

Pentacene/n-Si Heteroeklem Aygıtlarının Yapımı ve Karakterizasyonu

Zakir ÇALDIRAN^{1*}

ÖZET: Bu çalışmada organik yarıiletken özellik gösteren pentacene malzemesi kullanılarak elde edilen doğrultucu kontakların elektriksel özellikleri incelendi. İlk olarak n-Si bir yüzeyine termal buharlaştırma yöntemi ile Al metali kaplandı ve 450 °C de 10 dakika tavlansarak omik kontak elde edildi. Daha sonra termal buharlaştırma yöntemi ile n-Si yarıiletkeninin diğer yüzeyine Pentacene organik filmi kaplandı. Son olarak elektriksel ölçümler için DC saçırma yöntemi ile Pentacene üzerine Ni kaplanarak daire şeklinde sekiz farklı kontak elde edildi. Ni/Pentacene/n-Si/Al heteroeklem aygıtlarının oda sıcaklığında ve karanlıkta I-V (Akım Voltaj) ölçümleri yapıldı. TE teorisi kullanılarak yapılan hesaplamalardan elde edilen aygıtların benzer karakteristik özelliklere sahip olduğu görülmüştür. D1 numaralı Ni/Pentacene/n-Si/Al heteroeklem aygıtı 0.83 eV engel yüksekliği ve 1.41 idealite faktörü ile Schottky davranış göstermiştir. Ayrıca Cheung ve Norde fonksiyonları gibi farklı metotlar kullanılarak engel yüksekliği ve idealite faktörü ile beraber D1 numaralı Ni/Pentacene/n-Si/Al heteroeklem aygıtının seri direnç değerleri de (Rs) hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Pentacene, heteroeklem aygıt, Schottky diyot, organik yarıiletken

The Fabrication of the Pentacene/n-Si Heterojunction Devices and Characterization

ABSTRACT: In this study, electrical properties of rectifier contacts obtained by using organic semiconducting pentacene material were investigated. Firstly, Al metal was evaporated on one surface of n-Si wafer for back contact by thermal evaporation and then n-Si was annealed at 450 °C for 10 minutes. Then, pentacene organic film was deposited on the other surface of n-Si wafer by thermal evaporation. Finally, eight circle Ni contacts with $7.85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ area were coated on Pentacene film by sputtering method for the electrical measurements. Current-voltage (I-V) measurements were performed at the room temperature and in dark of Ni/Pentacene/n-Si/Al heterojunction devices. The basic diode parameters such as ideality factors (n) and the barrier heights (Ω) of Ni/Pentacene/n-Si/Al devices were calculated using forward bias I-V curve. The D1 Ni/Pentacene/n-Si/Al heterojunction device showed Schottky behavior with barrier heights of 0.83 eV and ideality factors of 1.41 using thermionic emission (TE) theory. Other devices have similar characteristics. Furthermore, both parameters and series resistance (Rs) of number D1 Ni/Pentacene/n-Si/Al heterojunction device were calculated using different methods as Cheung and Norde functions.

Keywords: Pentacene, heterojunction devices, Schottky diode, organik semiconductor,

¹ Zakir ÇALDIRAN (Orcid ID: 0000-0002-2170-9639), Ardahan Üniversitesi, Ardahan Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Ardahan, TÜRKİYE

*Sorumlu yazar/Corresponding Author: Zakir ÇALDIRAN, zakircaldiran@ardahan.edu.tr

Geliş tarihi / Received: 13.08.2018
Kabul tarihi / Accepted: 05.10.2018

GİRİŞ

Schootky tipi diyot uygulamaları yarıiletken aygıt teknolojisi için önem arz etmektedir. Yarıiletken teknolojisinin gelişmesi ile Schottky tipi aygıtlar daha da önemli hale gelmiştir (Deniz ve ark., 2018). Schottky engel diyot olarak da ifade edilen bu aygıtlar metal ve yarıiletkenin atomik boyutta birleşmesi ile meydana gelir. Yeni malzeme ve tekniklerin keşfedilmesi bu tip aygıtların kullanım alanlarını da arttırmıştır (Koçyiğit ve ark.,2018; Tataroğlu ark., 2018). Schottky tipi aygıtlar telekomünikasyon teknolojisinde, radar uygulamalarında, optoelektronik aygıtlarda, transistörlerde, LED teknolojisinde, fotovoltajiklerde (PV) ve birçok elektronik sistemlerde kullanılmaktadır (Aydoğan ve ark.,2008; Çaldıran ve ark., 2013a). Schottky engel yüksekliği Schottky tipi aygıtlar için önem arz etmektedir. Bu engel yüksekliği metal yarıiletken arasında bir tabakanın varlığı ile değiştirilebilir (Hendi ve Orainy, 2014; Orak ve Koçyiğit, 2016; Karabulut ve ark., 2018b). İletken polimerler metalle kontak haline getirildiği zaman fotovoltajik, elektrolüminesans ve doğrultucu etki gösterdiğinden, elektronik endüstrisinde önemli bir yere sahiptir (Oyama ve ark., 2011; Çaldıran, 2013b). Bununla beraber metal yarıiletken kontaklarının arayüzey özellikleri, güvenilirlik ve kararlılık gibi aygıt performansı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (Aydoğan ve ark., 2010; Karabulut ve ark. 2018a). Aromatik hidrokarbonlardan olan Pentacene malzemesi, organik elektronikte kullanılmak üzere en ümit verici π -konjuge organik materyallerden biri olarak kabul edilmektedir (Oyama ve ark., 2011; Alahmed ve ark. 2013; Türüt ve ark., 2017).

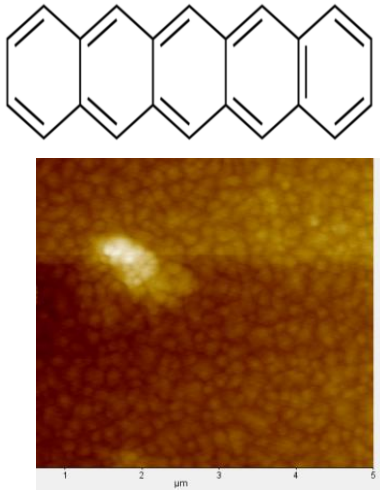
Bu çalışmada molekül yapısı Şekil 1’de verilen organik pentacene yarıiletken malzemesi kullanılarak metal/organik/yarıiletken aygıt yapısı elde edilmiştir. Oda sıcaklığında I-V (akım-voltaj) ölçümleri yapılarak, elde edilen aygıtın temel diyot parametreleri tayin edilmiştir. İdealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (Φ) gibi

diyot performansı hakkında önemli bilgiler veren parametreler termoyonik (TE) metodu ile beraber Nord ve Cheung metotları ile hesaplanarak çıkan sonuçlar karşılaştırıldı.

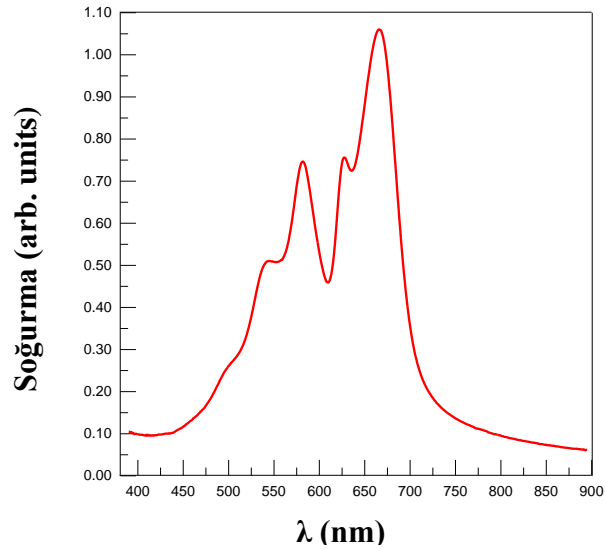
METARYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada taban malzemesi olarak (100) doğrultusuna, 400 μm kalınlığa, 1-10 $\Omega\text{-cm}$ öz dirence sahip n tipi Si kristali kullanılmıştır. Si tabaka dilimlenmiş olarak satın alındı ve numune yüzeyinde herhangi bir kirlilik gözlenmedi. Ancak kristal yüzeyinin her türlü kirliliklerden arındırılması için aygıt fabrikasyonundan önce numune kimyasal temizleme işlemi gerçekleştirildi. Kimyasal temizlemede; aseton’da ultrasonik olarak 10 dakika yıkama, metanol’de ultrasonik olarak 10 dakika yıkama, RCA1 ($\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_3$; 6:1:1)’de 60°C’de 10 dakika kaynama, seyreltik HF ($\text{H}_2\text{O}:\text{HF}$; 10:1) ile 30 saniye yıkama, RCA2 ($\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{HCl}$; 6:1:1)’de 60°C’de 10 dakika kaynama, seyreltik HF ($\text{H}_2\text{O}:\text{HF};10:1$) ile 30 saniye yıkama son olarak 20 dakika akan deiyonize su içerisine bekletilme ve azot gazı (N_2) ile kurulum işlemi yapıldı. Omik kontak için kimyasal temizliği yapılmış n -Si tabakasının bir yüzeyine 1×10^{-6} Torr vakum ortamında termal buharlaştırma yöntemi ile Al metali kaplandı ve N_2 ortamında 450 °C’de 10 dakika tavlandı. Daha sonra n -Si tabakasının diğer yüzeyine endüstriyel olarak satın alınan (Sigma-Aldrich) toz haldeki Pentacene malzemesi alümina potalar kullanılarak termal buharlaştırma yöntemi ile 400 °C’de 5×10^{-7} Torr vakum ortamında 1 Å/S’de kaplandı. Aynı şartlarda cam yüzeyine Pentacene filmi kaplanarak soğurma ve AFM ölçümleri alındı. Şekil 1’de cam yüzeyine kaplanmış Pentacene filminin AFM görüntüsü verilmiştir. AFM görüntüsünde filmin yüzeye gayet homojen kaplandığı ve lokalizasyonların oluşmadığı anlaşılmaktadır. Benzer şekilde cam yüzeyine kaplanmış Pentacene filminin soğurma grafiği Şekil 2’de verilmiştir. Bu grafikte

Pentacene filminin 500 nm ile 700 nm gerçekleştirdiği görülmektedir. dalgaboyu aralığında etkili soğurma



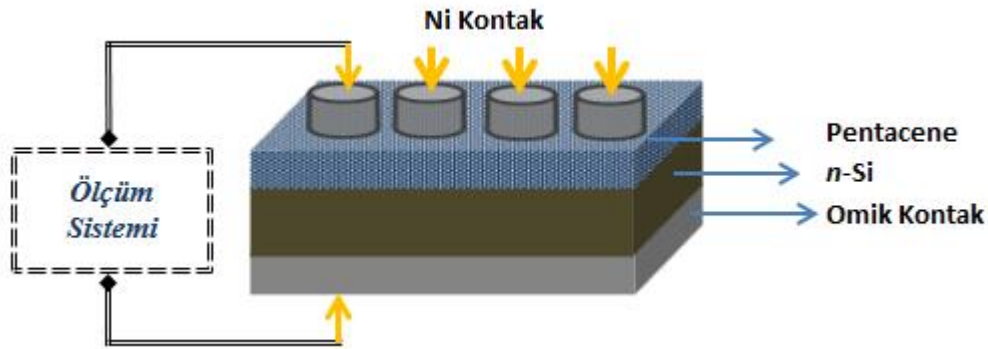
Şekil 1. Pentacene filmini AFM görüntüsü ve Pentacenin molekül yapısı



Şekil 2. Pentacene filminin soğurma grafiği

Son olarak Pentacene filmi yüzeyine DC saçırma yöntemi ile Ni metali kaplanarak kesit görüntüsü Şekil 3’de verilen Ni/Pentacene/*n*-Si/Al heteroeklem diyot yapısı elde edildi.

Yapımı tamamlanan aygıt için “KEITHLEY 487 Picoammeter/Voltage Source” cihazı ile akım-voltaj (*I-V*) ölçümleri oda sıcaklığında ve karanlıkta alındı.



Şekil 3. Ni/Pentacene/*n*-Si/Al Heteroeklem diyodunun kesit görüntüsü

BULGULAR VE TARTIŞMA

I - V ölçümleri kullanılarak diyodun, lineer davranış sergilediği düz beslem tarafındaki değişiminden idealite faktörü, engel yüksekliği ve yüksek akım değerlerine karşılık gelen ve lineerliğin bozulduğu bölge yardımıyla da seri direnç değerleri hesaplandı.

Termoionik Emisyon (TE) teorisine göre, bir Schottky diyodun doğru beslem akımı uygulanan potansiyele bağlı olarak;

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

ifadesi ile verilmektedir (Çaldıran ve ark., 2015). Bu ifade $eV \gg nkT$ olması durumunda üstel terim yanında '1' ihmal edilebilir. Bu durumda ifadenin yeni hali;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right] \quad (2)$$

olur. Eşitlik 2. ifadesinin her iki tarafının tabii logaritması alınıp, sonra da V 'ye göre türevi alınır; idealite faktörü için Eşitlik 3. ifadesi elde edilir.

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

İdealite faktörü; diyodun karakteristiğini belirleyen önemli bir parametredir. "n" simgesi ile gösterilir ve birimsiz bir parametredir. İdeal bir diyot için $n=1$ 'dir ve n değeri 1'den uzaklaştıkça, yani değeri büyüdükçe diyot ideal olmayan bir davranış sergiler (Neamen, 1992; Yılmaz ve ark., 2018).

$\ln I$ - V grafiği çizildiğinde, düz beslem kısmındaki lineer bölgeye doğru bir fit çizilerek bu doğrunun eğiminden $dV/d(\ln I)$ elde edilir. Bu değerle birlikte e , (elektronun yükü $=1.6 \times 10^{-19}$ C), k (Boltzmann sabiti $=8.625 \times 10^{-5}$ eV K^{-1}) ve T (mutlak sıcaklık (K)) değerleri Eşitlik 3. ifadesinde yerine yazılarak idealite faktörü değerleri farklı sıcaklık değerleri için hesaplanabilir. Fit edilen doğrunun $V=0$ 'da düşey eksenini kestiği nokta I_0 doyma akım yoğunluğunu verir. Eşitlik 2.'deki I_0 doyma akım yoğunluğu,

$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \quad (4)$$

ile verilmektedir. Eşitlik 4.'ün her iki tarafının tabii logaritması alınıp Φ_b 'ye göre çözülürse, Eşitlik 5. ile verilen engel yüksekliği ifadesi elde edilir.

$$e\Phi_b = kT \ln\left(\frac{AA^* T^2}{I_0}\right) \quad (5)$$

Burada, A , diyodun etkin alanı ($A=0.00785$ cm^2) A^* , Richardson sabiti olup n -Si için 112 A $K^{-2} cm^{-2}$ 'dir.

Aynı şartlarda elde edilen yedi farklı Ni/Pentacene/ n -Si/Al heteroeklem diyotlarının oda sıcaklığında (300 K) ve karanlıkta elde edilmiş akım-voltaj grafiklerinden hesaplanan idealite faktörleri ve engel yükseklikleri değerleri Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelge 1'deki veriler incelendiğinde, idealite faktörü değerleri 1.41 ile 2.38 arasında değişirken buna karşılık aynı aygıtların engel yüksekliği değerleri 0.78 eV ile 0.84 eV arasında değişmektedir.

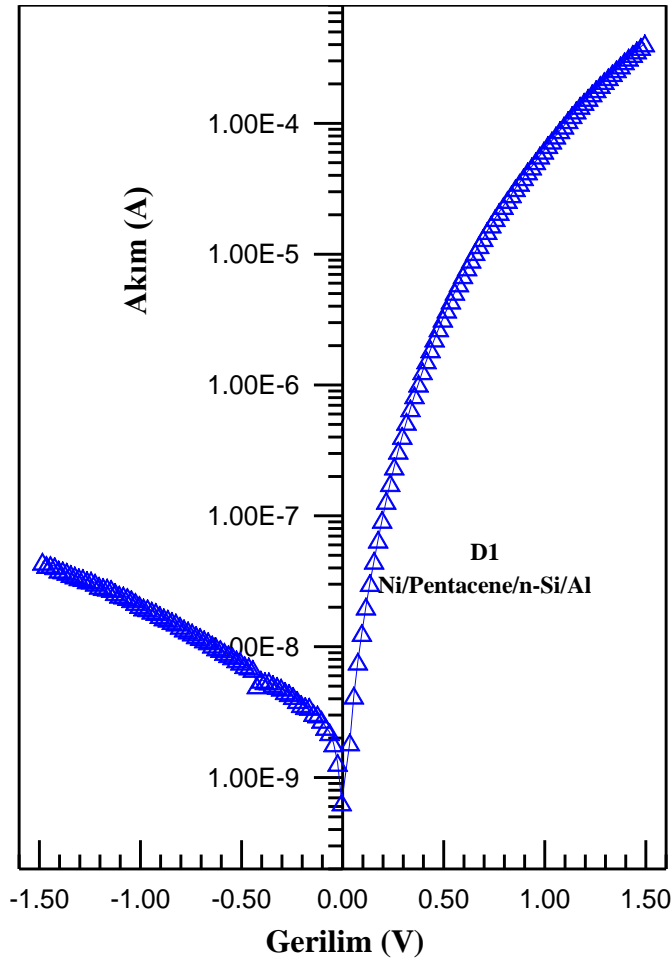
Çizelge 1. Ni/Pentacene/ n -Si/Al heteroeklem aygıtlarının TE metodundan hesaplanan idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri.

Diyot Numarası	n (İdealite Faktörü)	Φ (Engel Yüksekliği)
D1	1.41	0.84
D2	1.51	0.84
D3	1.61	0.84
D4	1.64	0.84
D5	1.66	0.77
D6	2.18	0.81
D7	2.31	0.84
D8	2.58	0.83

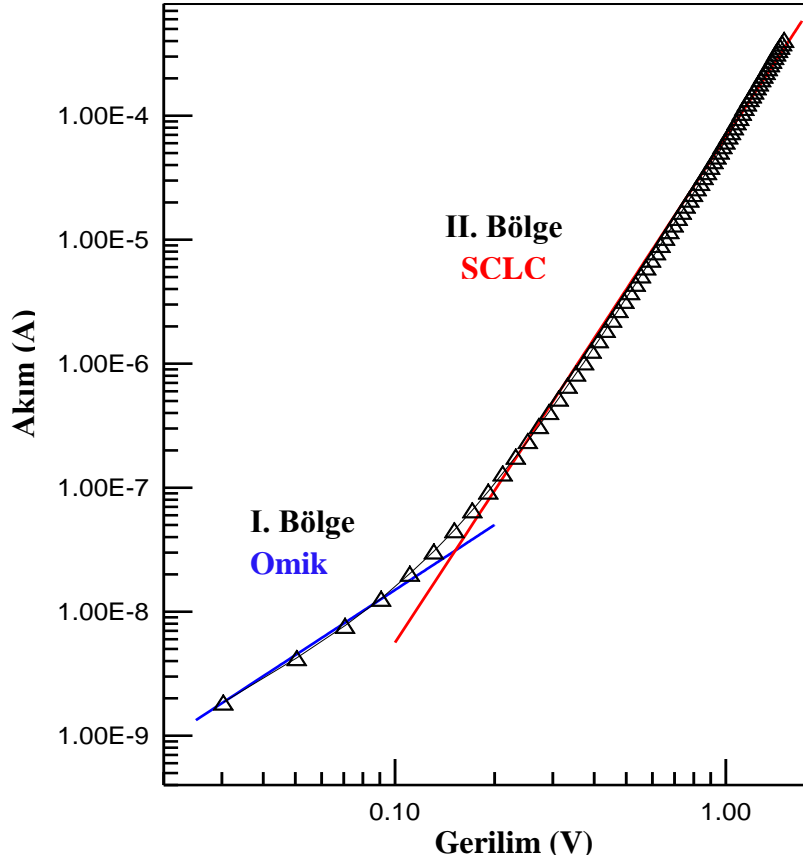
Şekil 4’de D1 numaralı aygıt olarak isimlendirilen Ni/Pentacene/*n*-Si/Al heteroeklem diyodunun oda sıcaklığında alınmış I - V grafiği verilmiştir. Bu grafikten ters beslemede sızıntı akımların dışında hemen hemen hiç akım geçmediği gözlenmektedir. Düz beslem durumunda düşük gerilimlerde yüksek akımların geçtiği ve bu bölgede akımın lineer arttığı gözlenmektedir. Yüksek akım ve yüksek gerilim bölgesinde seri direncin etkili olduğu ve grafikten bükülmelerin olduğu görülmektedir (Brutscher ve Hoheisel, 1988; Yüksel ve ark., 2013; Karabulut ve ark., 2018b).

Şekil 5’de D1 numaralı heteroeklem aygıtın $\log I$ - $\log V$ skalada I - V grafiği verilmiştir. D1

numaralı aygıtın Lineer I - V grafiğinin düz besleminden alınan bu grafiğinin iki farklı bölgeden oluştuğu görülmektedir. Şekil 5’de log-log skalada I. bölge olarak ifade edilen düşük voltaj bölgesinde aygıt omik davranış sergilemektedir. Bu bölgede akım elektrik alanı ile orantılıdır. Modern organik aygıtların birçoğu 1940 yılında Mott tarafından yorumlanan SCLC temeline dayanır (Mott, 1940; Çaldıran ve ark., 2013c). D1 aygıtının $\log I$ - $\log V$ skaladaki grafiğinde yüksek voltajın olduğu ve II. böge olarak da ifade edilen bölge SCLC (Sınırlı Uzaklık Akımı) bölgesidir.



Şekil 4. D1 numaralı Ni/Pentacene/*n*-Si/Al heteroeklem aygıtının I - V grafiği



Şekil 5. D1 numaralı Ni/Pentacene/n-Si/Al heteroeklem aygıtının logI-logV grafiği

Termoionik (TE) teorisine göre I-V grafiğinin düz besleminde akımın lineer olduğu bölgede Shottky tipi diyotların idealite faktörü ve engel yüksekliği parametreleri hesaplanabilir. Yüksek seri dirence sahip metal-yarıiletken kontaklarda, seri direnç, idealite faktörü ve engel yüksekliği gibi fiziksel parametrelerin tayin edilmesi amacıyla yeni yöntemler geliştirilmiştir. Norde ve Cheung modellerine göre de Shottky tipi aygıtlara ait bu parametreler hesaplanabilir. Norde tarafından $n=1$ durumu için düz beslemin tamamını dikkate alan, seri direnç ve engel yüksekliğini tanımlayan ifade, $F(V)$ fonksiyonudur. $F(V)$ fonksiyonu Eşitlik 6'daki gibi tanımlanır.

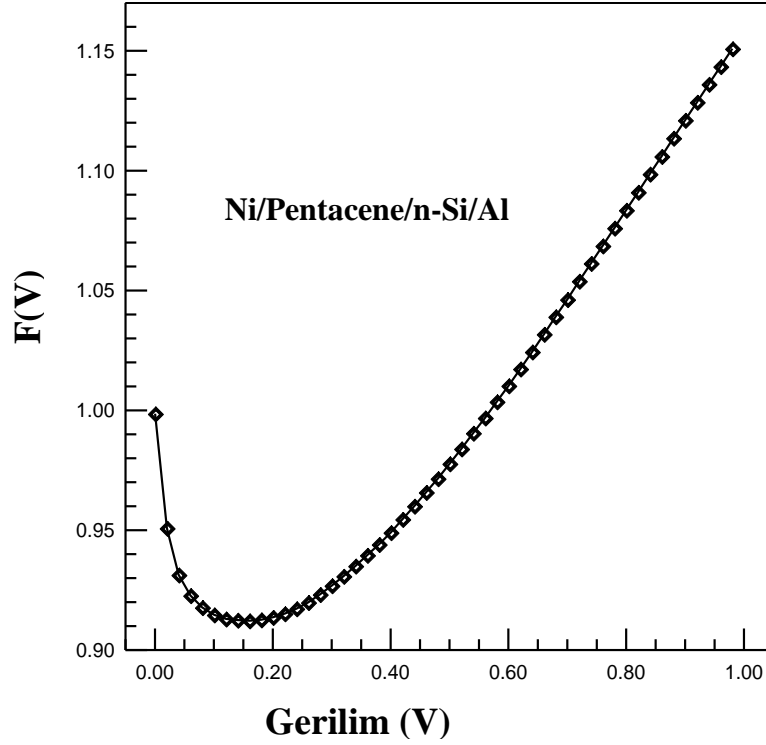
$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \left(\frac{kT}{2} \right) \ln \left(\frac{I(V)}{AA * T^2} \right) \quad (6)$$

$F(V)$ 'deki γ ifadesi I-V grafiğinden elde edilen idealite faktöründen (n) büyük bir tam sayıdır. Burada ki I_0 ve V_0 değeri minimum noktadaki akım ve gerilim değerleridir. Sonuç olarak engel yüksekliği ve seri direnç ifadeleri;

$$\phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (7)$$

$$R_s = \frac{kT(\gamma - n)}{qI_0} \quad (8)$$

şeklinde hesaplanır. Şekil 6'de D1 numaralı Ni/Pentacene/n-Si/Al heteroeklem diyodunun F-V grafiği verilmiştir. Norde fonksiyonları kullanılarak $F(V_0)=0.91$ V ve $V_0 = 0.16$ V değerlerine karşılık engel yüksekliği (Φ_b) ve seri direnç (R_s) değerleri sırası ile 0.96 eV ve 44.5 k Ω olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6. D1 numaralı Ni/Pentacene/n-Si/Al heteroeklem aygıtının $F(V)$ - V grafiği

Aygıta uygulanan gerilim yeterince büyük olduğunda arayüzey halleri, arayüzey yalıtkan tabakası ve seri direnç etkisinden dolayı I - V grafiği önemli ölçüde lineerlikten sapar. Bu durumda yüksek akım ve yüksek gerilim bölgesinde bükülmenin olduğu seri direnç

bölgesi oluşur. Lineerliğin olmadığı bu bölgede idealite faktörü, engel yüksekliği ve Seri direnç gibi parametrelerinin hesaplanmasında Cheung ve Cheung (Cheung ve Cheung, 1986), tarafından farklı bir model sunulmuştur.

$$I = A.J = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (9)$$

uygulanan gerilim V 'nin IR_s kadarlık miktarı seri direnç bölgesine düşeceği için V yerine $(V) -$

IR_s yazarak Eşitlik 9. aşağıdaki şekilde yeniden yazılabilir.

$$I = A.J = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (10)$$

$$V = \left(\frac{nkT}{e} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) + n\Phi_b + IR_s \quad (11)$$

Eşitlik 11'in $\ln I$ 'ya göre türevi alınırsa;

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (12)$$

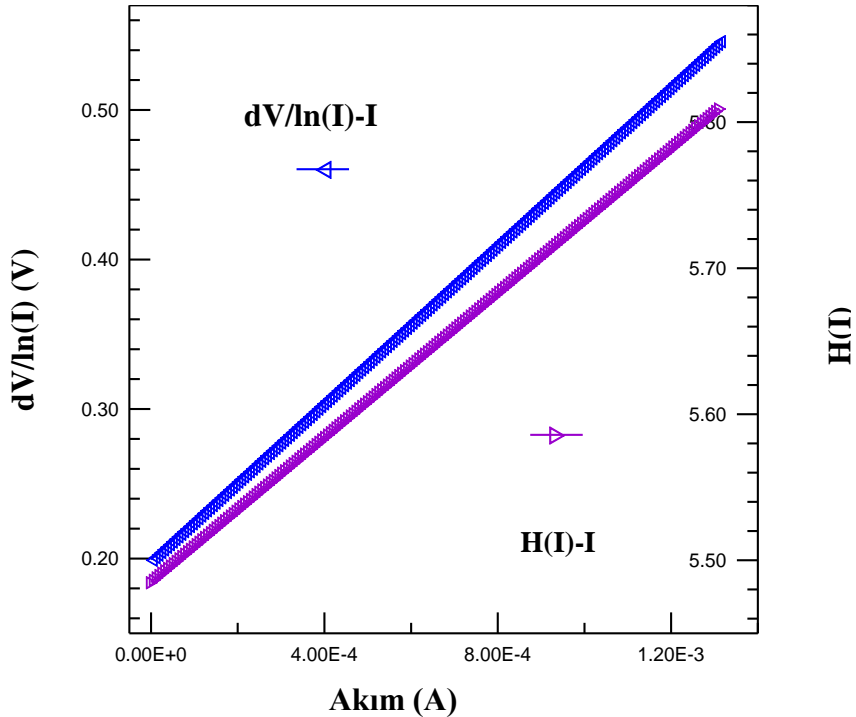
ifadesi elde edilir. Eşitlik 12'de $dV/d(\ln I)$ 'nın I 'ya göre grafiği bir doğru olacaktır. Bu grafikten elde edilecek olan doğrunun eğimi nötral bölge direncini ya da R_s seri direncini verecektir. Bu doğrunun düşey eksenini kestiği noktadan (n) idealite faktörü bulunabilir (Aydoğan 2003). Potansiyel engeli Φ_b 'yi bulmak için;

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{e} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (13)$$

şeklinde bir $H(I)$ fonksiyonu tanımlanabilir. Eşitlik 11 ve 12'den;

$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (14)$$

yazılabilir. Eşitlik 14'de $H(I)-I$ grafiği çizildiğinde bu grafik de bir doğru şeklinde olacak ve bu doğrunun eğimi de R_s seri direncini verecektir. Bu doğrunun $H(I)$ eksenini kestiği noktadan da engel yüksekliği $e\Phi_b$ bulunur.



Şekil 7. D1 numaralı Ni/Pentacene/n-Si/Al heteroeklem aygıtının $dV/d(\ln I)-I$ ve $H(I)-I$ grafiği

Şekil 7’de D1 numaralı Ni/Pentacene/n-Si/Al heteroeklem diyodunun $dV/d(\ln I)$ ’nın I ’ya karşı çizilen grafiğinden elde edilmiş bir fit gösterilmektedir. Bu doğrunun $I=0$ ’da düşey eksenini kestiği noktadan idealite faktörü (n) 8.3 ve doğrunun eğiminden de seri direnç değeri 0.32 k Ω olarak elde edildi. Şekil 10’da Eşitlik 14. yardımıyla elde edilen $H(I)-I$ grafiğinin fiti

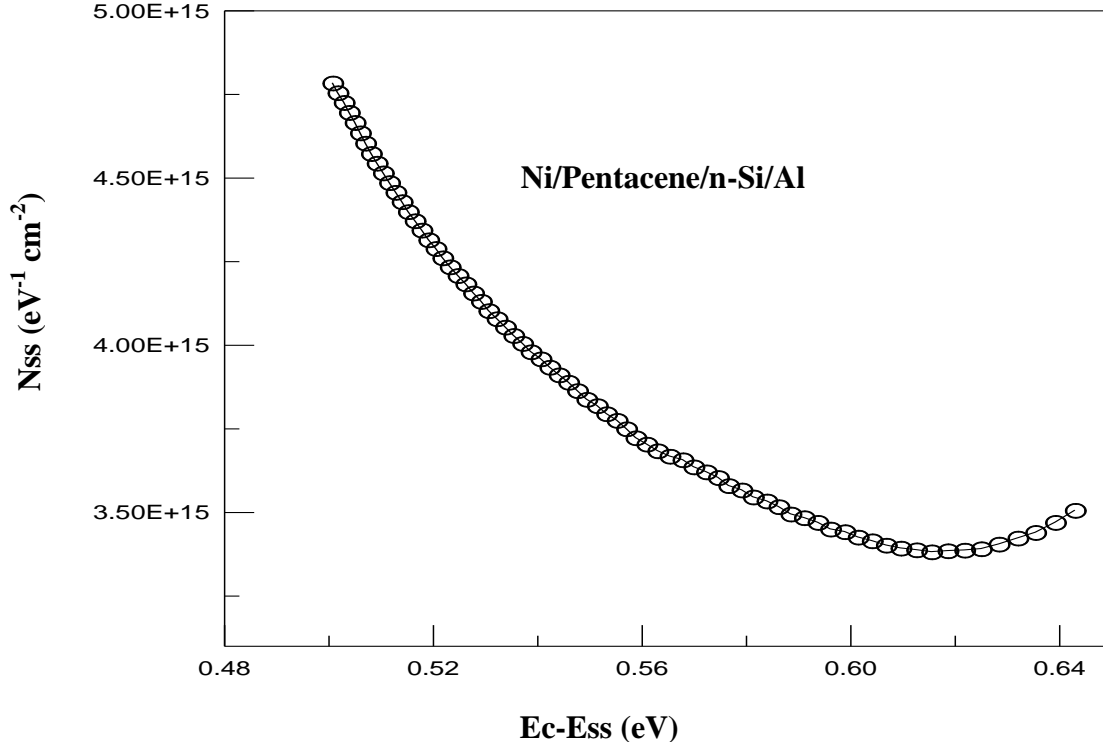
verilmiştir. $I=0$ iken doğrunun düşey eksenini kestiği noktadan engel yüksekliği (Φ) 0,91 eV ve doğrunun eğiminden de seri direnç (R_s) 0.33 k Ω olarak hesaplandı. $dV/d(\ln I)$ ’nın I ’ya karşı çizilen grafikten hesaplanan idealite faktörünün lineer I-V grafiğinden hesaplanan idealite faktöründen daha büyük çıktığı görülmektedir.

Çizelge 2. D1 numaralı Ni/Pentacene/n-Si/Al heteroeklem aygıtının farklı metotlar ile hesaplanan idealite faktörü ve engel yüksekliği ve seri direnç değerleri.

<i>I-V</i>		<i>dV/d(lnI)-I</i>		<i>H(I)-I</i>		<i>F(V)-V</i>	
<i>n</i>	Φ (eV)	<i>n</i>	R_s (k Ω)	Φ (eV)	R_s (k Ω)	Φ (eV)	R_s (k Ω)
1.41	0.84	8.3	0.32	0.91	0.33	0.96	44,5

D1 numaralı Ni/Pentacene/n-Si/Al heteroeklem diyodunun oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafiği kullanılarak farklı yöntemler ile hesaplanan idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ) ve seri direnç (R_s) değerleri Çizelge 2’de verilmiştir. Çizelge 2’deki veriler incelendiğinde, TE metodu ile hesaplanan idealite faktörü değeri Cheung metodu ile hesaplanan idealite faktörü değerinden daha küçüktür (daha ideal). Bu durum geleneksel metot (TE) ile Cheung metodunun I-V grafiğinin farklı bölgelerine fit yapılarak hesaplama yapılmasına, seri direnç etkisine, arayüzey hallerine ve arayüzey tabakası üzerindeki gerilim düşüşüne atfedilebilir (Karataş and Turut 2006; Reddy 2014; Asubay ve ark., 2014; Deniz ve ark., 2018). Çizelge 2’deki verilere göre $dV/d(\ln I)-I$ ile $H(I)-I$ eğrilerinden hesaplanan seri direnç değerleri

arasında benzerlik görülürken, Cheung fonksiyonlarından elde edilen değerler ile Norde fonksiyonlarından elde edilen değerler arasında da farklılıklar vardır. Bu fark, Norde fonksiyonları I-V grafiğinin düz beslem kısmının tamamına uygulanırken Cheung fonksiyonları ile yapılan hesaplamalarda sadece yüksek akım ve yüksek gerilim değerlerinde etkili olan seri direnç bölgesi değerlendirmeye alınmasından kaynaklanmaktadır. Bununla beraber engel yüksekliği değerleri Cheung ve Norde fonksiyonları ile yapılan hesaplamalarda daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, hesaplama metotlarının grafiğin farklı bölgelerine uygulanması ile beraber arayüzey boyunca etkili olan pentacene tabakasının varlığına atfedilebilir (Asubay ve ark., 2014; Deniz ve ark., 2018; Orak ve ark., 2018).



Şekil 8. D1 numaralı Ni/Pentacene/*n*-Si/Al heteroeklem aygıtının N_{ss} - $E_c - E_{ss}$ grafiği

Schottky tipi diyotların düz-beslem I - V karakteristiklerinden hesaplanan engel yüksekliği ve idealite faktörü değerleri yarıiletkenlerde dengede olan arayüzey enerji halleri ile kontrol edilebilir (Deniz ve ark., 2016). Şekil 8’de D1 numaralı Ni/Pentacene/*n*-Si/Al heteroeklem diyodunun arayüzey hal yoğunluğunun (N_{ss}), arayüzey hal enerjisine ($E_{ss} - E_c$) karşı değişimleri verilmiştir. Arayüzey hal yoğunluğu, uygulanan voltaj ile ve silisyumun bant aralığı içindeki bir pozisyona karşılık gelen her bir uygulama voltajı ile değişir. Bu değişimler rekombinasyon merkezindeki azalmaya ve *n*-Si yarıiletken ile pentacene tabakanın arasındaki bir arayüzey tabakasının varlığına atfedilebilir (Yüksel ve ark., 2013). D1 numaralı aygıtın düz beslem I - V grafiğinden elde edilen arayüzey hal yoğunluğu (N_{ss}), 3×10^{15} $\text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ ile 4.8×10^{15} $\text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ arasında değişmektedir. Bu değişim rekombinasyon merkezlerinin azalmasına ve Ni metali ile *n*-Si arasındaki Pentacene organik

malzemesinin oluşturduğu arayüzey elektronik durumlarının varlığına atfedilebilir (Çaldıran ve ark., 2013a).

SONUÇ

Bu araştırma çalışmasında inorganik özellikle *n* tipi silisyum yarıiletkeni (*n*-Si) ile organik yarıiletken özellik gösteren pentacene’den elde edilen Ni/Pentacene/*n*-Si/Al heteroeklem aygıtının elektriksel özellikleri incelendi. Oda sıcaklığında ve karanlıkta yapılan I - V (akım-voltaj) ölçümlerinden idealite faktörü ve engel yüksekliği gibi temel diyot parametreleri TE metodu ile hesaplandı. I - V ölçümlerinden elde edilen grafikten ters beslemde aygıttan hemen hemen akım geçmediği ve düz beslemde düşük gerilim değerlerinde akım değerlerinin lineer olarak arttığı gözlemlendi. Düz beslem altında lineer bölgeden yapılan hesaplamada, elde edilen sekiz farklı aygıtın benzer özellik gösterdiği ve engel yüksekliği değerlerinin 0.77 ev ile 0.84 eV arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Bu

sonuçlardan Ni/Pentacene/n-Si/Al heteroeklem aygıtının Schottky tipi doğrulma özelliğine sahip olduğunu ve Pentacene malzemesinin Ni ile *n*-Si arasında yüksek engelin oluşmasını sağladığını görülmüştür. Ni/Pentacene/n-Si/Al aygıtının (D1) düz beslem logI-logV grafiği çizilmiş bu grafiğin iki farklı bölgelerden oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu bölgeler düşük voltajlarda omik iletkenliği ve yüksek voltajlarda SCL (space charge limited) iletkenliğini göstermektedir. D1 numaralı Ni/Pentacene/n-Si/Al aygıtının TE metodunun yanı sıra Norde ve Cheung yöntemleri ile de idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri hesaplanmıştır. Norde ve Cheung yöntemleri ile yapılan hesaplanmalarda D1 numaralı Ni/Pentacene/n-Si/Al aygıtının idealite faktörü ve seri direnç değerleri TE metodundan elde edilen değerlerden farklı çıkmıştır. Oluşan bu fark *I-V* grafiğinin farklı bölgeleri dikkate alarak yapılan hesaplamaya, seri direnç etkisine ve ara yüzey durumlarına atfedilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Ardahan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) ile desteklenmiştir (Proje no: 2018/005).

KAYNAKLAR

Alahmed ZA, Mansou SA, Aydın ME, Yakuphanoglu F, 2013. Hybrid photodiodes based on 6,13-bis(triisopropylsilylethynyl) pentacene:poly[2-methoxy-5-(2ethyl)hexoxy-phenylenevinylene]/p silicon. *Solid State Communications*, 163:23-27.

Asubay S, Genisel MF, Ocak YS, 2014. Electrical parameters of a DC sputtered Mo/n-type 6H-SiC Schottky barrier diode. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 28, 94–97.

Aydoğan Ş, İncekara Ü, Türüt A, 2010. Determination of contact parameters of Au/Carmine/n-Si Schottky device. *Thin Solid Films*, 518:7156–7160.

Aydoğan S, Sağlam M, Türüt A, 2008. Reverse bias capacitance–voltage characteristics of Al/polyaniline/p-Si/Al structure as a function of temperature. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354: 4991–4995.

Brutscher N, Hoheise M, 1988. Schottky diodes with high series resistance: A simple method of determining the barrier heights. *Solid-State Electronics*, 31:87-89.

Çaldıran Z, 2013b. Au/Antrakinon/p-Si/Al Schottky Diyodun Temel Karakteristik Parametrelerinin Sıcaklığa Bağlı I-V (Akım-Voltaj) ve C-V (Kapasite-Voltaj) Ölçümlerinden Tayin Edilmesi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış).

Çaldıran Z, Aydoğan Ş, Yesildag A, Ekinci D, Kurudirek SV, Türüt A, 2015. Temperature-dependent current–voltage measurements of Au/C9H7N/p-Si: Characterization of a metal–organic–semiconductor device. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 34:58–64.

Çaldıran Z, Deniz A.R, Aydoğan Ş, Yesildag A, Ekinci D, 2013a. The barrier height enhancement of the Au/n-Si/Al Schottky barrier diode by electrochemically formed an organic Anthracene layer on n Si. *Superlattices and Microstructures*, 56:45–54.

Çaldıran Z, Deniz AR, Şahin Y, Metin Ö, Meral K, Aydoğan Ş, 2013c. The electrical characteristics of the Fe₃O₄/Si junctions. *Journal of Alloys and Compounds*, 552:437–442.

Cheung SK, Cheung NW, 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Appl. Phys. Lett.*, 58:382.

Deniz AR, Çaldıran Z, Biber M, İncekara Ü, Aydoğan Ş, 2018. Investigation of electrical properties of Ni/Crystal Violet (C₂₅H₃₀CIN₃)/n-Si/Al diode as a function of temperature. *Journal of Alloys and Compounds*, 763:622-628.

- Deniz AR, Çaldıran Z, Metin Ö, Meral K, Aydoğan Ş, 2016. The investigation of the electrical properties of Fe₃O₄/n-Si heterojunctions in a wide temperature range. *Journal of Colloid and Interface Science*, 473:172–181.
- Hendi AA, Orainy RH, 2014. Rectifying properties of TIPS-pentacene:rhodamine blend organic semiconductor-on-p-silicon diodes. *Synthetic Metals*, 193:31–34.
- Karabulut A, Orak İ, Türüt A, 2018a. The photovoltaic impact of atomic layer deposited TiO₂ interfacial layer on Si-based photodiodes. *Solid State Electronics*, 144:39–48.
- Karabulut A, Orak İ, Canlı S, Yıldırım N, Türüt A, 2018b. Temperature-Dependent Electrical Characteristics of Alq₃/p-Si Heterojunction. *Physica B: Condensed Matter*, 550, 68-74.
- Karataş, Ş. and Türüt, A., 2006. The determination of electronic and interface state density distributions of Au/n-type GaAs Schottky barrier diodes. *Physica B*, 381, 199-203.
- Koçyiğit A, Karteri İ, Orak I, Uruş S, Çaylar M, 2018. The structural and electrical characterization of Al/GO-SiO₂/p-Si photodiode. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 103:452–458.
- Mönch W, 1988. *Phys. Rev. B*, 37:7129–7132.
- Mott NF, Gurney RW, 1940. *Electronic Processes in Ionic Crystals*, Dover Public., Inc., New York.
- Neamen D.A, 1992. *Semiconductors Physics and Devices*, R. R. Donnelley & Sons Company, Sydney.
- Orak İ, Koçyiğit A, 2016. The Electrical Characterization Effect of Insulator Layer between Semiconductor and Metal. *Iğdır Üni. Fen Bilimleri Enst. Der./Iğdır Univ. J. Inst. Sci. & Tech.* 6(3): 57-67.
- Orak İ, Koçyiğit A, Karataş Ş, 2018. The Analysis of the Electrical and Photovoltaic Properties of Cr/p-Si Structures Using Current-Voltage Measurements. *Silicon* (2018) 10:2109–2116.
- Oyama N, Takanashi Y, Kaneko S, Momiyama K, Suzuki K, Hirose F, 2011. Pentacene/n-Si heterojunction diodes and photovoltaic devices investigated by I–V and C–V measurements. *Microelectronic Engineering*, 88:2959–2963.
- Reddy, V.R., 2014. Electrical properties and conduction mechanism of an organic-modified Au/NiPc/n-InP Schottky barrier diode. *Applied Physics A*, 116, 1379-1387.
- Tataroğlu A, Ahmedova C, Barim G, Al-Sehemi A, Karabulut A, Al-Ghamdi A, Farooq WA, Yakuphanoglu F, 2018. Electronic and optoelectronic properties of Al/coumarin doped Pr₂Se₃-Ti₂Se/p-Si devices. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 29(15), pp. 12561-12572.
- Tung R.T, 2001. *Mater. Sci. Eng. Rep R Rep.*, 35:1–138.
- Türüt A, Karabulut A, Efeoğlu H, 2017. Electrical characteristics of atomic layer deposited Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS structures over a wide measurement temperature. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 19(5-6), pp. 424-433.
- Yılmaz M, Cirak BB, Aydoğan S, Grilli ML, Biber M, 2018. Facile electrochemical-assisted synthesis of TiO₂ nanotubes and their role in Schottky barrier diode applications. *Superlattices and Microstructures*, 113:310–318.
- Yüksel ÖF, Tuğluoğlu Gülveren NB, Safak H, Kus M, 2013. Electrical properties of Au/perylene-monoimide/p-Si Schottky diode. *Journal of Alloys and Compounds*, 577:30–36.