DÜMF Mühendislik Dergisi
web: http://dergipark.gov.tr/dumf

Al/Nigrosin/p-Si Yapıların Fabrikasyonu ve Temel Diyot Parametrelerinin Hesaplanması

Ömer GÜLLÜ*
Batman Üniversitesi, Fizik Bölümü, Batman
omer.gullu@batman.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3785-6190, Tel: (488) 217 42 22

Geliş: 13.12.2017, Kabul Tarihi: 15.02.2018

Öz

Bu çalışmada π bağları açısından zengin organik molekülün (Nigrosin (NIG)) optik özellikleri UV-Vis yöntemiyle belirlendi. Cam altlık üzerinde damlatma yöntemi ile büyütülen NIG ince tabakasının direkt yasak enerji değerleri; 1,42 eV (Q bandı) ve 2,94 eV (B bandı) olarak rapor edildi. Oluşturulan referans Al/p-Si ve Al/NIG/p-Si Metal/Organik aratabaka/Yarıiletken (MIS) yapılarının I-V ölçümleri sonunda tüm yapıların doğrultucu özelliğe sahip oldukları gözlemlendi. Oda sıcaklığında alınan I-V ölçümleri kullanılarak yapıların karakteristik diyot özellikleri belirlendi. Burada Al/NIG/p-Si diyotunun kapasitör özelliği, C-V ölçümleri alınarak incelendi ve yapılan hesaplamalar sonucunda bazı diyot parametreleri elde edildi. Elde edilen sonuçlar, π bağları açısından zengin olan NIG gibi organik malzemelerin elektronik sahasında kullanılabileceğini gösterdi.

Anahtar Kelimeler: *Nigrosin, MIS diyot, I-V, C-V*

* Yazışmaların yapılacağı yazar

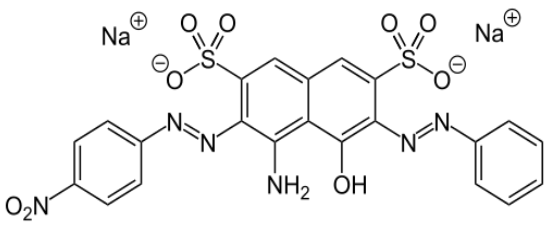
DOI:

Giriş

Organik molekül içeren metal-yarıiletken (Schottky) kontakların yapımı ve karakterizasyonu bilim dünyasında yeni bir araştırma konusu olmuştur. Organik moleküller, elektronik sahasında çokça kullanılabilir ve bu moleküller, basit üretimi, ucuz olması ve büyük yüzeylere kaplanmasından ötürü önemli avantajlar sağlamaktadır (Shaw ve Seidler, 2001; El-Nahass vd., 2007a). Schottky yapısının özellikleri, metal-organik yarıiletken kontağının yüzey/arayüzey durumlarına sıkı bir şekilde bağlıdır. Metal ile organik tabaka arasındaki yüzey/arayüzey durumlarının bilinmesi, yarıiletken teknolojisi için önemli bir yere sahiptir. Schottky kontakların yüzey/arayüzey durumları, yarıiletken yapının verimliliğini doğrudan etkiler (Yakuphanoglu, 2007a). Schottky kontakların temel diyot parametreleri çoğunlukla yapıdaki yüzey/ara yüzey durumlarıyla belirlenir. Ne kadar hassas üretim olursa olsun metal ile yarıiletken tabaka arasında mutlaka oksit film meydana gelir. Bu oksit film metal/yarıiletken diyotları, metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) kontak yapısına dönüştürür ve diyot parametrelerine çok büyük etkide bulunur (Rhoderick ve Williams, 1988).

Birçok araştırmacı organik ve inorganik malzemelerin önemli avantajlarından yararlanmak için metal-organik film-inorganik yarıiletken MIS yapıları kullanmışlardır (Akkılıç vd., 2010; Antohe vd., 1991; Aslan vd., 2015; Cakar vd., 2004 ; El-Nahass vd., 2005; El-Nahass vd., 2007b; Farag vd., 2009 ; [24] Forrest vd., 1982; Forrest, 1986; Güllü ve Türüt, 2008; Gullu, 2010a; Gullu vd., 2010b; Güllü vd., 2010c; Janardhanam vd., 2014; Kiliçoğlu , 2008; Ocak vd., 2009; Onganer vd., 1996; Hamidi, 2011; Kampen vd., 2002; Özden vd., 2016; Yakuphanoglu vd., 2007b; Vearey-Roberts ve Evans, 2005; Yakuphanoglu vd., 2011) ve bu yapılar ile Schottky diyotlar, güneş pilleri, fotodiyotlar ve sensörler elde edilebileceğini göstermişlerdir. Güllü ve Türüt (Güllü vd., 2010c), quercetin/p-InP diyotunu çözelti tekniğiyle oluşturdu ve akım–voltaj (*I-V*) ve kapasite–voltaj (*C-V*) tekniklerini kullanarak yapıyı inceledi. I-V ölçümleri kullanılarak bu diyot için Schottky engeli yüksekliği (*SEY veya* Φ_b) ve idealite faktörü (n) sırasıyla 0,86 eV ve 3,20 olarak hesapladılar. C-V ölçümlerinden bu diyot için engel yüksekliği ve akseptör yoğunluğu parametreleri 1,63 eV ve $3{,}8\times10^{17}$ cm^{-3} şeklinde bulundu. Seri direnç (R_s) hesabında Cheung yöntemi tercih edildi. Yine, Güllü ve Türüt (2008), Al/ Congo Red= CR/p-Si (MIS) diyotunu yaptı. *I-V* ölçümlerinden *n* ve *SEY* parametreleri sırasıyla 1,68 ve 0,75 eV olarak buldular. CR organik filmi, Silisyumun deplasyon tabakasını etkileyerek diyotun etkin engel değerini yükseltti. MIS yapının ara yüzey-seviye konsantrasyonu $1{,}24x10^{13}$ - $2{,}44x10^{12}$ $eV^{-1}cm^{-2}$ aralığında değiştiği bulundu. Elde edilen 0,75 eV değeri, normal Al/p-Si kontakların engel yüksekliği değeri olan 0,50 eV değerinden oldukça yüksektir. Hamidi (2011), Al/Tips:MEHPPV/p-Si kontağını elde ederek bu kontağın temel parametrelerini karanlıkta ve ışık altında ölçmüştür. Karanlık şartlarda potansiyel engeli 0,79 eV ve idealite faktörü 7,43 iken, aydınlık şartlarda ise potansiyel engeli 0,86 eV ve idealite faktörü 8,02 olarak rapor edilmiştir. Yapıya ait idealite değerinin 1'den fazla çıkması, yüzey/arayüzey seviyelerinin varlığıyla izah edilmiştir. Üstelik diyotun ışığa karşı hassas olduğu ve fotodiyot özelliği sergilediği görülmüştür.

Bu çalışmanın amacı, π-bağları açısından zengin olan Şekil 1'de molekül hali gösterilen Nigrosin ($C_{22}H_{14}N_6Na_2O_9S_2$) (NIG) organik molekülünü kullanarak Al/NIG/p-Si MIS diyot yapısını meydana getirmek ve üretilen Al/NIG/p-Si kontağının temel diyot parametrelerini (n, Φ_b ve R_s) hesaplamaktır.



Şekil 1. Nigrosin (NIG)'in kimyasal bileşik yapısı

Materyal ve Yöntem

Organik Moleküllerin İnce Filmlerinin Optik Özelliklerinin Ölçülmesi

Nigrosin organik malzemesinin ince filmi mikroskop camı altlık üzerine altlığın temizlik aşamalarından sonra damlatma yöntemi ile kaplandı. Cam altlık için temizlik aşamaları;

i-Trikloroetilende 5 dak. kaynatma
ii-Asetonda ultrasonik olarak 5 dak. yıkama
iii-Metanolde ultrasonik olarak 3 dak. yıkama

şeklindedir. Her aşamadan sonra deiyonize saf su ile yıkama yapıldı. Daha sonra azot gazı ile kurutulan altlık üzerine Nigrosin çözeltisi damlatma (drop cast) tekniği ile kaplandı. Kaplanan filmler kuruması için oda sıcaklığında 1 (bir) gün bekletildi.

Numunelerin optik soğurma (*A*) spektrumları ölçümleri için Batman Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuarında bulunan bilgisayar kontrollü ve 190-1100 nm aralığında ölçüm yapan Shimadzu 3600 UV/VIS spektrofotometresi kullanıldı. Numunelerin soğurma ölçümlerinden temel soğurma gösterdikleri aralıkta yasak enerji aralıkları (E_g) belirlendi.

Kristallerin Temizlenmesi

Bu makalede p-tipi Si (100) yarıiletken kristal kullanıldı. Kristal geleneksel temizleme yöntemi (RCA) kullanılarak, organik ve kimyasal kirlerden arındırıldı.

Metal/Organik/Yarıiletken Diyotların Hazırlanması

İlk önce NANOVAK NVTS-350 vakum sisteminde 2 x 10^{-5} torr basınç altında, p-Si kristalinin parlak olmayan yüzüne %99,99 saflıkta Al metali buharlaştırılarak omik kontak yapısı elde edildi. Daha sonra bu kristal, azot (N_2) gazı ortamında 500 $^{\circ}$C' de 3 dk. ısıl işleme tabi tutularak omik kontak yapımı tamamlandı.

Daha sonra kristal iki kısma bölündü. p-Si kristalinin parlak yüzüne 10 ml etanol içine 0,02 g NIG eklenerek elde edilen 20 µl NIG çözeltisi damlatma yöntemi kullanılarak NIG organik ince tabaka oluşturuldu. Bu aşamadan sonra NIG/p-Si/Al yapısında NIG organik filminin üzerine vakum sistemi kullanırak 2 x 10^{-5} torr basınç ortamında Al buharlaştırılarak 1mm çapında Al/NIG/p-Si/Al MIS diyotlar üretildi. NIG organik ince tabakanın optik özelliklerini ortaya çıkarmak için kimyasal olarak temizlenen mikroskop camı üzerine, kristal üzerinde oluşturmak için daha önceden yapılan NIG çözeltisinden 20 µl damlatıldı ve NIG ince tabaka üretildi. NIG organik ince tabakanın etkisini araştırmak için, diğer kristal kullanılarak Al/p-Si kontrol diyotları da aynı vakum şartlarında beraber oluşturuldu.

Deneysel Ölçme

Diyotların *I-V* ve *C-V* karakteristikleri, KEITHLEY 4200 SCS ölçüm sistemi kullanılarak ortaya çıkarıldı.

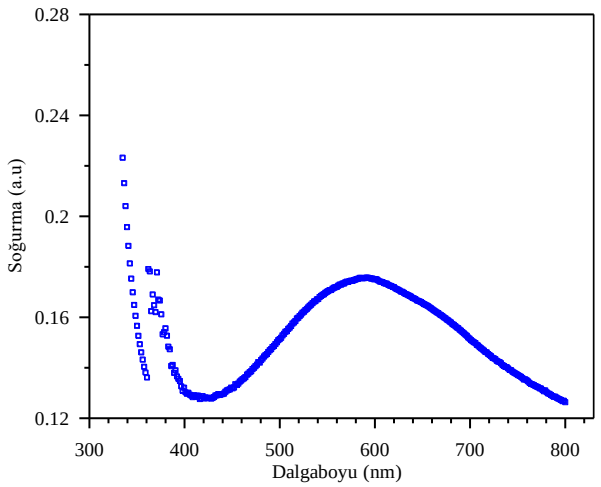
SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Yarıiletkenler malzemelerin band aralığını ortaya çıkarmak için en yaygın tekniklerden birisi optik soğurmadır (Farag vd., 2009; Yakuphanoglu vd., 2007b). Çünkü bu ölçüm alınırken malzeme hasara uğramaz. Mikroskop camı üzerinde oluşturulan NIG tabakasının soğurma spektrumu, Shimadzu 3600 UV/VIS spektrometresi kullanılarak ölçülmüş olup Şekil 2'de gösterildi. Bu soğurma spektrumu, NIG organik tabakasına ait Q ve B (Soret) bandı şeklinde isimlendirilen 2 adet soğurma piki içermekte olup literatürle uyum göstermektedir. Şekil 2'de yaklaşık 580 nm yakınında beliren pik Q bandı şeklinde ve 370 nm yakınında beliren pik ise B bandı şeklinde adlandırılır. Yarıiletken malzemelerin optik band enerji aralıkları (E_g)

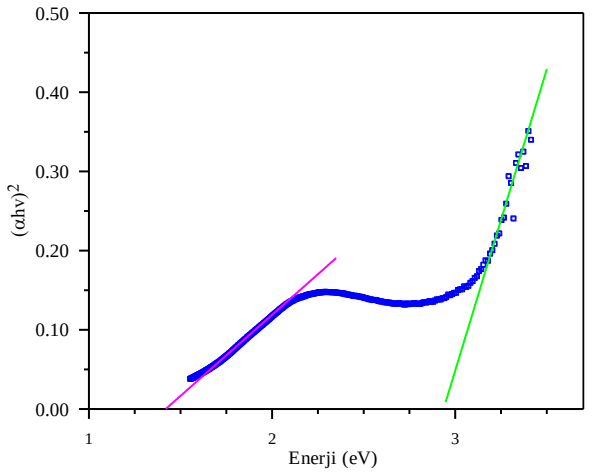
$$\alpha h\upsilon = A(h\upsilon - E_g)^m \qquad (1)$$

denklemi (Tauc bağıntısı) ile belirlenebilir (Farag vd., 2009; Yakuphanoglu vd., 2007b). Bu ifadede α soğurma katsayısı, A sabit sayı, h

Plank sabiti ve m direkt band için ½ ve dolaylı band için 2'dir**.** (1) eşitliğinden istifade edilerek, $(\alpha hv)^2$-hv değişimi Şekil 3'te gösterildi. Burada 2 banda ait doğrusal bölge açıkça ortaya çıkmaktadır. Şekil 3 te gösterilen NIG organik filmine ait iki bantla ilişkili $(\alpha hv)^2$ değerlerinin doğrusal olduğu kısımların uzantısının hv eksenini kestiği noktalardan doğrudan (direkt) yasak enerji bandı değerleri elde edildi. Mikroskop camı üzerindeki NIG organik tabakanın direkt yasak enerji bandı değerleri; 1,42 eV (Q bandı) ve 2,94 eV (B bandı) şeklinde hesaplandı. Bu değerler Tablo 1'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Mikroskop camı üzerinde oluşturulan NIG organik tabakanın soğurma ölçümü



Şekil 3. Mikroskop camı üzerindeki NIG organik tabakanın $(\alpha hv)^2$-hv grafiği

Tablo 1. NIG organik tabakasına ait direkt yasak enerji bandı değerleri.

Malzeme	Q bandı (E_{g1})	B bandı (E_{g2})
NIG	1,42 eV	2,94 eV

Şekil 4'te kontrol ve Al/NIG/p-Si kontaklarının lnI-V eğrileri görülmektedir. Bu şekilde organik NIG tabakasının MIS yapılarda akımı büyük ölçüde azalttığı görülmektedir. Diyot akımındaki düşüş, NIG organik tabakası, tabii olarak oluşan oksit film ve kontak arayüzey tabakasından dolayı ortaya çıkar. Ayrıca Şekil 4'te gösterilen referans ve metal/organik/yarıiletken yapılarının *I-V* ölçümleri sonunda tüm yapıların doğrultucu özelliğe sahip oldukları gözlemlendi. Bir kontağa *V* gerilimi uygulanırsa, diyot boyunca akan akım (Rhoderick ve Williams, 1988; Sze ve Ng, 2007),

$$I = I_0 \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) \qquad (2)$$

şeklinde verilir. Bu denklemde, q elektron yükü, k Boltzmann sabiti, T sıcaklık(K) ve I_0 ters beslem doyum akımı olup,

$$I_0 = SA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{kT}\right) \qquad (3)$$

şeklinde bir ifadeye sahiptir. Bu eşitlikte S kontak yüzey alanı, A^* p-Si için değeri 32 $Acm^{-2}K^{-2}$ olan Richardson sabitidir (Rhoderick ve Williams, 1988; Sze ve Ng, 2007).

Bir MIS kontağın n değeri, In*I-V* değişiminin ileri beslem bölgesinin doğrusal kısmının eğiminden

$$n = \frac{q}{kT}\frac{dV}{d\ln(I)} \qquad (4)$$

denklemi yardımı ile hesaplanır. Hesaplanan idealite faktörleri Tablo 2'de verilmektedir. Kontaklarda n değerinin 1'den büyük çıkması, ideallik durumundan uzaklaşmayı temsil eder. Üretilen diyotlardaki bu ideallikten sapmalar genelde üretim sırasında oluşmuş olabilecek arayüzey oksit tabakasına, yüzey/ara yüzey

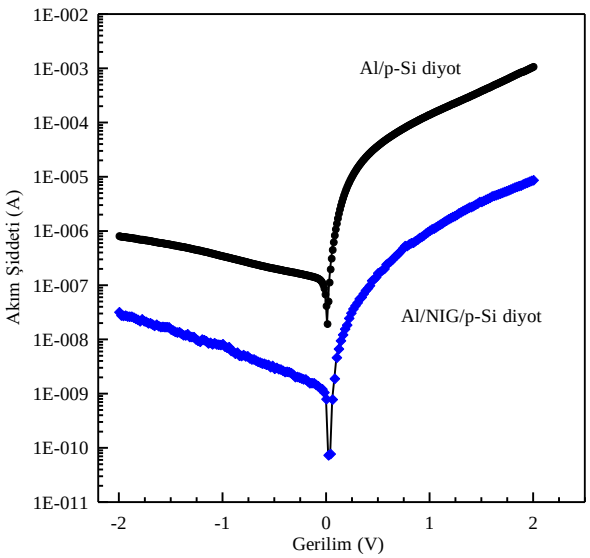
hallerine ve R_s etkisinden ortaya çıkar (Rhoderick ve Williams, 1988; Sze ve Ng, 2007). Bazı araştırmacılar (Gullu, 2010a; Gullu vd., 2010b; Kiliçoğlu, 2008) ideallikten sapmaya neden olarak organik ara yüzey tabakası ile ikinci bir mekanizmanın arayüzeyde oluşmasını gösterirken, bazı yazarlar (Yakuphanoglu, 2007c) tükenim bölgesinde elektron ve boşlukların rekombinasyonuna ve bir potansiyel altında kontaktaki difüzyon akımının yükselmesine atfetmişlerdir.

Diyotlara ait engel yükseklikleri, ileri beslem bölgesindeki ln*I*–*V* değişimlerinden I_0 değeri bulunarak,

$$\phi_b = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{SA^*T^2}{I_0}\right) \quad (5)$$

formülü ile hesaplanabilir. Hesaplanan engel yükseklikleri Tablo 2'de verildi. İleri beslem bölgesi için lnI-V tekniği kullanılarak, Al/p-Si ile Al/NIG/p-Si diyotlarının Φ_b parametreleri sırasıyla 0,671eV ve 0,797eV olarak hesaplandı. Güllü ve Türüt (2008) daha önceki yıllarda Al/CR/p-Si MIS diyotu üretti. Üretilen Al/CR/p-Si diyot yapısının doğrultucu karaktere sahip olduğu rapor edildi. ln*I*-*V* değişimleri kullanılarak *n* ve Φ_b değerleri Al/CR/p-Si (MIS) yapısı için sırasıyla 1,68 ve 0,75 eV şeklinde hesaplandı. Bununla birlikte Hamidi (2011), Al/Tips:MEHPPV/p-Si diyotunu elde ederek bu diyotun temel parametrelerini karanlıkta ölçmüştür. Karanlık ortamda Φ_b değerini 0,79 eV ve *n* değerini de 7,43 olarak elde etmiştir. Cakar vd. (2004), Au/pironin-B/p-Si diyotunun engel yüksekliklerini 0,674 eV olarak hesaplamışlardır. Yine, Yakuphanoglu vd. (2007b), p-Si/CuPc/Au diyotunun karanlık ve ışık altındaki elektriksel özelliklerini araştırmıştır. Yakuphanoglu vd. (2007b), p-Si/CuPc/Au yapının *n* değerini 2,38 ve Φ_b değerini de 0,71 eV olarak rapor etmiştir. Kampen vd. (2002), Ag/n-GaAs yapılarda H ile pasife edilmiş n-GaAs yüzeylerde organik madde kalınlığının bir fonksiyonu olarak engel yüksekliğinin azaldığı ve sülfür ile pasife edilmiş yüzeylerde engel yüksekliğinin önce attığı ve daha sonra azaldığı rapor edilmiştir. Birçok araştırmacı tarafından farklı metal ve organik bileşiklerle yapılan araştırmalarda birbiriyle bağlantılı neticeler bildirilmiştir. Bütün bu araştırmalar, organik ara tabakaların MIS yapıların elektronik ve optik özelliklerinde çok önemli değişimlere yol açtığını göstermiştir.

ln*I*–*V* çizimlerinden de görüldüğü gibi, ln*I*–*V* değişimleri ileri beslem bölgesinde yüksek voltajlarda doğrusallıktan sapma göstermektedir. Bu durum, diyotlardaki R_s seri direnç etkisinden kaynaklanmaktadır. Cheung ve Cheung (1986), diyotların R_s değerlerini hesaplamak için bir teknik kullanmıştır.



Şekil 4. Al/p-Si kontrol ve Al/NIG/p-Si/Al kontaklarının akım-gerilim eğrileri.

Cheung metodunda;

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = IR_s + n\left(\frac{kT}{q}\right) \quad (6)$$

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q}\right)\ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (7)$$

$$H(I) = IR_s + n\phi_b \quad (8)$$

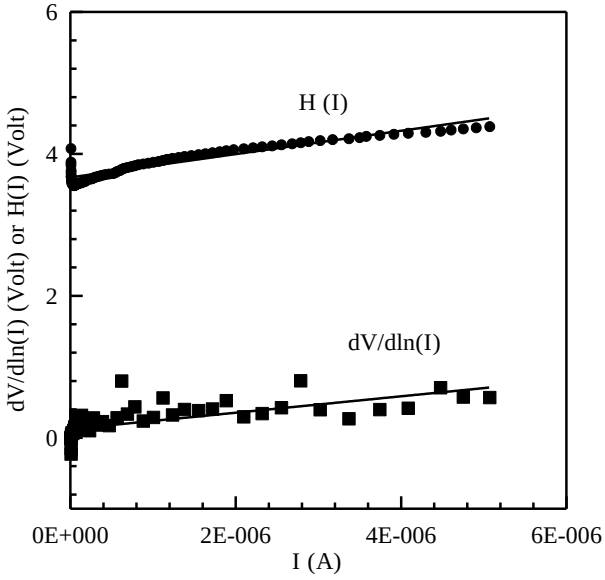
formüllerini önermiştir.

Şekil 5 ve 6'da Al/NIG/*p*-Si ve Al/p-Si kontrol diyotunun d*V*/d*lnI*–*I* ve *H(I)*–*I* grafikleri gösterilmektedir. Bu diyotlar için seri direnç bölgesinde çizilen d*V*/d*lnI*–*I* ve *H(I)*–*I*

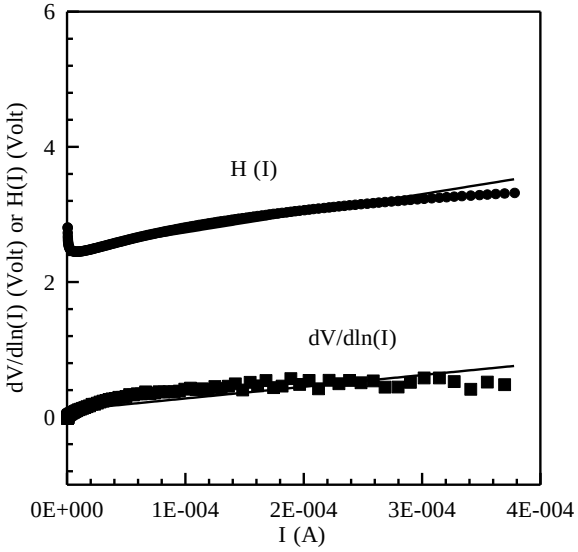
eğrilerinin lineer oldukları gözlemlendi. d*V*/d(ln*I*)–*I* eğrilerinin eğim ve kesim değerlerinin analiziyle R_s ve *n(kT/q)* değerleri elde edilir. Aynı yöntem kullanılarak *H*(*I*)–*I* grafiklerinin eğim ve kesim değerlerinin analiziyle R_s ve Φ_b değerleri hesaplanır. Burada hesaplanan seri direçler iki yöntemin doğru olup olmadığını test etmek için kullanılır. Cheung metoduyla bulunan parametreler Tablo 2'de gösterilmiştir. Burada d*V*/d*lnI*–*I* ve *H(I)*–*I* grafiklerinden bulunan R_s değerlerinin birbirine yakın çıkması bu metotlardan hesaplanan sonuçların mantıklı olduğunu gösterir. d*V*/d*lnI*–*I* ve *H(I)*–*I* yöntemleri ile elde edilen idealite faktörü, ln*I*-*V* grafiğinden hesaplanan idealite faktöründen daha büyüktür. Bu farklılık kontağın seri direnç etkisine, yüzey/arayüzey seviyelerinin etkisine ve arayüzey tabaka üzerinde potansiyel düşüşüne atfedilebilir (Gullu vd., 2010b; Ocak vd., 2009). ln*I*-*V* eğrisi ile Cheung fonksiyonları ile hesaplanan engel yükseklikleri arasında farkların olması ise yöntem farklılığı, organik tabakanın kalınlığı, kontak üretimi aşamasında kaçınılmayan tabii oksit+organik tabakaların etkisi ve ara yüzey durumlarının etkisine atfedilebilir (Gullu vd., 2010b; Kiliçoğlu, 2008; Ocak vd., 2009).

Tablo 2. Diyotların bazı karakteristik parametreleri

Yapı		Al/p-Si	Al/NIG/p-Si
Ideality factor		1,722	2,369
Engel yüksekliği (eV)	lnI-V	0,671	0,797
	Cheung fonk.	0,617	0,780
	Norde fonk.	0,692	0,811
Seri Direnç (kΩ)	Norde fonk.	3,4	689,2
	dV/dlnI	1,7	294,5
	H(I)-I	2,8	164,4



Şekil 5. Al/NIG/p-Si/Al MIS yapısına ait Cheung fonksiyonu eğrileri.



Şekil 6. Al/p-Si control diyot yapısına ait Cheung fonksiyonu eğrileri.

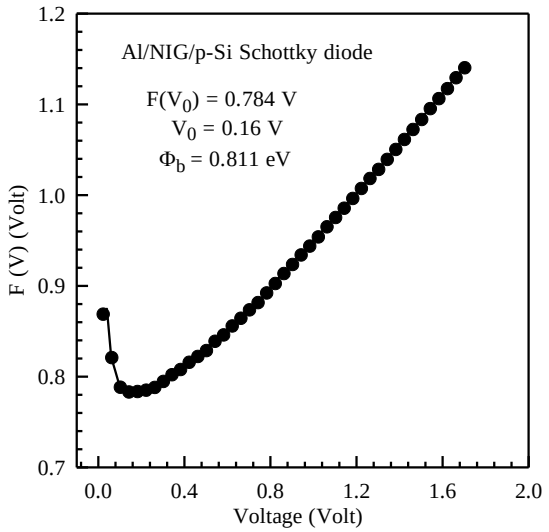
Engel yüksekliği ve seri direnç parametreleri Norde (1979) tarafından geliştirilen bir yöntemle bulunabilir. Norde fonksiyonları aşağıda verilmiştir.

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q}\left(\frac{I(V)}{AA^{*}T^{2}}\right) \qquad (9)$$

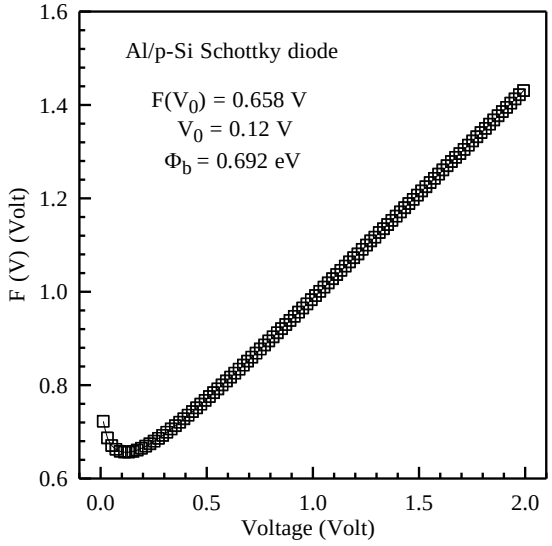
Burada γ idealite faktöründen büyük ilk tam sayıdır. I(V) ise *I–V* ölçümlerinden alınan gerilime bağlı akım değeridir. Engel yüksekliğini hesaplamak için *F(V)-V* grafiğinden F(V) fonksiyonunun en küçük değerinden faydalanılır.

$$\phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \qquad (10)$$

$$R_s = \frac{kT(\gamma - n)}{qI} \qquad (11)$$



Şekil 7. Al/NIG/p-Si/Al MIS diyota ait F(V)-V değişimi



Şekil 8. Al/p-Si kontrol diyotuna ait F(V)-V değişimi

Şekil 7 ve 8'de Al/NIG/*p*-Si ve Al/p-Si control diyotunun F(V)–V grafikleri gösterilmektedir. Bu grafikler ve Norde fonksiyonlarından elde edilen parametreler Tablo 2'de verildi. Burada elde edilen engel yüksekliği değerleri birbirlerinden farklı bulundu. Bunun nedeni metotların bu büyüklükleri hesaplamada yaklaşımlarının farklı olmasıdır.

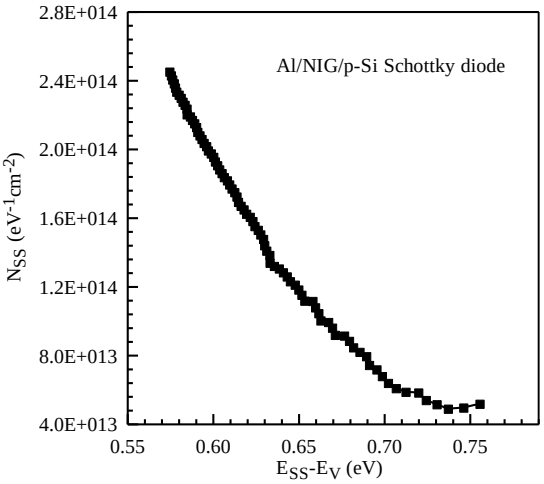
MIS yapıların elektronik özellikleri, onların arayüzey tabakası tarafından etkilenir. Bu amaçla diyotlar için N_{ss} ile verilen arayüzey hal yoğunluğunu hesaplamak büyük bir gereksinim ortaya çıkarmaktadır. Bu değer,

$$N_{ss} = \frac{1}{q}\left[\frac{\varepsilon_i}{\delta}\left(n(V) - 1\right) - \frac{\varepsilon_s}{w}\right] \qquad (12)$$

ile verilir (Card ve Rhoderick, 1971). Bu ifadede ε_i ve ε_s sırasıyla arayüzey tabakasının ve yarıiletkenin dielektrik geçirgenliği, δ arayüzey tabakasının kalınlığı (17,2 Å) ve *w* deplasyon bölgesinin genişliği ($11{,}9\times10^{-5}$ cm) ve $n(V) = V/(kT/q)\ln(I/I_0)$ olup gerilime bağlı idealite faktörüdür. P tipi yarıiletkenler için yarıilettkenin valans bandının tepesine göre, arayüzey seviyelerinin enerjisi olan E_{ss};

$$E_{ss} - E_v = q\phi_b - qV \qquad (13)$$

ile verilir. Diyotlara ait I-V grafiklerindeki veriler ve n(V) ve denklem 12'deki veriler kullanılarak hesaplama yapıldığında Şekil 9'da görülen N_{ss} nin E_{ss}-E_v ye karşı grafiği ortaya çıkar. Bu grafikte arayüzey hallerinin yoğunluğu artan E_{ss}-E_v değerleriyle azalmaktadır. Bu değerler literatürdeki diğer çalışmalarla uyum içerisindedir.



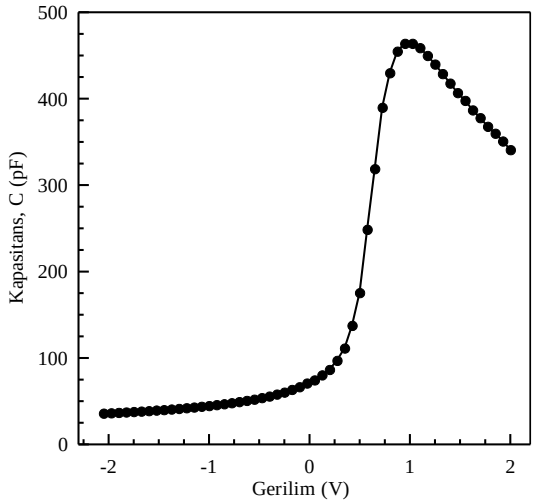
Şekil 9. Al/NIG/p-Si yapı için N_{ss} nin E_{ss}-E_v ye karşı değişimi

Kapasitans-voltaj (C-V) ölçümü, MIS yapıların en önemli karakterizasyon tekniklerinden biridir. MIS kontakların C-V ölçümü, diyotun yüzey/ara yüzey hallerinden önemli ölçüde etkilenir (Rhoderick ve Williams, 1988; Sze ve Ng, 2007). Bu kısımda Al/NIG/p-Si diyotunun kapasitör özelliği incelendi. Al/NIG/p-Si diyotuna ait C-V grafiği 500kHz frekansta ve -2V ile 2V aralığında gösterilmektedir (Şekil 10). Şekilden görüleceği üzere Al/NIG/p-Si MIS kontağının kapasitans değerleri gerilim arttıkça önce artmakta, düz beslem durumunda ise azalmaktadır. Buradaki azalma arayüzey tabakasına, seri direnç etkisine ve diyotun iletkenlik durumuna geçmesi durumuna atfedilir.

Al/NIG/p-Si MIS kontağına ait bazı temel diyot değerleri negatif gerilim bölgesindeki $1/C^2$–V grafiğinden de bulunabilir. Uygulanan ters gerilime bağlı olarak deplasyon kısmındaki yükün değişimi, kapasite değerinde bir değişime yol açar. MIS kontaklarda meydana gelen kapasitans değeri (Fonash, 1983; Rhoderick ve Williams, 1988; Sze ve Ng, 2007),

$$\frac{1}{c^2} = \frac{2(V_d+V)}{e\varepsilon_0 A^2 N_a} \qquad (14)$$

şeklinde ifade edilir.

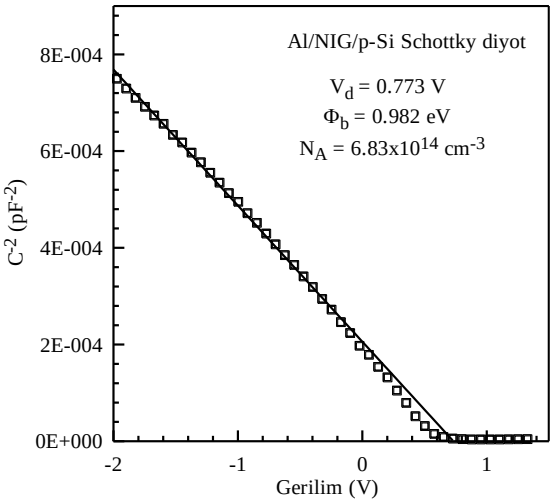


Şekil 10. Al/NIG/p-Si diyotuna ait C-V grafiği

Bu denklemde A MIS kontağın yüzey alanı, ε_0 boşluğun dielektrik katsayısı, V_d ise diyotun difüzyon potansiyeline karşılık gelen gerilim değeridir. Şekil 11, Al/NIG/p-Si kontağının 500 kHz frekanstaki $1/C^2$-V eğrisini göstermektedir. Kontağın engel potansiyeli aşağıda verilen ifade kullanılarak bulunabilir.

$$\emptyset_b(\boldsymbol{C-V}) = \boldsymbol{V_d/n + E_f} \qquad (15)$$

Bu denklemde verilen E_f değeri, p-tipi kristalin bant yapısındaki Fermi seviyesidir.



Şekil 11. Al/NIG/p-Si MIS kontağının 500kHz frekanstaki $1/C^2$ – V değişimi.

$1/C^2$-V grafiğinin doğrusal bölümünden istifade edilerek gerçekleştirilen hesaplamalar

neticesinde, V_d, N_a ve Φ_b değerleri Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3. C^{-2}-V eğrisinden hesaplanan diyot parametreleri.

Yöntem	V_d (V)	Φ_b (eV)	N_a (cm-3)
C^{-2}-V	0,773	0,982	$6,83x10^{14}$

Tablo 3'ten görüldüğü gibi $1/C^2$-V grafiğinden engel yüksekliğinin değeri Φ_b=0.982 eV olarak hesaplandı. Bu çalışmadaki *I-V* yönteminden elde edilen engel yüksekliği Φ_b=0.797 eV şeklinde bulunmuştu. MIS kontaklarda, düzgün dağılım sergilemeyen potansiyel engel modeline göre, kapasite-gerilim karakteristiklerinden hesaplanan engel değeri, akım-gerilim karakteristiklerinden hesaplanan engel değerinden daha yüksek olur. Çünkü akım-gerilim ve kapasite-gerilim karakteristiklerini ölçmek için kullanılan yöntem farklılık sergiler. Kapasitans değerinin deplasyon kısmındaki potansiyel dalgalanmasına duyarlı olmadığı, bundan dolayı ölçülen engel değerinin, potansiyel engeli dağılımının ortalama değeri olduğu ortaya konmuştur. Oysa diyot üzerinden akan akım potansiyel engeline üstel şekilde bağlı olup, diyotun arayüzey dağılımına oldukça duyarlı olduğu görülmüştür (Rhoderick ve Williams, 1988; Gullu vd., 2010b; Ocak vd., 2009; Yağlıoğlu ve Tüzün, 2014).

SONUÇ

Sonuş olarak bu çalışmada NIG organik malzemesinin optik özellikleri UV-Vis yöntemiyle belirlendi. NIG ince filminin direkt yasak enerji değerleri; 1,42 eV ve 2,94 eV şeklinde hesaplandı. Al/NIG/p-Si ve kontrol diyotlarının akım-gerilim ölçümleri sonucunda bu yapıların karakteristik parametreleri belirlendi. Yine Al/NIG/p-Si diyotuna ait C^{-2}-V grafiklerinin lineer kısmı kullanılarak bazı diyot parametreleri hesaplandı. Elde edilen sonuçlar, yapısında π bağları bulunan NIG gibi organik moleküllerin elektronik sahasında uygulanabileceğini göstermiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenen BTÜBAP-2012-FED-6 numaralı projenin sonuçları kullanılarak hazırlanmıştır. Bu sebeple Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkür ederim.

Kaynaklar

Akkılıç K., Ocak Y.S., Kılıçoğlu T., İlhan S., Temel H., (2010). Calculation of current–voltage characteristics of a Cu (II) complex/n-Si/AuSb Schottky diode, *Current Applied Physics*, 10, 337-341.

Antohe S., Tomozeiu N., Gogonea S., (1991). Properties oft he organic-on-inorganic semiconductor barrier contact diodes In/PTCDI/p-Si and Ag/CuPc/p-Si, *Phys. Stat. Sol. (a)*, 125, 397-408.

Aslan F., Güllü Ö., Ocak Y. S., Rüzgar Ş., Tombak A., Özaydın C., Pakma O., Arsel İ., (2015). Organik arayüzey tabakalı Al/CuPc /p-Inp kontakların fabrikasyonu ve elektriksel parametrelerinin incelenmesi, *Batman University Journal of Life Sciences*, 5, 263-275.

Cakar M., Temirci C., Turut A., (2004). The Schottky barrier height of the rectifying Cu/pyronine-B/p-Si, Au/pyronine-B/p-Si, Sn/pyronine-B/p-Si and Al/pyronine-B/p-Si contacts, *Synthetic Met.*, 142, 177-180.

Card H. C., Rhoderick E. H., (1971). Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 4, 1589-1601.

Cheung S.K., Cheung N.W., (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics, *Appl Phys Lett.*, 49, 85-.87.

El-Nahass M. M., Zeyada H.M., Aziz M.S., El-Ghamaz N.A., (2005). Carrier transport mechanisms and photovoltaic properties of

Au/p-ZnPc/p-Si solar cell, *Solid-State Electronics,* 49, 1314-1319.

El-Nahass M. M., Zeyada H. M., Abd-El-Rahman K.F., Darwish A.A.A., (2007a). Fabrication and characterization of 4-tricyanovinyl-N,N-diethylaniline/p-silicon hybrid organic–inorganic solar cells, *Solar Energy Mater. Sol. Cells,* 91, 1120-1126.

El-Nahass M.M.,, Abd-El-Rahman K.F., Darwish A.A.A., (2007b). Fabrication and electrical characterization of p-NiPc/n-Si heterojunction, *Microelectronics Journal,* 38, 91-95.

Farag A.A.M., El-Shazly E.A.A., Rafea M.A., Ibrahim A., (2009). Optical, electrical and photovoltaic characteristics of organic semiconductor based on oxazine/n-Si heterojunction, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 93, 1853-1859.

Fonash, S. J., (1983). A reevaluation of the meaning of capacitance plots for Schottky-barrier-type diodes, *J. Appl. Phys*., 54, 1966-1975.

Forrest S.R., Kaplan M.L., Schmidt P.H., Feldmann W.L., Yanowski E., (1982). Organic-on-inorganic semiconductor contact barrier devices, *Appl. Phys. Lett.* 41, 90-93.

Forrest S.R., Schmidt P.H., (1986). Semiconductor analysis using organic-on-inorganic contact barriers. I. Theory of the effects of surface states on diode potential and ac admittance, *J. Appl. Phys*., 59, 513-525.

Güllü Ö., Türüt A., (2008). Photovoltaic and electronic properties of quercetin/p-InP solar cells, *Solar Energy Materials&Solar cells*, 92, 1205-1210.

Gullu O., (2010a). Ultrahigh (100%) barrier modification of n-InP Schottky diode by DNA biopolymer nanofilms, *Microelectron Eng.*, 87, 648-651.

Gullu O., Asubay S., Biber M., Kilicoglu T., Turut A., (2010b). Electrical properties of safranine T/p-Si organic/inorganic semiconductor devices, *Eur. Phys. J-Appl Phys.*, 50, 10401.

Güllü Ö., Kılıçoğlu T., Türüt A., (2010c). Electronic properties of the metal/organic interlayer/inorganic semiconductor sandwich device, *Journal of Physics and Chemistry of Solids,* 71, 351-356.

Hamidi Ş., (2011). Organik yarıiletken/İnorganik yarıiletken heteroeklem diyodunun elektriksel özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.

Janardhanam V., Jyothi I., Lee J-H., Kim J.Y., Rajagopal Reddy V., Choi C.J., (2014). Electrical Properties and Carrier Transport Mechanism of Au/*n*-GaN Schottky Contact Modified Using a Copper Pthalocyanine (CuPc) Interlayer, *Materials Transactions*, 55, 758-762.

Kampen T.U., Park S., Zahn D.R.T., (2002). Barrier height engineering of Ag/GaAs(100) Schottky contacts by a thin organic interlayer, *Applied Surface Science,* 190, 461-466.

Kiliçoğlu T., (2008). Effect of an organic compound (Methyl Red) interfacial layer on the calculation of characteristic parameters of an Al/Methyl Red/p-Si sandwich Schottky barrier diode, *Thin Solid Films,* 516, 967-970.

Norde H., (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance, *Journal of Applied Physics,* 50, 5052-5053.

Ocak Y.S., Kulakci M., Kiliçoğlu T., Turan R., Akkiliç K., (2009). Current–voltage and capacitance–voltage characteristics of a Sn/Methylene Blue/p-Si Schottky diode, *Synthetic Metals*, 159, 1603-1607.

Onganer Y., Tuzemen S., (1996). High barrier metallic polymer/p-type silicon Schottky diodes, *Solid-state electronics*, 39, 677-680.

Özden Ş., Tozlu C., and Pakma O., (2016). Temperature Dependent Electrical Transport in Al/Poly(4-vinyl phenol)/p-GaAs Metal-Oxide-Semiconductor by Sol-Gel Spin Coating Method, *International Journal of Photoenergy*, 2016, 6157905.

Rhoderick E.H., Williams R.H., (1988). Metal-Semiconductor Contacts, Clarendon Press, Second Edition, Oxford.

Shaw J. M., Seidler P. F., (2001). Organic electronics, *IBM J. Res. Dev.*, 45, 3-10.

Sze S.M., Ng K.K., (2007). Physics of Semiconductor Devices, third ed., Wiley.

Vearey-Roberts A.R., Evans D.A., (2005). Modification of GaAs Schottky diodes by thin organic interlayers, *Appl. Phys. Lett.,* 86, 072105.

Yağlıoğlu E., Tüzün Özmen Ö., (2014). Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky Bariyer Diyotun Bazı Elektriksel Parametrelerinin Frekansa Bağlı Kapasitans-Voltaj (C-V) Karakteristikleri ile İncelenmesi, *Journal of Düzce University Sci. and Tech.,* 2, 227-234.

Yakuphanoglu F., (2007a). Electrical characterization and Interface State Density Properties of the ITO/C_{70}/Au Schottky Diode, *J. Phys. Chem. C*, 111, 1505-1507.

Yakuphanoglu F., Kandaz M., Yaraşır M. N., Şenkal B.F., (2007b). Electrical transport and optical properties of an organic semiconductor based on phthalocyanine, *Physica B*, 393, 235-238.

Yakuphanoglu F., (2007c). Photovoltaic properties of hybrid organic/inorganic semiconductor photodiode, *Synthetic Metals*, 157, 859-862.

Yakuphanoglu F., Ocak Y.S., Kilicoglu T., Farooq W.A., (2011). Interface control and photovoltaic properties of n-type silicon/metal junction by organic dye, *Microelectronic Eng.*, 88, 2951-2954.

Fabrication of Al/Nigrosin/p-Si Structures and Calculation of Basic Diode Parameters

Extended abstract

During the last 20 years organic semiconductors have attracted considerable attention due to their interesting physical properties followed by various technological applications in the areas of electronics and optoelectronics. One of the main advantages is the fact that they can be produced in large quantities by simple techniques. Besides, it has been carried out the fabrications and electrical/optical characterizations of photovoltaics using organic semiconductors. Organic semiconductors show many unusual electrical, optical and magnetic properties, which could be used for the fabrication of molecular electronic devices. These materials also offer low cost and processing ease and can attain new roles not realized by conventional solar cells.

Metal/semiconductor (MS) contacts are of great importance since they are present in most semiconductor devices. It is well known that the interfacial properties of these contacts have a dominant influence on device performance, reliability and stability. There is a native thin insulating layer of oxide on the surface of the semiconductor in most practical MS contacts. This layer converts the MS structure into a metal/insulator/semiconductor (MIS) device. Besides, it may be constructed as an organic thin film between metal and inorganic semiconductor intentionally. This film modifies some electrical parameters of the devices. For example, Schottky barrier heights of MS contacts can be manipulated by inserting a dipole layer between the semiconductor and the metal film. So far, many attempts have been made to realize a modification and the continuous control of the barrier height using an organic semiconducting layer or an insulating layer at certain metal/inorganic semiconductor interfaces.

Among the organic materials, Nigrosin (NIG) is considered to be a good candidate for organic semiconductor device fabrication such as Schottky device and solar cell, because it offers a possibility of low-cost and large-area devices. NIG used in this study has molecular formula $C_{22}H_{14}N_6Na_2O_9S_2$. NIG organic material has been considered as one of the most stable organic semiconductors for various electronic and optoelectronic applications and has not been used for the modification of p-Si diodes.

MIS diode was prepared by using one side polished (as received from the manufacturer) p-type Si wafer in this study. Chemical cleaning and metallization procedures were given in our previous works. NIG organic layer was directly formed by adding 4 μL of the nigrosin organic compound solution (wt 0.2% in ethanol) on the front surface of the p-Si wafer, and evaporated by itself for drying of the solvent in N_2 atmosphere for one hour. Then, Al metal was evaporated on the NIG organic layer at $2x10^{-5}$ torr (diode area=$7.85x10^{-3}$ cm^2). In this way the Al/NIG/p-Si structure was obtained. The current-voltage (I-V) and capacitance (C-V) measurements of this structure were performed by Keitley 4200 SCS measurement system, respectively.

In this study, it has been determined by UV-VIS method the optical properties of Nigrosin (NIG) organic molecule which has rich π bonds. The optical direct band gap values of NIG thin film formed by drop cast method on glass substrate have been determined as 1,42 eV (Q band) and 2,94 eV (B band).

We fabricated Al/p-Si control and Al/NIG/p-Si MIS structures and then current-voltage (I-V) measurements were carried out at room temperature. The ideality factors n, barrier heights ϕ_b and the series resistance R_s values by using I-V measurements of the structures were determined in darkness. Here, the capacitance-voltage (C-V) measurement of the Al/NIG/p-Si diode was also performed. The values of diffusion potential V_d, acceptor carrier concentration N_a and barrier height ϕ_b of the Al/NIG/p-Si diode were determined from the analysis of the linear region of the C^{-2}-V plot.

Furthermore, the obtained results have showed that the NIG organic material which have rich π bonds may be used in the field of electronic devices.

Keywords: *Nigrosin, MIS diode, I-V, C-V*