ısıl işlemine tabi tutuldu. Sigma Aldrich firmasından alınan Rutenyum(II) metalik kompleksi kullanıldı. Ara katman için etanol kullanılarak Ru(II) (0,01 M) çözeltisi hazırlandı. Ru(II) metal kompleks doğrudan, p-Si substratının ön yüzeyine alkol içindeki 5 mL 0,001 M Ru(II) organometalik çözeltisinin dökülmesi ve ardından çözeltinin dakikada 3000 rpm'de, 30 saniye boyunca döndürülmesi ile oluşturuldu. Spin kaplama yönteminden sonra oda sıcaklığında 60 dakika boyunca kurutuldu. Son olarak Al metali, (diyot alanı  $A = 7.85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ ) maske yardımıyla  $4 \times 10^{-6}$  Torr'da buharlaştırılarak elektriksel ölçümler yapıldı. Sonuç olarak, 17 noktalı (üst temas noktaları) (R1,R2...R17 olarak isimlendirilmiş) ve Al/Ru(II)/p-Si/Al diyotları. Ayrıca ışığın diyotların karakteristik parametreleri üzerindeki etkisini belirlemek için Keithley COINC-16S-150-002 Güneş Simülatörü kullanılarak akım-gerilim (I-V) ölçümleri alındı.

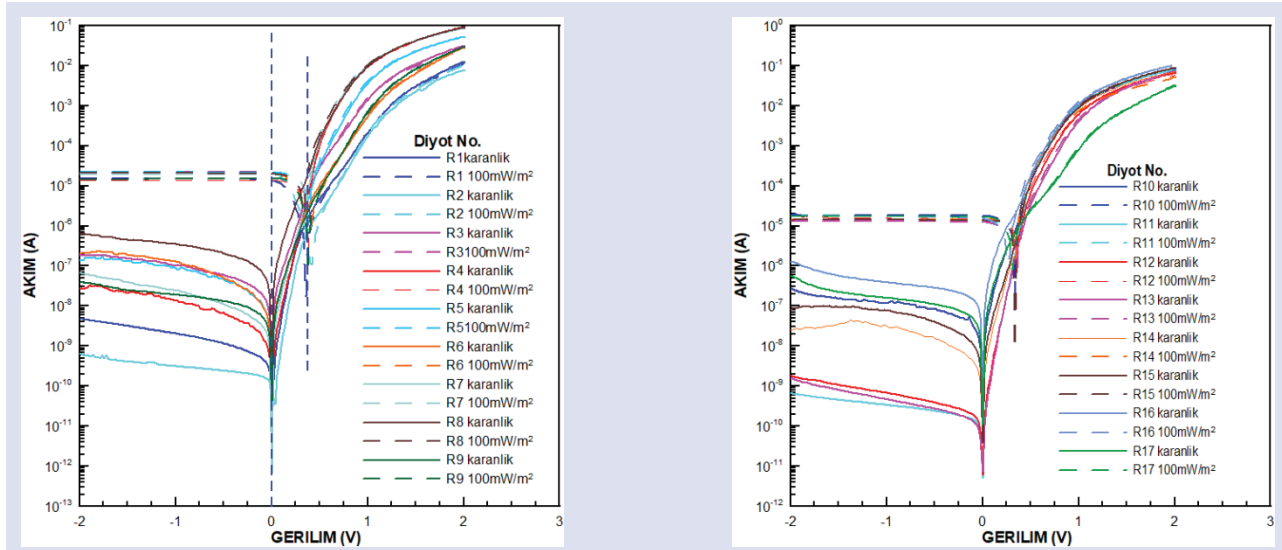
Oda sıcaklığında görünür ışık altında 2400 Kapasite-voltaj (C-V) ölçümleri, HP 4192A (50 Hz - 13 MHz) LF empedans analizörü ile oda sıcaklığında ve karanlıkta alındı.

## Materyal Metot

Aynı p-Si alttaş üzerine 17 adet Al/p-Si/Ru(II)/Al noktası elektriksel performansın yinelenebilirliğini göstermek için oluşturuldu. Şekil 1(a) ve 1(b) karanlık ortamda ve 100mW/cm<sup>2</sup> ışık altında 17 adet Al/p-Si/Ru(II)/Al noktasının I-V grafiklerini göstermektedir. Sonuçlar 17 adet diyot noktasının karanlık ve aydınlatma altında aynı ve lineer olmayan ve asimetric I-V özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle ters beslem bölgesinde ışığa karşı duyarlılık görülmekte ancak doğru beslem bölgesinde ışık altında önemli bir değişiklik olmadığı gözlenmektedir. Bu durum Al/p-Si/Ru(II)/Al yapısının fotodiyot özelliğine sahip olduğunu

göstermektedir. Çizelge 1 de aynı alttaş üzerine oluşturulan 17 noktasının karanlık ortamda doğrultma oranı (RR) verilmiştir. RR diyotun kalitesini gösteren ve doğru beslem akımının ( $I_{forward}$ ) ters beslem akımına ( $I_{reverse}$ ) oranı kullanılarak belirlenir. (Şekil 1) 17 Al/p-Si/Ru(II)/Al noktasının -2 Volt ile +2 Volt arasında doğrultucu özellik göstermiştir. Bu değerler 100mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma altında azaldığı görülmüştür.

Metal-yarıiletken doğrultucu kontaklarda baskın olan akım mekanizması Termioyonic Emisyonudur. Bu akım mekanizmasında ancak yüksek enerjili taşıyıcılar potansiyel engelinin üzerinden geçerek akım iletimini sağlar.



Resim 1. Al/Ru(II)/p-Si/Al yapısının tüm noktalarının I-V grafiği (a) 1'den 9'a (b) 10'dan 17'ye  
Figure 1. I-V plot of all points of the Al/Ru(II)/p-Si/Al structure (a) from 1 to 9 (b) from 10 to 17

Al/Ru(II)/p-Si'nin I-V özelliklerini analiz etmek için termioyonic emisyon (TE) modeli seri direnç ( $R_s$ ) etkisini de dikkate alarak şu şekilde ifade edilebilir [27]:

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

Burada n idealite faktörüdür ve değeri ideal bir diyot için 1'dir.  $V > 3kT/q$  için denklemden parantez içindeki 1 değeri ihmal edilebilir. İfade de k, Boltzmann sabitidir, T, Kelvin cinsinden ortam sıcaklığıdır ve  $I_0$ , doyma akımı değeridir.

Burada,

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{b0}}{kT}\right) \quad (2)$$

Şeklinde verilmiştir. q elektronik yük(=1,6x10<sup>-19</sup> C), V uygulanan voltaj, A diyot alanı(=7,85x10<sup>-3</sup> cm<sup>2</sup>),  $\Phi_{b0}$  sıfır beslem görünür bariyer yüksekliği (BH), A\* p-tipi silisyum etkili Richardson sabiti olup 32 A cm<sup>-2</sup> K<sup>-2</sup> 'dir. Denklem (1) diyotların idealite faktörlerini belirlemek için kullanılır. Denklem (1) kullanarak aşağıdaki ifadeyi elde edebiliriz.

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

Bu ifadede  $dV/d(\ln I)$  teriminin değeri,  $\ln I$ -V grafiğinin doğru beslem tarafındaki doğrusal kısmın eğiminden elde edilir (Şekil 1(a)(b)). Denklem (2) yeniden düzenlenirse bariyer yüksekliği için aşağıdaki ifade elde edilir:

$$q\Phi_{b0} = kT \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (4)$$

Çizelge 1'de hesaplanan, n ve  $\Phi_b$  değerleri verilmektedir. Her ne kadar 17 adet Al/Ru(II)/p-Si/Al diyotu aynı alttaş üzerinde aynı şartlarda oluşturulmuş olsa da n ve  $\Phi_b$  değerleri karanlıkta sırasıyla 1,238 ila 2,932 ve 0,643 ila 0,874 eV ve 100mW/cm<sup>2</sup> ışık altında ise 3,378 ila 5,649 ve 0,493 ila 0,616 eV arasında değişmektedir. Noktalar karanlıkta 10<sup>-8</sup>-10<sup>-10</sup> A'lık düşük doyma akıma sahiptir. 17 nokta için n değeri karanlıkta ışık altındaki ölçümlere göre daha düşüktür ve ayrıca  $\Phi_b$  değeri de karanlıkta daha yüksektir.

Çizelge 1 dikkate alındığında ortalama n/( $\Phi_b$ ) değeri 1,950/(0,755 eV) karanlık ortamda ve 4,050/(0,542 eV) ise 100mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma altında hesaplanmıştır. Karanlık ortamda diyot düşük idealite faktörü ve yüksek engel yüksekliği değerinden dolayı daha ideal diyot davranışı sergilemiştir. Çizelge 1'de verilen diyotlardan R12 kodlu diyotun karanlık ve ışık altındaki elektriksel karakterizasyonu ayrıntılı olarak incelendi ayrıca bu diyotun fotodiyot ve fotovoltaik karakteristikleri de incelendi.

İdealite faktörünün birden yüksek olmasının nedenlerinden birisi de seri direnç etkisidir. Yüksek gerilimlerde ileri yönlü akım-gerilim eğrilerinin bükülmesi seri direnç etkisinden

kaynaklanmaktadır. Seri direnç hesaplamalarında kullanılan Norde yöntemi, metal ile yarıiletken arasındaki temasın ideal olduğunu varsaydığından ideal olmayan ( $n>1$ ) durumlarda kontak parametrelerini bulmak için uygun değildir. Bu nedenle Bohlin [28] ideal olmayan durumlar için bu yöntemi değiştirmiştir. Bohlin'in genelleştirilmiş yöntemi, sabit sıcaklıkta alınan tek bir I-V ölçümünden  $\Phi_b$  ve  $R_s$  değerlerinin hesaplanmasını mümkün kılar. Bu method; değiştirilmiş Norde fonksiyonunu şu şekilde tanımlar;

$$F(V; \alpha) = \frac{V}{\alpha} - \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (5)$$

Burada  $\alpha$  idealite faktörü n'den daha büyük keyfi bir sabittir. Şekil 2, R12 noktasının  $F(V)$ -V grafiğini göstermektedir. Norde

fonksiyonu kullanılarak bariyer yüksekliği ( $\Phi_b$ ) ve seri direnç ( $R_s$ ) sırasıyla denklem 6 ve 7'de verilmiştir.

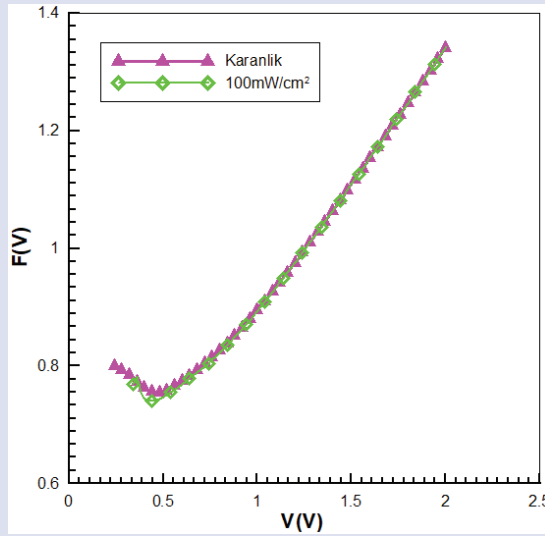
$$\Phi_b = F_{min}(V, \alpha) + \left( \frac{\alpha-n}{n} \right) \left( \frac{V_{min}}{\alpha} - \frac{kT}{q} \right) \quad (6)$$

$$R_s = \frac{kT(\alpha-n)}{qI_{min}} \quad (7)$$

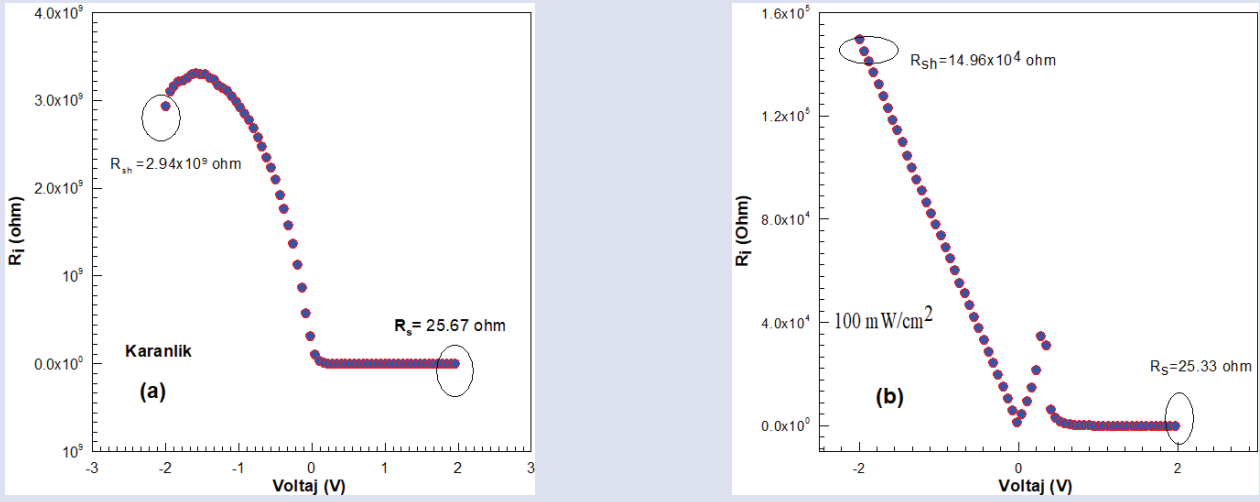
Çizelge 1'de 17 noktanın karanlık ve 100mW/cm<sup>2</sup> ışık altında Norde fonksiyonu ile hesaplanmış  $R_s$  ve  $\Phi_b$  değerleri verilmektedir. Norde fonksiyonu ile elde edilen engel yüksekliği değerlerinin Termoiyonik Emisyon ile elde edilenler ile uyumlu olduğu görülmektedir. Ortalama  $\Phi_b$  değerlerinin karanlık ve ışık altında sırasıyla 0,769 eV ve 0,554 eV olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 1. 17 adet Al/Ru(II)/p-Si/Al noktası için TE teorisi ve Norde fonksiyonları kullanılarak hesaplanan karakteristik parametreler  
Table 1. Characteristic parameters calculated using TE theory and Norde functions for 17 Al/Ru(II)/p-Si/Al dots

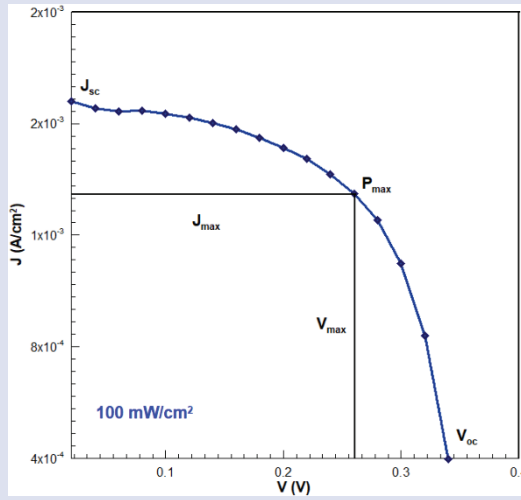
Diyot No	Termoiyonik Emisyon					Norde Fonksiyonu			
	Karanlık		100mW/cm <sup>2</sup>			Karanlık		100mW/cm <sup>2</sup>	
	RR(x10 <sup>4</sup> ) (±2V)	n	$\Phi_b$ (eV)	n	$\Phi_b$ (eV)	$\Phi_b$ (eV)	$R_s$ (kΩ)	$\Phi_b$ (eV)	$R_s$ (kΩ)
R1	262,98	1,364	0,826	4,926	0,601	0,834	54,12	0,612	21,76
R2	1170,02	1,238	0,874	4,032	0,616	0,880	97,26	0,623	24,71
R3	16,27	2,164	0,728	4,784	0,550	0,740	213,63	0,571	325,2
R4	340,90	1,590	0,789	3,816	0,506	0,797	0,199	0,525	0,371
R5	37,94	2,192	0,745	3,861	0,542	0,749	68,76	0,556	0,226
R6	14,29	2,032	0,744	4,131	0,580	0,756	823,76	0,589	9,885
R7	124,52	1,727	0,722	3,378	0,493	0,781	0,532	0,512	0,213
R8	13,82	2,380	0,679	4,255	0,503	0,702	52,76	0,527	0,316
R9	76,48	2,583	0,731	4,184	0,586	0,743	24,75	0,590	7,192
R10	5,70	2,532	0,684	5,649	0,560	0,699	24,78	0,572	1,493
R11	29,49	2,325	0,697	3,571	0,526	0,705	28,72	0,529	0,156
R12	11432,06	1,401	0,830	3,731	0,514	0,838	0,264	0,523	0,099
R13	3519,75	1,473	0,823	3,703	0,530	0,834	0,407	0,548	0,204
R14	4455,54	1,455	0,822	3,690	0,544	0,833	1,739	0,547	0,439
R15	282,41	1,792	0,763	3,891	0,516	0,775	0,111	0,520	0,057
R16	108,20	1,976	0,741	3,875	0,512	0,749	0,611	0,522	0,576
R17	7,75	2,932	0,643	3,389	0,541	0,664	1,157	0,552	0,371



Resim 2. R12 diyotunun karanlıkta ve 100mW/cm<sup>2</sup> altında  $F(V)$ -V grafiği  
Figure 2.  $F(V)$ -V graph of R12 diode in the dark and under 100mW/cm<sup>2</sup>



Resim 3. R12 diyotunun karanlıkta ve 100mW/cm<sup>2</sup> altında F(V)-V grafiği  
 Figure 3. F(V)-V graph of R12 diode in the dark and under 100mW/cm<sup>2</sup>



Resim 4. R12 Diyotunun 100mW/cm<sup>2</sup> ışık yoğunluğunda J-V eğrisi.  
 Figure 4. J-V curve of Diode R12 at 100mW/cm<sup>2</sup> light intensity.

Ayrıca Al/Ru(II)/p-Si fotodiyotunun bir noktası olan R12'nin eklem direnci ( $R_i$ ) hesaplanmıştır. Şönt direnci ( $R_{sh}$ ) ve seri direnç ( $R_s$ ) diyotun akım-gerilim karakteristiğini etkiler [29]. İdeal bir fotodiyot için şönt direncinin büyük, seri direncinin ise küçük olması gerekmektedir [30]. Fotodiyotun eklem direnci  $R_i$  ( $R_i = dV/dI$ ) Şekil 3 (a) ve (b)'de görüldüğü gibi karanlık ve 100 mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma koşulları için  $R_i$ -V grafiklerinden  $R_s$  ve  $R_{sh}$  değerleri elde edilmiştir. Şekil 3 (a) ve (b)'den görülebileceği gibi  $R_s$  ve  $R_{sh}$  arasında çok büyük bir fark vardır. Bu durum potansiyel uygulamalar için bu diyotun uygun olduğunu göstermektedir. Ayrıca aydınlatma altında  $R_s$  ve  $R_{sh}$  değerlerinin her ikisi de karanlıktaki değerlere göre daha düşük olduğu görülmektedir.

Al/Ru(II)/p-Si yapısının açık devre voltajı, kısa devre akımı, dolun faktörü ve güç dönüşüm verimliliği ( $\eta_p$ ) gibi fotovoltaik parametreleri hesaplandı. Aydınlatma altındaki diyotun karakteristiğine göre, eğrinin gerilim eksenindeki kesişme değerine açık devre gerilimi  $V_{oc}$  adı verilir ve akım sıfır olduğunda belirlenir. Kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ), aydınlatma altında çıkış akımıdır ve uygulanan gerilim ile direnç değerlerinin ( $R_s$  ve  $R_{sh}$ ) sıfır olduğu andaki akımdır. Bu akım gelen foton sayısı ile orantılıdır. Açık

devre gerilimi ve kısa devre akımı sırasıyla en yüksek gerilim ve akım değerleridir. Şekil 4. R12 diyotunun 100mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma altında akım yoğunluğun ( $J=I/A$ ), gerilime (V) göre grafiğini vermektedir. Bu grafikte maksimum güç noktası ( $P_{max}$ ), açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ), kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{sc}$ ) bulunmaktadır. Şekil 4 ve Çizelge 2'den R12 fotodiyotunun  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  ve maksimum güç noktası (MPPT) değerleri sırasıyla  $339 \times 10^{-3}$  V,  $1,31 \times 10^{-2}$  mA ve  $2,76$  mW/cm<sup>2</sup> olarak hesaplandı.

Diğer fotovoltaik parametreler doldurma faktörü (FF) ve güç dönüşüm verimliliği ( $\eta$ ). FF ve  $\eta$  Şekil 4'de verilen J-V ölçümlerinden hesaplanabilir. FF şu şekilde yazılabilir [31]:

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (8)$$

Güç dönüşüm verimliliği  $\eta$  ise diyotun, ışık altında üretebileceği maksimum elektrik gücünün ışık gücüne oranıdır [32]:

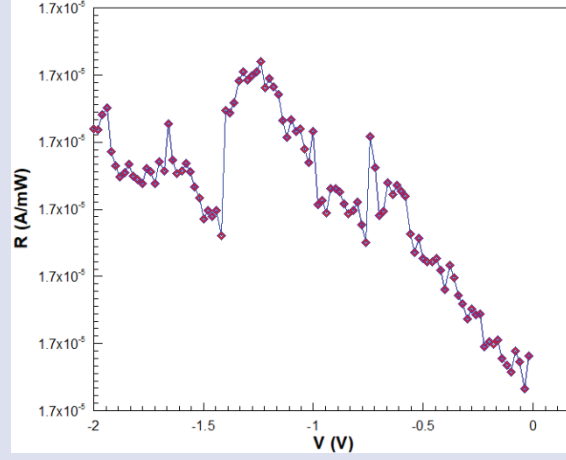
$$\eta = P_m / P_0 = \frac{I_m V_m}{P_0} \quad (9)$$

Burada  $P_0$  ışık yoğunluğu olup bu çalışmada 100mW/cm<sup>2</sup> olarak kullanılmıştır.

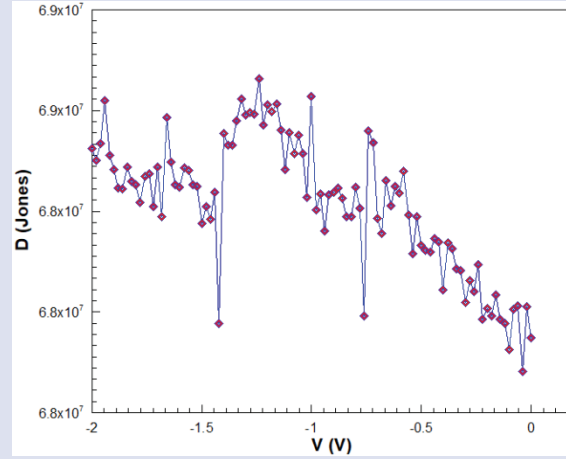
Çizelge 2. R12 diyotunun 100mW/cm<sup>2</sup> ışık altındaki fotovoltajik parametreleri.

Table 2. Photovoltaic parameters of R12 diode under 100mW/cm<sup>2</sup> light.

Diyot No.	V <sub>oc</sub> (10 <sup>-3</sup> )V	I <sub>sc</sub> (10 <sup>-6</sup> ) A	J <sub>max</sub> mA/cm <sup>2</sup>	P <sub>max</sub> mW/cm <sup>2</sup>	FF %	η %
R12	339	13,1	1,351	2,76	62,19	0,514



Resim 5. R12 fotodiyotunun ters beslemde 100 mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma altında R-V grafiği  
Figure 5. R-V graph of photodiode in reverse power under 100 mW/cm<sup>2</sup> illumination



Resim 6. R12 fotodiyotunun ters beslemde 100 mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma altında D\*-V grafiği  
Figure 6. D\*-V graph of R12 photodiode under 100 mW/cm<sup>2</sup> illumination in reverse voltage

Fotodiyotların önemli parametrelerinden bazıları; foto duyarlılık (R) ve spesifik dedektivite (D\*)'dir. İyi bir fotodiyot ve hassas optoelektronik cihazların aydınlatma altında büyük R değerlerine sahip olması gerekir. Foto duyarlılık (R) cihazın giriş-çıkış kazancını gösteren önemli bir parametredir [33] ve

$$R = I_{ph}/P_0.A \quad (10)$$

şeklinde ifade edilir.

Spesifik dedektivite (D\*) ise,

$$D^* = R/(2.q.J_{karanlık})^{1/2} \quad (11)$$

olarak ifade edilir.

Burada I<sub>ph</sub> fotoakım olup Amper cinsinden (I<sub>aydınlık</sub>-I<sub>karanlık</sub>) ifadesinden bulunur. P<sub>0</sub> uyarılan ışığın mW/cm<sup>2</sup> cinsinden alan başına gücüdür ve A ise diyotun ışığa maruz kalan alanıdır. Şekil 5. Ru(II) kompleks ara katmanlı R12

fotodiyotunun 100mW/cm<sup>2</sup> ışık altında ters beslem bölgesindeki foto duyarlılığını vermektedir. Foto duyarlılık ters beslem voltajının artması ile artmakta ve en yüksek değerine 1,24 V değerinde ulaşmış daha sonra bir miktar değişiklikten sonra -2 V gerilimde 1,70 x 10<sup>-5</sup> A/mW değerini almaktadır.

Denklem (11)'de verilen spesifik dedektivite ifadesinin ters beslem gerilimine karşı grafiği Şekil 6'da verilmiştir. Şekilde ters beslem geriliminin artmasıyla spesifik dedektivitenin arttığı ve -2 V'da 100mW/cm<sup>2</sup> ışık altında 1,02x10<sup>11</sup> Jones olduğu belirlenmiştir.

R12 noktasının çeşitli frekanslardaki kapasitans (C-V) grafikleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Düşük frekanslarda arayüzey durumları AC sinyali takip edebilir. Ancak yüksek frekansları takip etmesi imkansızdır (f≥1 MHz). C-V ölçüm yöntemi, bariyer yüksekliğini hesaplamak için kullanılan diğer

bir tekniktir. Ölçümler, frekans değeri arttıkça C değerinin azaldığını göstermektedir [35,36]. Ters beslem voltajı ve frekansı, R12 noktası için ölçülen C değerini etkilediği görülmektedir. Yüksek Rs, arayüzey durumları ve Al ile p-Si arasındaki Ru(II) metal kompleks ara tabakası ile tüketim bölgesindeki derin kusurlar, C değerinin voltaj ve frekans bağımlılıklarına neden olmaktadır [37].

Şekil 8, R12 noktasının ters kapasitans-gerilim ( $C^2$ -V) grafiklerini 500 kHz'de, oda sıcaklığında ve karanlıkta göstermektedir. Bir metal/ yarıiletkeninin uzay yükü bölgesinin kapasitesi, arayüzey ile ilgili ayrıntıları içerir. Yarıiletkendeki taşıyıcı konsantrasyonunun hesaplanması, Fermi enerji seviyesi, difüzyon potansiyeli ve doğrultucu kontaktağının bariyer yüksekliğinin tümü ters beslem kapasite ölçümleri ile yapılabilir [38].

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_d + V)}{A^2 \epsilon_s \epsilon_0 e N_a} \quad (12)$$

$\epsilon_s$  yarıiletken dielektrik sabitini belirtir (Si için,  $\epsilon_s=11,8$ ),  $\epsilon_0$  boşluğun elektriksel geçirgenliğini tanımlar ( $8,85 \times 10^{-14}$  F/cm) ve e elektronik yük ( $1,6 \times 10^{-19}$  C),  $V_0$  difüzyon potansiyelini, k

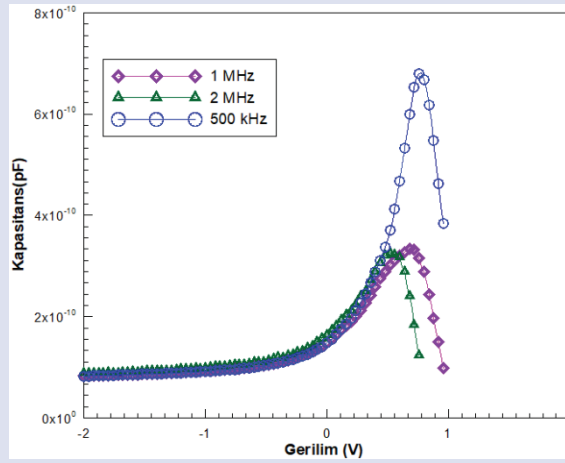
Boltzmann sabitini,  $N_a$  ise iyonize akseptör konsantrasyonunu, T Kelvin (K) cinsinden ortam sıcaklığını tanımlar ve A diyotun etkin alanını belirtir. Şekil 8'deki  $C^2$ -V grafiği lineer bölgenin V eksenine göre ekstrapolasyonu ile belirlenen difüzyon potansiyelini temsil eder. Ayrıca,  $N_a$ 'yi hesaplamak için de bu lineer bölgenin eğimi kullanılır.  $C^2$ -V eğrileri kullanılarak  $\Phi_b$  değerleri Denklem (13) ile belirlenmiştir.

$$\Phi_{bo} = \frac{V_d}{n} + V_p \quad (13)$$

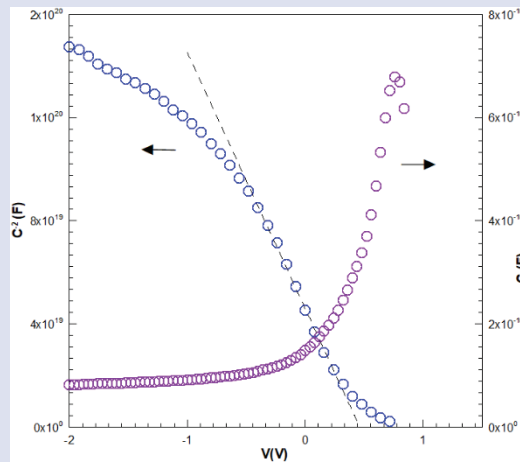
Burada  $V_p$ , değerlik bandının tepesi ile p-tipi Silisyumun nötr kısmının Fermi seviyesi arasındaki farktır ve şu şekilde ifade edilmiştir:

$$V_p = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_v}{N_a} \quad (14)$$

Burada  $N_v$ , silisyumun değerlik bandının etkin durum yoğunluğunu temsil etmek için kullanılır ve değeri  $1,04 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$  olarak kullanılmıştır.



Resim 7. R12 diyotunun oda sıcaklığında farklı frekanslardaki C-V eğrileri.  
Figure 7. C-V curves of R12 diode at different frequencies at room temperature.



Resim 8. R12 noktası için 500 kHz'de C-V ve ters beslem  $C^2$ -V grafiği.  
Figure 8. C-V and reverse bias  $C^2$ -V plot at 500 kHz for point R12.

Çizelge 3. R12 noktası için  $C^2$ -V grafiklerinden hesaplanan  $V_d$ ,  $E_f$ ,  $\Phi_b$  ve  $N_a$  değerleri.

Table 3  $V_d$ ,  $E_f$ ,  $\Phi_b$  and  $N_a$  values calculated from  $C$ - $2$ - $V$  graphs for point R12.

f (kHz)	$V_d$ (eV)	$E_f$ (eV)	$\Phi_b$ (eV)	$N_a$ (cm <sup>-3</sup> )
500	0,465	0,342	0,807	1,538x10 <sup>13</sup>
1000	0,487	0,341	0,828	1,614x10 <sup>13</sup>
2000	0,473	0,337	0,810	1,869x10 <sup>13</sup>

Çizelge 3; 500kHz, 1MHz ve 2MHz frekanslardaki  $C$ - $2$ - $V$  grafiğinden elde edilen parametreleri vermektedir. Bu parametrelerden Fermi enerji seviyesi ( $E_f$ ) artan frekansla azaldığı ve  $N_a$ 'nın ise artan frekansla arttığı görülmektedir. Engel yüksekliği ise en yüksek değerine 1MHz frekans değerinde ulaştığı görülmüştür. R12 için 500 kHz'de  $\Phi_b$  değeri 0,807 eV bulunurken, bu değer 2000 rpm ile döndürülerek kaplanan Al/Ru(II)kompleks/ $p$ -Si için 0,816 eV hesaplanmış[39] ve yine aynı yapı için 500 rpm ile döndürülerek kaplanan Ru(II) kompleks yapısının ara katman olarak kullanıldığı Al/Ru(II)/ $p$ -Si diyotu için ise 0,84 eV olarak hesaplanmıştır[34].

### Sonuç

Bu çalışmada, spin kaplama yöntemi ile Ru(II) metal kompleks ince filmi  $p$ -Si alttaşı üzerine büyütüldü ve Al/(Ru(II) kompleks/ $p$ -Si/Al yapısı elde edildi. 17 adet Al/Ru(II)/ $p$ -Si/Al noktası için ortalama  $n/(\Phi_b)$  değeri 1,950/(0,755 eV) karanlık ortamda ve 4,050/(0,542 eV) ise 100mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma altında hesaplanmıştır. 17 nokta için  $n$  değeri karanlıkta ışık altındaki ölçümlere göre daha düşüktür ve ayrıca  $\Phi_b$  değeri de karanlıkta daha yüksek çıkmıştır. Tüm noktaların Norde fonksiyonuna göre seri direnç değerleri de hesaplanmış ve R12 noktasının seri direnç değeri karanlık ve ışık altında sırasıyla 264  $\Omega$  ve 99  $\Omega$  olarak bulunmuştur. R12'nin eklem direnci ( $R_i$ ) hesaplanmış, karanlık ve 100 mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma için  $R_s$  ve  $R_{sh}$  değerleri elde edilmiştir ve Norde fonksiyonu ile elde edilen seri direncin ohm yasası ile elde edilenden daha büyük çıktığı görülmüştür. Üretilen Al/Ru(II)kompleks/ $p$ -Si diyotun R12 noktası için fotovoltaiik özellikleri 100 mW/cm<sup>2</sup> ışık yoğunlukları için araştırıldı. Açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ), 339x10<sup>-3</sup> V, kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ), 13,1x10<sup>-6</sup> A, doldurma faktörü (FF), %62,19 ve deneysel verimlilik ( $\eta$ ) ise %0,514 olarak bulunmuş ayrıca fotodiyot parametrelerinden olan  $R$  (A/W) ve  $D^*$  (Jones) değerleri -2 V için hesaplanmış ve oluşturduğumuz diyotun optoelektronik ve fotosensör uygulamalarında kullanım için uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

### Kaynaklar

[1] J.K. Nagle, J.S. Bernstein, R.C. Young, T.J. Meyer, Charge-transfer excited states as molecular photodiodes, *Inorg. Chem.* 20 (1981) 1760–1764.  
[2] A.E. Cenicerós-Gomez, A. Ramos-Organillo, J. Hernandez-Diaz, J. Nieto—Martinez, R. Contreras, S.E. Castillo-Blum, NMR study of the coordinating behavior of 2,6-bis(benzimidazol-2-yl)pyridine, *Heteroat. Chem.* 11 (2000) 392–398.  
[3] A. Tataroglu, O. Dayan, N. Ozdemir, Z. Serbetci, A.A. Al-Ghamdi, A. Dere, F. El-Tantawy, F. Yakuphanoglu, Single crystal ruthenium (II) complex dye based photodiode, *Dyes Pigm.* 132 (2016) 64–71.

[4] A.O. Adeloye, P.A. Ajibade, Towards the development of functionalized polypyridine ligands for Ru(II) complexes as photosensitizers in dye-sensitized solar cells (DSSCs), *Molecules* 19 (2014) 12421–12460  
[5]. J.J. Concepcion, J.W. Jurss, M.K. Brennaman, P.G. Hoertz, A.O.T. Patrocinio, N.Y. Murakami Iha, J.L. Templeton, T.J. Meyer, *Acc. Chem. Res.* 42 (2009) 1954–1965.  
[6]. P.D. Beer, J. Cadman, *Coord. Chem. Rev.* 205 (2000) 131–155.  
[7]. R. Argazzi, N.Y. Murakami Iha, H. Zabri, F. Odobel, C.A. Bignozzi, *Coord. Chem. Rev.* 248 (2004) 1299–1316.  
[8]. M. Kapilashrami, Y. Zhang, Y.-S. Liu, A. Hagfeldt, J. Guo, *Chem. Rev.* 114 (2014) 9662–9707.  
[9]. A. Fakharuddin, R. Jose, T.M. Brown, F. Fabregat-Santiago, J. Bisquert, *Energy Environ. Sci.* 7 (2014) 3952–3981.  
[10]. B. O'Regan, M. Gratzel, *Nature* 353 (1991) 737.  
[11]. R.Koeppe, N.S.Sariciftci, P.A.Troshin, R.N.L.Yubovskaya, *Applied Physics Letters* 87 (2005) 244102.  
[12]. F.Yakuphanoglu, *Solar Energy Materials&SolarCells* 91 (2007) 1182.  
[13] Dayan, Osman, et al. "Dye sensitized solar cell-based optoelectronic device using novel [Ru (L1)(L2)(NCS) 2] complex." *Journal of Molecular Structure* 1238 (2021): 130464.  
[14]. Y.S. Ocak, M. A. Ebeoglu, G.Topal, T.Kilicoglu, *Physica B* 405 (2010) 2329-2333.  
[15]. A. Tataroglu, O. Dayan, N. Ozdemir, Z. Serbetci, Ahmed A. Al-Ghamdi, A. Dere, Farid ElTantawy, F. Yakuphanoglu, *Dyes and Pigments* 132 (201) 148.  
[16]. I.H. Campbell, S. Rubin, T.A. Zawodzinski, J.D.Kress, R.L. Martin, D. L. Smith, *Phys. Rev. B* 54 (1996) 14321.  
[17]. Ö. Vural, N.Yıldırım, S.Altındal, A.Türüt, *Synth. Met* 157 (2007) 679.  
[18]. M. Soylu, *Mater. Sci. Semicond. Process.* 14 (2011) 212.  
[19]. Ö. Güllü, Ö. Baris, M. Biber, A.Türüt, *Appl. Surf. Sci.* 254 (2008) 3039.  
[20]. A.B.P. Lever, M.R. Hempstead, C.C. Leznoff, W. Lin, M. Melnik, W. A. Nevin, P. Seymour, *Pure Appl. Chem.* 58 (1986) 1467.  
[21]. J. Simon, J.J. Andre, *Molecular Semiconductors*, Springer, Berlin, 1985.  
[22]. Y. Sadaoka, T.A. Jones, W.Gopel, *Sensors Actuators B* 1 (1990) 148.  
[23]. P.F. Baude, D.A. Ender, M.A. Haase, *Appl. Phys. Lett.* 82 (2003) 3964.  
[24]. Ö. Güllü, Ş. Aydoğan, A.Türüt, *Microelectron. Eng.* 85 (2008) 1647.  
[25]. C. Temirci, M. Çakar, *Physica B* 348 (2004) 454.  
[26]. C. Özaydın, K. Akkılıç, S. İlhan, Ş. Ruzgar, Ö. Güllü, H. Temel, *Materials Science in Semiconductor Processing* 16 (2013) 1125–1130  
[27]. E. H. Rhoderick, R. H. Williams, *Metal-Semiconductor Contacts*, 2nd ed. Clarendon, Oxford, 1988  
[28] Bohlin, K. E. (1986). Generalized Norde plot including determination of the ideality factor. *Journal of Applied Physics*, 60(3), 1223-1224.  
[29]. B. Sahin, H. Cetin, E. Ayyıldız, *Solid State Commun* 135(2005) 490-495. [38]. S.M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, (2nded) Wileyand NY,1981.  
[30]. S.M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, (2nded) Wileyand NY,1981



- [31]. J.P.P.R. Barry, J. Genoe, P. Heremans, *Progr. Photovol. Res. Appl.* 15 (2007) 659–676. [32]. B. Wang, H. Ding, Y. Hu, H. Zhou, S. Wang, T. Wang, et al., *Int. J. Hydrogen Energy* 38 (2013) 16733-16739
- [33] G. Luongo, F. Giubileo, L. Genovese, L. Lemmo, N. Martucciello, A. Di Bartolomeo, I-V and C-V characterization of a high-responsivity graphene/silicon photodiode with embedded MOS capacitor, *Nanomaterials* 7 (2017) 158, <https://doi.org/10.3390/nano7070158>.
- [34] Doğan, H., İkrâm, O., & Yıldırım, N. (2017). Photovoltaic and electrical properties of Al/Ruthenium (II)-complex/p-Si photodiode. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 38(2), 329-341.
- [35] G. Luongo, F. Giubileo, L. Genovese, L. Lemmo, N. Martucciello, A. Di Bartolomeo, I-V and C-V Characterization of a High-Responsivity Graphene/Silicon Photodiode with Embedded MOS Capacitor, *Nanomaterials* 7 (7) (Jun. 2017) 158, <https://doi.org/10.3390/nano7070158>.
- [36] A. Di Bartolomeo, G. Luongo, F. Giubileo, N. Funicello, G. Niu, T. Schroeder, M. Lisker and G. Lupina, Hybrid graphene/silicon Schottky photodiode with intrinsic gating effect, *2D Mater.* 4 (2) (2017) 025075, doi:10.1088/2053-1583/aa6aa0.
- [37] E.H. Nicollian, J.R. Brews, *Metal Oxide Semiconductor Physics and Technology*, John Wiley Sons, 1982.
- [38] Wilmsen, C. W., 1985. *Physics and Chemistry of III-V Compound Semiconductor Interfaces*. Plenum Press, New York.
- [39] Doğan, H. (2023). Al/Organometalik Kompleks/p-Si Yapısının Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (46), 64-73.
- [40]. Bodur, M. C., Duman, S., Orak, I., Saritas, S., & Baris, O. (2023). The photovoltaic and photodiode properties of Au/Carmine/n-Si/Ag diode. *Optics & Laser Technology*, 162, 109251.