



# Yeni Bir Organik Ara Tabaka Esaslı Schottky Diyodun Elektronik Karakterizasyonu

## *Electronic Characterization of a New Organic Interlayer Based Schottky Diode*

Necati Başman<sup>1\*</sup>, Rukiye Uzun<sup>1</sup>, Öznur, Arslan<sup>2</sup>, İbrahim Erol<sup>2</sup>, Güven Çankaya<sup>3</sup>, Orhan Uzun<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Bülent Ecevit Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Zonguldak, Türkiye

<sup>2</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Kimya Bölümü, Afyon, Türkiye

<sup>3</sup>Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Malzeme Mühendisliği, Ankara, Türkiye

<sup>4</sup>Bülent Ecevit Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Zonguldak, Türkiye

### Öz

2-oxo-2-(2-tiyenilmetoksi) etil-2-metakrilat (TMOEM) ve 2-tiyenilmetil 4-vinilbenzil eter (TMVBE) yan zincirinde tiyofen içeren yeni metakrilik ve stirenik monomerlerdir. Bu çalışmada, yaklaşık eşit mol oranlarında TMOEM ve TMVBE monomerlerinden sentezlenen poli(TMVBE-ko-TMOEM) kopolimeri metal/ara tabaka/yarıiletken (MAY) Schottky diyot yapımı için kullanıldı. Elde edilen MAY diyodun akım-gerilim ölçümleri gerçekleştirildi. Akım-gerilim (*I-V*) grafiğinden diyodun iyi bir doğrultucu davranışı ve yeterli ters beslem doyum akımı gösterdiği gözlemlendi. İleri beslem *I-V* karakteristiği kullanılarak yapılan hesaplamalardan, Ag/poli(TMVBE-ko-TMOEM)/*p*-Si MAY diyodunun idealite faktörü ve bariyer yüksekliği sırasıyla 2.34 ve 0.75 eV olarak bulundu. Ag/poli(TMVBE-ko-TMOEM)/*p*-Si MAY diyodu için bulunan bariyer yüksekliğinin geleneksel Ag/*p*-Si Schottky diyoduna göre daha yüksek olduğu görüldü. Ayrıca, *Cheung-Cheung* methodu da idealite faktörü, bariyer yüksekliği ve seri direnç değerlerinin bulunması için kullanıldı ve bulunan sonuçlar *I-V* metodu ile karşılaştırıldı.

**Anahtar Kelimeler:** Metakrilik polimerler, Stirenik polimerler, Schottky diyotlar, Bariyer yüksekliği

### Abstract

2-oxo-2-(2-thienylmethoxy)ethyl-2-methylacrylate (TMOEM) and 2-thienylmethyl 4-vinylbenzyl ether (TMVBE) are new methacrylic and styrenic monomer with side chain thiophene. In this study, we fabricate a metal/interlayer/inorganic semiconductor MIS Schottky diode by using poly(TMVBE-co-TMOEM) copolymer prepared with approximately equal molar fractions of TMOEM and TMVBE. Current-Voltage (*I-V*) measurement of the device was carried out and a good rectification behavior and sufficient reverse bias saturation were observed. By using forward bias characteristic, the ideality factor and barrier height values were found as 2.34 and 0.75 eV, respectively. The barrier height of Ag/poly(TMVBE-co-TMOEM)/*p*-Si MIS diode was found higher than conventional Ag/*p*-Si. On the other hand, *Cheung-Cheung* method was also used to obtain the ideality factor, barrier height and series resistance of the diode and, the obtained results were compared with *I-V* method.

**Keywords:** Methacrylic polymers, Styrenic polymers, Schottky diodes, Barrier height

### 1. Giriş

Metal-yarıiletken kontaklar günümüzde elektronik sanayisinin vazgeçilmez elemanlarıdır. Bu kontaktarın *p-n* eklemlere göre; düşük seri direnç, daha düşük sinyal/gürültü oranı, yüksek güç kapasitesi, düşük gerilimde iletim ve yüksek anahtarlama hızı gibi birçok avantajı vardır (Rhoderick ve Williams 1988, Sze ve

Kwok 2006). Bir metal yarıiletkenle temas ettiğinde, metal-yarıiletken ara yüzeyinde bir bariyer oluşur. Bu bariyer, taşıyıcıların metal-yarıiletken ara yüzeyindeki geçişlerinden sorumludur. İdeal bir Schottky diyodu için bariyer yüksekliği metal ve metal-yarıiletken ara yüzeyinin özellikleri ile belirlenir. Bu sebeple, verilen bir yarıiletken için sınırlı sayıda bariyer yüksekliği elde edilebilmektedir. Ancak, metal-yarıiletken arasına bir ara tabaka koyulması ile metal yarıiletken kontakın bariyer yüksekliği değiştirilebilir (Güllü vd. 2008, 2010). Bu durum Schottky diyotlara ileri yön gerilimi ayarlanabilen doğrultucu özelliği kazandırır. Bu

\*Sorumlu yazarın e-posta adresi: [nbasman@gmail.com](mailto:nbasman@gmail.com)

özelliği, onların güç detektörlerinde (özellikle çok düşük sinyal seviyelerinde) ve komütasyon karıştırıcılarında anahtarlama elemanı olarak kullanılmalarını sağlar.

MS kontakların arasına bir ara yüzey malzemesi konularak elde edilen yapılara metal-ara tabaka-yarıiletken (MAY) yapılar denir. MAY yapılar, yarıiletken üzerine ara tabakanın kaplanması ve onunda üzerine bir metalin buharlaştırılması ile elde edilir. Literatürde ara tabaka kullanılarak diyot parametrelerinin belirlenmesi ve/veya kontrol edilmesi üzerine pek çok çalışma mevcuttur (Güllü vd. 2008, 2010, Başman vd. 2012). Bu çalışmalarda idealite faktörü, bariyer yüksekliği, seri direnç gibi parametrelerin ara tabaka ile değiştirilebildiği ve/veya kontrol edilebildiği rapor edilmiştir.

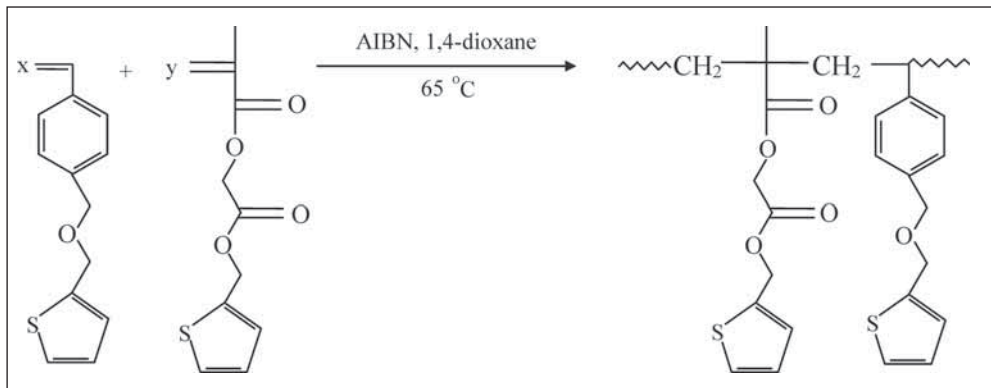
Poli (fenil metakrilat)'lar genellikle yüksek gerilme dayanımına ve termal dayanıma sahiptirler. Ayrıca ana zincirlerindeki  $\alpha$ -metil grupları sayesinde camı geçiş sıcaklıkları yüksektir. Bu malzemeler; fotolüminesans, biyomalzeme ve optik telekomünikasyon alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple, araştırmacıların yeni metakrilat polimerlerin sentezine yönelik çalışmalarını devam ettirmektedir (Erol ve Arslan 2013).

Tiyofen halkası içeren bazı kimyasallar; antialerjik, analjezik, antiinflamatuar gibi uygulamalarından dolayı eczacılık kimyası alanında ilgi uyandırmışlardır. 2-oxo-2-(2-tiyenilmethoksi) etil-2-metakrilat (TMOEM) ve 2-tiyenilmetil 4-vinilbenzil eter (TMVBE) yan zincirlerinde tiyofen içeren yeni metakrilik ve stirenik monomerlerdir (Erol ve Arslan 2013). Erol ve Arslan (2013) bu monomerlerden farklı kompozisyonlarda kopolimerler hazırlayarak; monomer reaktivite oranlarını, termal davranışlarını ve biyolojik aktivitelerini incelemiştir. Bu kopolimerlerin konjuge tiyofen halkası içermesi, bunların elektronik alanında da kullanılabilceğini akla getirmiştir. Bu bağlamda daha önceki bir çalışmamızda

söz konusu kopolimerler kullanılarak MAY Schottky diyotlar hazırlanmış ve bariyer yükseklikleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir (Başman vd. 2015). Bu çalışmamızda ise, yaklaşık eşit molar oranlarda hazırlanan bir poli(TMVBE-ko-TMOEM) kopolimeri kullanılarak elde edilen MAY Schottky diyodun elektriksel parametreleri detaylı olarak incelenmiştir.

## 2. Gereç ve Yöntem

2-oxo-2-(2-tiyenilmethoksi) etil-2-metakrilat (TMOEM) ve 2-tiyenilmetil 4-vinilbenzil eter (TMVBE) monomerlerinden poli(TMVBE-ko-TMOEM) kopolimerinin sentezi Şekil 1'de gösterilmiştir. Kompozisyondaki mol oranları TMOEM/TMVBE=0.47/0.53' dir. Kopolimerin sentezi ile ilgili detaylı bilgiler (Erol ve Arslan 2013)'da bulunabilir. Metal-ara tabaka-yarıiletken (MAY) diyot yapımında *p*-tipi silisyum (100) kullanıldı. Silisyum yarıiletkeni kimyasal temizleme işleminden geçirildi ( $\text{NH}_3+\text{H}_2\text{O}_2+6\text{H}_2\text{O}$  çözeltisinde kaynatma ve ardından  $\text{HCl}+\text{H}_2\text{O}_2+6\text{H}_2\text{O}$  çözeltisinde 10 dk. kaynatma). Omik kontak silisyum yarıiletkenin mat kısmına alüminyum buharlaştırılarak yapıldı. Yarıiletkenin parlak yüzeyindeki oksit tabaka 1:10  $\text{H}_2\text{O}/\text{HF}$  çözeltisiyle kaldırıldıktan sonra yarıiletken deiyonize suda 30 dk. bekletildi. Daha sonra poli(TMVBE-ko-TMOEM)/aseton çözeltisi *p*-Si yarıiletken üzerine damlatıldı. Aseton buharlaştıktan sonra yarıiletken yüzeyinde ince bir poli(TMVBE-ko-TMOEM) filmi oluştu. Bu ince film üzerine, gümüş pasta ile yaklaşık 1mm çapında nokta şeklinde metal kontak oluşturuldu. Böylelikle Ag/poli(TMVBE-ko-TMOEM)/*p*-Si MAY Schottky diyodu elde edilmiş oldu. Bu yapının akım-gerilim (*I-V*) ölçümleri, Keithley 6487 Picoammeter/Voltage cihazı ile oda sıcaklığında yapıldı. *I-V* ölçümlerinden elde edilen verilerden idealite faktörü ve bariyer yüksekliği *I-V* metodu ile hesaplandı. Ayrıca aynı parametreler *Cheung-Cheung* fonksiyonlarıyla hesaplanıp değerler karşılaştırıldı.



Şekil 1. Poli(TMVBE-ko-TMOEM) kopolimerinin sentezi.

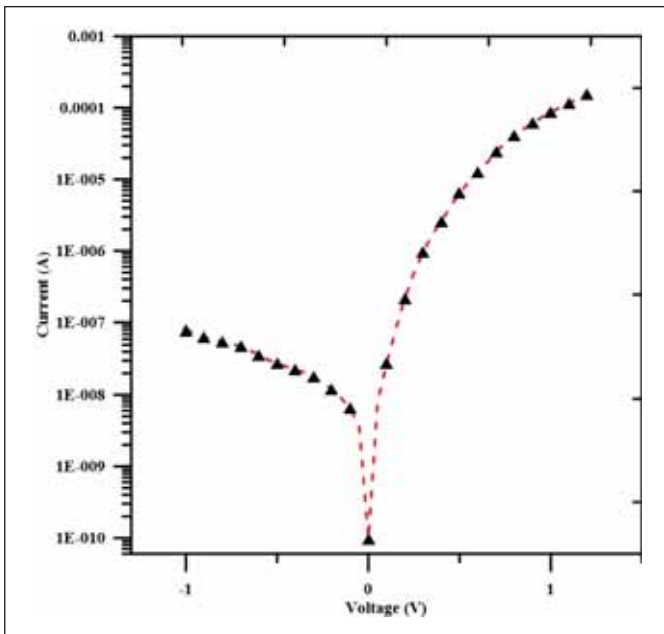
### 3. Sonuçlar ve Tartışma

Şekil 2 Ag/poli(TMVBK-ko-TMOEM)/p-Si MAY Schottky diyodunun yarı-logaritmik akım-gerilim ( $I$ - $V$ ) karakteristiğini göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere yapı oldukça iyi bir doğrultucu özelliği göstermektedir. Ters beslemede ki akımın gerilime zayıf bağlılığı ve doğru beslemedeki eksponansiyel artış doğrultucu kontak karakteristiktir. Yarı-logaritmik  $I$ - $V$  grafiğinde yüksek akımda meydana gelen eğrilik kontak telleri, ara tabaka ve yarıiletkenin direncinden kaynaklanan seri direnç ( $R_s$ ) etkisi ile açıklanır (Güllü ve Türüt 2010, Başman vd. 2012).

İdealite faktörü ( $n$ ) ve bariyer yüksekliği ( $\phi_b$ ) bir diyonu karakterize eden önemli parametrelerdir. İdealite faktörü bir diyodun iletim mekanizmasının ideal *Termiyonik Emisyon Teorisi'*nden sapmasını gösterirken, bariyer yüksekliği, yarıiletkenin fermi seviyesi ile çoğunluk taşıyıcıları band sınırı arasındaki enerji farkını belirtir. Bu iki parametre *Termiyonik Emisyon Teorisi* ile hesaplanır. *Termiyonik Emisyon Teorisi* ile ilgili detaylı bilgiler literatürde bulunabilir (Rhoderick ve Williams 1988, Sze ve Kwok 2006, Abay vd. 2003).

*Termiyonik Emisyon Teorisi'*ne göre, idealite faktörü, ileri beslem  $\ln(I)$ - $V$  grafiğinin doğrusal kısmının eğiminden

$$n = \frac{q}{kT} \left[ \frac{\partial V}{\partial (\ln I)} \right] \quad (1)$$



Şekil 2. Ag/poli(TMVBK-ko-TMOEM)/p-Si diyodunun  $\ln(I)$ - $V$  grafiği.

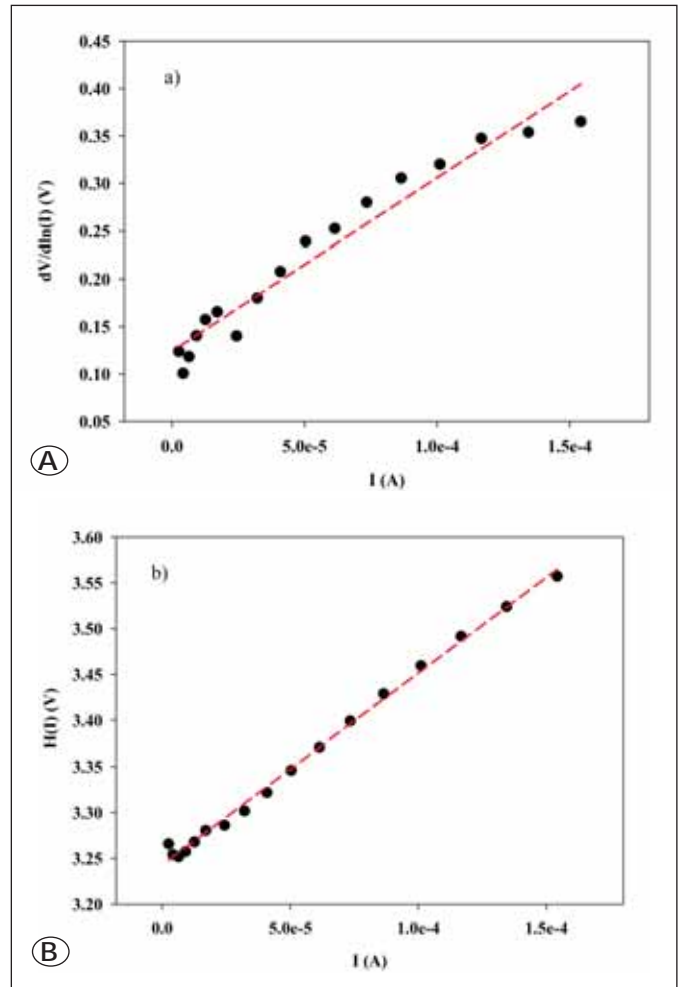
ifadesiyle bulunur. Bu ifadede  $q$ ,  $k$  ve  $T$  sırasıyla elektron yükünü, Boltzman sabitini ve ortam sıcaklığını belirtmektedir.

Bariyer yüksekliği ise

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

ifadesiyle bulunur. Bu ifadede  $A$  diyot alanı,  $I_0$  ters doyma akımı ve  $A^*$  Richardson sabiti olup p-Si için  $32 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$  değerine sahiptir.

Eşitlik (1) ve (2)'den Ag/poli(TMVBK-ko-TMOEM)/p-Si MAY Schottky diyodunun idealite faktörü ve bariyer yüksekliği sırasıyla 2,34 ve 0,75 eV olarak hesaplandı. İdeal bir diyot için  $n$ 'in 1'e yakın olması gerekir.  $n$ 'nin 1'den farklı değerleri, *Termiyonik Emisyon Teorisi'*nden sapmaları gösterir. 1'den büyük  $n$  değerleri literatürde ara yüzey durumlarına, kuantum mekaniksel tünellemelere ve seri direnç etkisine atfedilmiştir (Güllü ve Türüt 2010).



Şekil 3. A)  $dV/d(\ln I)$  - $I$  grafiği. B)  $H(I)$ - $I$  (b) grafiği

Ag/poli(TMVBE-ko-TMOEM)/p-Si için hesapladığımız 0,75 eV bariyer yüksekliği, literatürde Ag/p-Si için verilen değerden daha yüksektir (Acar vd. 2004). Literatürde, metal ile yarıiletken arasında bulunan ara tabakaların bariyer yüksekliğini değiştirmesi ara tabaka olarak kullanılan filmin silisyum altlığın uzay yükü bölgesini etkilemesine atfedilmektedir. Organik film, p-Si yarıiletkenin ara yüzey durumlarını önemli ölçüde etkileyerek diyodun bariyer yüksekliğini değiştirir (Güllü ve Türüt 2010, Başman vd. 2012, Yüksel vd. 2013).

İleri beslemenin nispeten yüksek gerilim değerlerinde seri direnç etkisinden dolayı  $\ln(I)$ - $V$  grafiği lineerlikten sapmaktadır. Cheung ve Cheung  $n$ ,  $\phi_b$  ve  $R_s$ 'nin bu yüksek gerilim bölgesinden hesaplanabileceği bir metot geliştirmişlerdir (Cheung ve Cheung 1986). Cheung ve Cheung'e göre bu parametreler aşağıdaki fonksiyonlardan hesaplanır.

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

$$H(I) = V - n \left( \frac{kT}{q} \right) \ln \left( \frac{1}{AA^* T^2} \right) \quad (4)$$

$$H(I) = IR_s + n\phi_b \quad (5)$$

$dV/d(\ln I)$ - $I$  grafiğinin çizimi (Şekil 3a) yüksek gerilim bölgesindeki eğrilik için bir doğru belirtir. Eşitlik (3)'e göre bu doğrunun eğimi  $R_s$ 'yi ve  $dV/d(\ln I)$  eksenini kestiği noktada  $nkT/q$ 'yu verir. Yapılan hesaplamalar sonucu  $n$  ve  $R_s$  değerleri sırasıyla 4.80 ve 1.82 k $\Omega$  bulunmuştur. Öte yandan, Eşitlik (5)'e göre çizilen  $H(I)$ - $I$  grafiğinin (Şekil 3b) eğimi ikinci bir  $R_s$  değeri daha verir. Yine aynı grafiğin  $H(I)$  eksenini kestiği nokta  $n\phi_b$ 'yi verir. Buna göre de  $\phi_b$  ve  $R_s$  değerleri sırasıyla 0.68 eV ve 2.08 k $\Omega$  bulunmuştur. Bu metottan elde edilen her iki  $R_s$  değeri birbirine yakın bulunmuştur.

$I$ - $V$  ve Cheung-Cheung metotlarından hesaplanan idealite faktörleri ve bariyer yükseklikleri arasındaki fark, bu iki metodun hesaplama için  $\ln(I)$ - $V$  grafiğinin farklı bölgelerini kullanmalarından kaynaklanmaktadır.  $I$ - $V$  metodunda seri direncin ihmal edildiği lineer bölge, Cheung-Cheung metodunda ise seri direncin ve ara yüzey durumlarının etkili olduğu lineer olmayan bölge kullanılır (Aydoğan vd. 2009).

Sonuç olarak, bu çalışmada, poli(TMVBE-ko-TMOEM) kopolimeri ara tabaka olarak kullanılarak MAY Schottky diyodu yapılmıştır.  $I$ - $V$  ölçümlerinden diyodun iyi

bir doğrultucu davranışı gösterdiği gözlenmiş ve ara tabaka olarak kullanılan poli(TMVBE-ko-TMOEM) kopolimerinin diyodun bariyer yüksekliğini arttırdığı belirlenmiştir.

#### 4. Kaynaklar

- Abay, B., Cankaya, G., Guder, H.S., Efeoglu, H., Yogurtcu, Y.K. 2003. Barrier characteristics of Cd/p-GaTe Schottky diodes based on I-V-T measurements. *Semicond. Sci. Technol.*, 18: 75-81.
- Acar, S., Karadeniz, S., Tuğluoğlu, N., Selcuk, A.B., Kasap, M. 2004. Gaussian distribution of inhomogeneous barrier height in Ag/p-Si (100) Schottky barrier diodes. *Appl. Surf. Sci.*, 233: 373-381.
- Aydoğan, Ş., Sağlam, M., Türüt, A., Onganer, Y. 2009. Series resistance determination of Au/Polypyrrole/p-Si/Al structure by current-voltage measurements at low temperatures. *Mater. Sci. and Eng. C*, 29: 1486-1490.
- Başman, N., Uzun, O., Fiat, S., Alkan, C., Çankaya, G. 2012. Electrical characterization of a pre-ceramic polymer modified Ag/poly(hydridocarbyne)/p-Si Schottky barrier diode. *J Mater Sci: Mater. Electron. J Mater Sci: Mater Electron.*, 23: 2282-2288.
- Başman, N., Uzun, R., Arslan, O., Erol, I., Çankaya, G., Uzun, O. Electronic Properties of Copolymers of Novel Methacrylic and Styrenic Monomer Based on the Thiophene. *I. International Organic Electronic Material Technologies Conference*, s. 23 Elazığ.
- Cheung, S.K., Cheung, N.W. 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current voltage characteristics. *Appl. Phys. Lett.*, 49: 85-89.
- Güllü, O., Aydoğan, S., Türüt, A. 2008. Fabrication and electrical characteristics of Schottky diode based on organic material. *Microelectron. Eng.*, 85: 1647-1651.
- Güllü, O., Türüt, A. 2010. Electrical analysis of organic dye-based MIS Schottky contacts. *Microelectron. Eng.*, 87: 2482-2487.
- Erol, I., Arslan, O. 2013. Copolymers of novel methacrylic and styrenic monomer based on the thiophene: synthesis, characterization, monomer reactivity ratios, thermal properties, and biological activity. *J. Biomater. Sci. Polym. Ed.*, 24: 1198-1218.
- Rhoderick, E.H., Williams, R.H. 1988. *Metal-Semiconductor Contacts*. Clarendon, Oxford, 389 pp.
- Sze, S. M., Kwok K.Ng. 2006. *Physics of semiconductor devices*. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 815 pp.
- Yüksel, Ö.F., Tuğluoğlu, N., Şafak, H., Kuş, M. 2013. The modification of Schottky barrier height of Au/p-Si Schottky devices by perylene-diimide. *J. Appl. Phys.*, 113: 044507.