



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Au/P3HT:PCBM/n-Si Schottky Bariyer Diyotlarda PCBM Konsantrasyonunun Kapasitans-Voltaj ($C-V$) ve İletkenlik-Voltaj ($G/w-V$) Karakteristiklerine Etkisi ve Dielektrik Özelliklerin İncelemesi

Serpil KARASU, Aynur ÖZTÜRK, Hüseyin Muzaffer ŞAĞBAN*, Özge TÜZÜN ÖZMEN

Fizik Bölümü, Fen Edebiyat Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

** Sorumlu yazarın e-posta adresi: h.m.sagban@gmail.com*

ÖZET

Bu çalışmada, farklı P3HT:PCBM katkı oranları (4:1 ve 10:1) kullanılarak hazırlanan altın/poly(3-hexylthiophene):[6,6]-phenyl C61 butyric acid methyl ester/n-tipi silisyum (Au/P3HT:PCBM/n-Si) metal-polimer-yarıiletken (MPY) Schottky bariyer diyotların (SBD) kapasitans-voltaj ($C-V$) ve iletkenlik-voltaj ($G/w-V$) karakteristikleri, oda sıcaklığında ve 1 MHz frekans değerinde karşılaştırılmıştır. 4:1 ve 10:1 P3HT:PCBM katkı oranlarına sahip numuneler için, $C-V$ ve $G/w-V$ ölçümlerinden arayüzey durum yoğunlukları (N_{ss}) ve seri dirençleri (R_s) hesaplanmıştır. Analiz sonuçlarına göre 4:1 (P3HT:PCBM) katkı oranı kullanılarak üretilen MPY SBD daha iyi diyot performansı göstermiştir. Bu sonuç göz önüne alınarak, (4:1) P3HT:PCBM katkı oranına sahip Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı dielektrik karakteristikleri, oda sıcaklığında 10 kHz-2 MHz frekans aralığında yapılan ölçümler ile incelenmiştir. Bu analizin sonucunda dielektrik sabit (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp tanjantı ($\tan\delta$), ac iletkenlik (σ_{ac}) ve elektrik modülünün reel ve imajiner kısımları (M' ve M'') hesaplanmıştır. Buna göre, ϵ' ve ϵ'' değerleri frekansın artmasıyla azalırken, $\tan\delta$ değerlerinde ise frekansla neredeyse hiçbir değişim olmamıştır. Diğer yandan, σ_{ac} , M' ve M'' parametrelerinin ise artan frekans ile arttığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD için bu parametrelerin güçlü bir şekilde frekansa bağlı olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, P3HT:PCBM polimer karışımındaki PCBM katkı konsantrasyonu artırıldığında diyotun elektriksel özelliklerinde iyileşme olması Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'de daha yüksek performansa sahip elektronik ve optoelektronik cihazlarının üretimine imkan sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Schottky bariyer diyot, P3HT:PCBM arayüzey tabakası, P3HT:PCBM katkı konsantrasyonu, Kapasitans-voltaj ($C-V$) karakteristikleri, İletkenlik-voltaj ($G/w-V$) karakteristikleri

Effect of PCBM Concentration on the Capacitance-Voltage (C-V) and Conductivity-Voltage (G/w-V) Characteristics in Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPS) Schottky Barrier Diodes and Examination the Dielectric Properties

ABSTRACT

In this study, the capacitance-voltage (C-V) and conductivity-voltage (G/w-V) characteristics of gold/poly(3-hexylthiophene):[6,6]-phenyl C61 butyric acid methyl ester/n-type silicon (Au/P3HT:PCBM/n-Si) metal-polymer-semiconductor (MPS) Schottky barrier diodes (SBDs) with different P3HT:PCBM mass ratios (4:1 and 10:1) were compared for the frequency value of 1 MHz at room temperature. Interface states and series resistance were calculated by C-V and G/w-V measurements for the 4:1 and 10:1 P3HT:PCBM mass ratio used diodes. The experimental results show that decreasing the value of P3HT:PCBM mass ratio improves the Au/P3HT:PCBM/n-Si diode quality. The preferable electrical results have been obtained for 4:1 P3HT:PCBM mass ratio used diode. For this reason, the following investigation that is dielectrical analysis were performed only for 4:1 P3HT:PCBM mass ratio used Au/P3HT:PCBM/n-Si MPS SBD in the frequency range of 10 kHz-2 MHz at room temperature. By using C and G/w measurements for 4:1 P3HT:PCBM mass ratio used MPS SBD, dielectric constant (ϵ'), dielectric loss (ϵ''), loss tangent ($\tan\delta$), ac conductivity (σ_{ac}), and the real and imaginary parts of electric modulus (M' and M'') were calculated. From this calculation, ϵ' and ϵ'' parameters decrease with increasing frequency. However, there is a small change in $\tan\delta$ values. On the other hand, σ_{ac} , M' and M'' parameters increase by increasing the frequency. According to experimental results ϵ' , ϵ'' , σ_{ac} , M' and M'' parameters are strongly function of the frequency for the Au/P3HT:PCBM/n-Si MPS SBD. Moreover, in this study increasing the PCBM concentration in P3HT:PCBM organic polymer blend improves the quality of the Au/P3HT:PCBM/n-Si MPS SBD. This increment of PCBM concentration in the Au/P3HT:PCBM/n-Si MPS SBD enables to fabricate of high quality electronic and optoelectronic devices.

Keywords: Schottky barrier diode, P3HT:PCBM interface, P3HT:PCBM mass concentration, Capacitance-voltage (C-V) characteristics, Conductance-voltage (G/w-V) characteristics

I. GİRİŞ

Günümüzde kullanılan elektronik cihazların çok büyük bir bölümü yarıiletken malzemelerden oluşmaktadır. Yarıiletken cihazlar günlük hayatta sık olarak kullanılan bilgisayar, televizyon, cep telefonu vs. gibi aygıtların elektronik bileşenlerini oluşturmakla birlikte güç tüketen cihazlarda oldukça yaygın kullanılmaktadırlar [1].

Organik yarıiletkenler, kolay üretim teknolojileri, düşük üretim maliyeti ve geniş yüzeyli kullanım alanlarına sahip olması gibi birçok avantaja sahiptir [2]. Bu avantajları sayesinde organik alan etkili transistör (OFET), organik ışık yayan diyot (OLED), organik fotodiyot (OPD), organik fotovoltajik pil (OPV) ve organik Schottky diyot gibi elektronik elemanlar da organik yarıiletkenlerin kullanımı oldukça tercih edilmektedir [3].

Organik yarıiletkenler iki guruba ayrılır. Bunlar; karbon tabanlı küçük moleküller ve polimerlerdir [4]. Polimerlerin, küçük moleküllere göre daha çok çözelti durumunda olmasından dolayı spin kaplama daha çok kullanılan organik büyütme yöntemidir [5]. Buna karşılık küçük moleküller, genellikle vakumda buharlaştırma ya da süblimleşme gibi yöntemler ile büyütülmektedir. [6].

Günümüzde optoelektronik ve elektronik alanda metal-yarıiletken (MY) Schottky kontaklar doğru beslemde 0,25 V gerilim değerinde dahi kolaylıkla ilettime geçebilmeleri, gürültü seviyelerinin düşük

ve verimlerinin yüksek olması gibi avantajları dolayısıyla yaygın kullanıma sahiptir [7]. Metal ile yarıiletken arasına arayüzey malzemesi yerleştirilerek metal-yarıiletken kontakların elektriksel karakteristikleri değiştirilebilir [8]. Metal kontak ile yarıiletken malzeme arasında arayüzey malzemesi kullanılarak doğrudan malzemenin özellikleri, performansı ve verimi değiştirilebilir. MY yapı arasına yalıtkan arayüzey konularak metal-yalıtkan-yarıiletken (MYY), polimer arayüzey yerleştirilerek de metal-polimer-yarıiletken (MPY) olarak isimlendirilen Schottky bariyer diyotu oluşturulabilir [9,10]. MPY Schottky bariyer diyotların performansını artırmak için, elektriksel özelliklerini anlamak ve ayrıntılı bir şekilde analiz etmek oldukça önemlidir. Bu çalışmada 4:1 ve 10:1 katkı oranı ile hazırlanan P3HT:PCBM konsantrasyonları, MPY Schottky bariyer diyota arayüzey olarak yerleştirilmiş ve bu Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotların kapasitans-voltaj ($C-V$) ve iletkenlik-voltaj ($G/w-V$) ölçümlerinden elde edilen elektriksel parametreleri incelenmiştir. Bu ölçümler, 1 MHz frekans değerinde, oda sıcaklığında ve karanlıkta yapılmıştır. Aynı zamanda, farklı P3HT:PCBM katkı konsantrasyonuna sahip iki diyot için direnç-voltaj (R_f-V) grafiğinin incelemesi de yapılmıştır. Malzemelerin $C-V$, $G/w-V$ karakteristikleri, arayüzey durum yoğunlukları (N_{ss}) ve seri dirençleri karşılaştırıldıktan sonra daha iyi elektriksel özellik taşıyan numunenin dielektrik özellikleri analiz edilmiştir. C ve G/w değerleri kullanılarak hesaplanan dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp açısı ($\tan\delta$), elektrik modülünün reel ve imajiner kısmı (M' ve M'') ile ac elektriksel iletkenlik (σ_{ac}) ifadelerinin frekans ve gerilime bağlı grafikleri çizilmiştir.

II. DENEY

Bu çalışmada, poly(3-hexylthiophene) (P3HT) ve [6,6]-phenyl C61 butyric acid methyl ester (PCBM) organik bileşikleri Sigma-Aldrich Company Ltd.'den satın alınmıştır. Farklı katkı konsantrasyonlarında polimer arayüzey tabakası oluşturmak için toz halde bulunan P3HT ve PCBM kimyasalları, sırasıyla, 60°C' de 4:1'lik numune için 20g/l ve 5g/l' lik, 10:1'lik numune için de 50g/l ve 5g/l' lik konsantrasyon ile klorobenzen içinde eritilerek solüsyon haline getirilmiştir.

Farklı P3HT:PCBM katkı oranına sahip Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyot üretmek için n-tipi (fosfor katkılı), <100> yönelime sahip tek kristal silisyum (Si) pul, alttaş olarak kullanılmıştır. Si pulun bir tarafı parlatılmış olup alttaşın kalınlığı $350\pm 25\mu\text{m}$ ve öz direnci ise $4,8\Omega\cdot\text{cm}$ ' dir. Si pul RCA temizleme yöntemiyle kimyasal olarak temizlenmiştir [11]. Temizlenen Si pulun arka yüzeyi maske kullanılmadan $\sim 2500\text{\AA}$ kalınlıklı gümüş (Ag) metali ile kaplanmıştır. Bu işlem termal buharlaştırma sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra Ag metalinin, Si pulun arka yüzeyinde iyi bir omik kontak oluşturabilmesi için tüp fırında N_2 akışı altında 450°C' de 30 dakika boyunca tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Omik kontakın oluşturulmasından sonra n-Si yaprağın üzerinde oluşabilecek ince bir oksit tabakanın temizliği için ön yüzeyi %50 hidroflorik (HF) asit ile temizlenmiştir. Bu oksit temizleme işleminin hemen ardından 4:1 ve 10:1 (P3HT:PCBM) katkı oranlarına sahip organik bileşikler spin kaplama tekniğiyle numunelerin ön yüzeyine kaplanmıştır. Numuneler sıcak bir plaka üzerinde 85°C' de 15 dakika ısıtılarak organik film içerisindeki çözücünün buharlaştırılması sağlanmıştır.

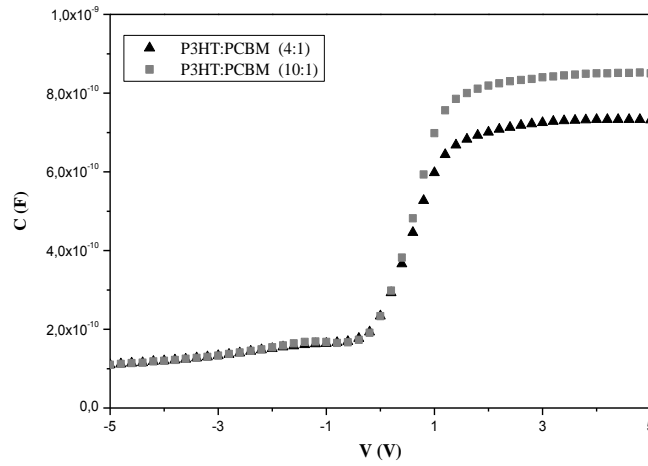
Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotları üretmek için 1mm çaplı daireler içeren bakır maske kullanılarak P3HT:PCBM organik filmin üzerine dairesel şekilli $\sim 2500\text{\AA}$ kalınlığa sahip altın (Au) doğrultucu kontaklar oluşturulmuştur. Au kaplama işleminde de termal buharlaştırma sistemi kullanılmış olup, buharlaştırma işlemi $\sim 1\times 10^{-6}$ Torr basınç altında gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda,

dairesel biçimli Au kontakların kalınlığı termal buharlaştırma sisteminde bulunan dijital kalınlık ölçüm monitörü ile gözlenmiştir.

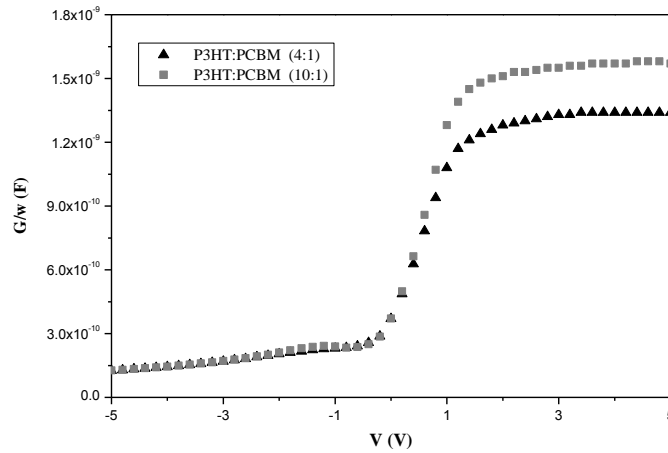
4:1 ve 10:1 P3HT:PCBM katkı oranları kullanılarak üretilen Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotların elektriksel karakterizasyonu oda sıcaklığında ve karanlıkta yapılan $C-V$ ve $G/w-V$ ölçümleri ile analiz edilmiştir. Bu ölçümler HP4192A LF empedans analizörü 10 kHz-2 MHz frekans aralığında ve -10V ile +10V voltaj değerleri arasında gerçekleştirilmiştir. $C-V$ ve $G/w-V$ ölçümlerini bilgisayara kaydetmek için bilgisayara bağlı IEEE-488 AC/DC dönüştürücü kart kullanılmıştır.

III. BULGULAR ve TARTIŞMA

4:1 ve 10:1 P3HT:PCBM katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) SBD'lerin $C-V$ ve $G/w-V$ ölçümlerinin oda sıcaklığında 1 MHz frekans değerinde ve geniş voltaj aralığında (-5V ile +5V) karşılaştırılması sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2' de gösterilmiştir. İdeal bir SBD'nin $C-V$ eğrilerinin frekansa bağlı değişmemesi beklenirken MIS ve MPY diyotlarda arayüzey tabaka/yarıiletken arayüzeyinde ve yasak band içinde bulunan elektronik durumlar ve seri direncin etkisiyle yapının $C-V$ karakteristiği ideal durumdan uzaklaşmaktadır [12,13].



Şekil 1. Oda sıcaklığında farklı P3HT:PCBM katkı oranı kullanılarak hazırlanmış Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotların 1 MHz frekans değerindeki kapasitans-voltaj ($C-V$) karakteristikleri

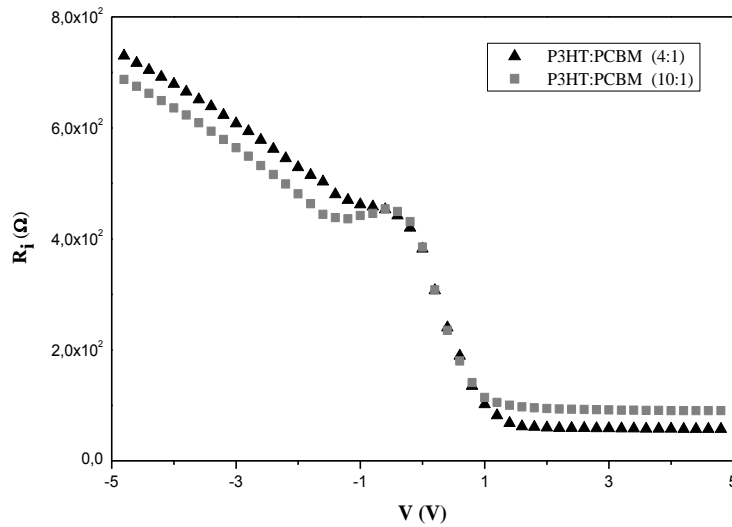


Şekil 2. Oda sıcaklığında farklı P3HT:PCBM katkı oranı kullanılarak hazırlanmış Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotların 1 MHz frekans değerindeki iletkenlik-voltaj ($G/w-V$) karakteristikleri

Şekil 1’de görüldüğü üzere P3HT:PCBM karışımındaki PCBM katkısının artmasıyla birlikte SBD’nin doğru beslem kapasitans değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. Aynı zamanda, iletkenlik ölçümlerinde de PCBM miktarının artması, iletkenlik değerlerinde bir azalmaya neden Şekil 2’den açıkça görülmektedir. Ortaya çıkan bu durumun sebebi olarak, PCBM katkısının artmasıyla birlikte MPY yapı içindeki yarı iletken ile polimer tabaka arasındaki arayüzey durumlarının pasivize olması düşünülmektedir. Böylece, bu arayüzey durumlarını pasivizasyonu, yasak enerji aralığı içindeki tuzaklarda bulunan ve iletme katılan yüklerin etkisini kaybetmesine ve dolayısıyla kapasitansın azalmasına neden olacaktır. Ayrıca, PCBM katkısının malzemenin iletim mekanizmasında değişikliğe neden olmasından dolayı iletkenlik değerlerinde bir azalmaya neden olduğu tahmin edilmektedir. Farklı katkı konsantrasyonlarına sahip SBD’lerin direnç hesaplamaları frekansa bağlı kapasitans ve iletkenlik değerleri kullanılarak aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanmıştır:

$$R_i = \frac{G_m}{G_m^2 + (wC_m)^2} \quad (1)$$

Burada, G_m ve C_m değerleri sırasıyla güçlü yığılım bölgesinde ölçülen iletkenlik ve kapasitans değerleri, w ise açılal frekans değeridir. Şekil 3’de farklı katkı oranlarına sahip Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) SBD’lerin 1 MHz değerindeki gerilime bağlı direnç grafiği görülmektedir. Bu grafikte, yüksek doğru beslem değerlerindeki direnç değeri diyotun seri direncini (R_s) vermektedir. Yapılan ölçümler sonucunda 4:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip MPY SBD’nin R_s değeri 57,80Ω, 10:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip MPY SBD’nin R_s değeri ise 90,30Ω olarak bulunmuştur. Elde edilen veriler doğrultusunda 4:1 katkı oranına sahip olan SBD’nin seri direncinin diğer diyotlara kıyasla daha düşük olduğu ve aynı zamanda kısa devre direncinin ise daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuç yüksek katkı oranına sahip olan SBD’nin kapasitansının daha düşük olmasıyla uyumlu bir durumdur. Doğru beslem altında SBD’nin kapasitansının azalması sonucunda daha iyi bir iletim elde edilmesi, seri direncin azalması, beklenen bir davranıştır ve yüksek PCBM katkısına sahip olan SBD’nin arayüzey durumlarının azaldığını gösteren sonuçlardan birisidir [14,15].



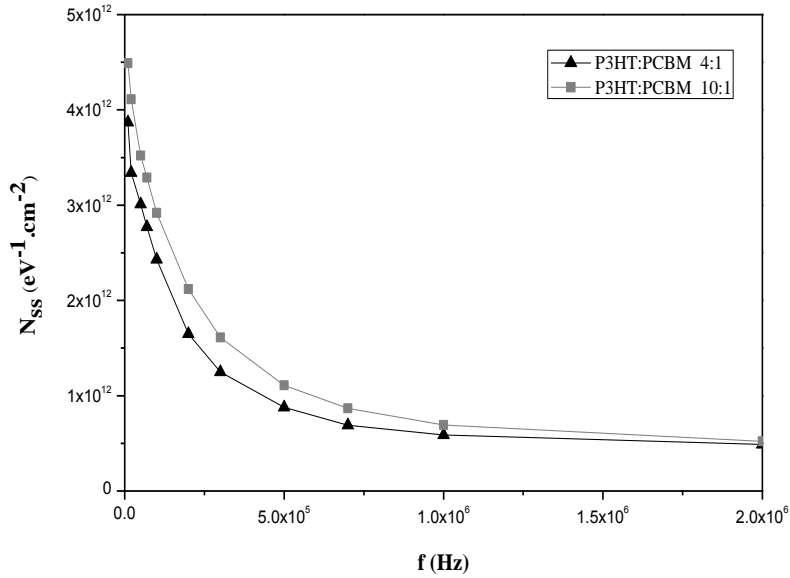
Şekil 3. Oda sıcaklığında farklı P3HT:PCBM katkı oranı kullanılarak hazırlanmış Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotların 1 MHz frekans değerindeki R_i - V karakteristikleri

İki farklı katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) SBD yapılarının arayüzey durum yoğunluğunun (N_{ss}) bulunması için Hill-Coleman metodu kullanılmış olup N_{ss} değerleri şu denklemden hesaplanmıştır [16]:

$$N_{ss} = \frac{2}{qA} \frac{(G_m / \omega)_{\max}}{\left(\left((G_m / \omega)_{\max} / C_{ox} \right)^2 + (1 - C_{\max} / C_{ox})^2 \right)} \quad (2)$$

Burada C_{\max} ölçülen kapasitans değerleri için C - V karakteristiklerinde pik değerine karşılık gelen değer, $(G_m / \omega)_{\max}$ ölçülen iletkenlik değerleri için G/w V karakteristiklerinde pik değerine karşılık gelen değer, C_{ox} ise yalıtkan tabakanın kapasitansıdır. Denklem (2) yardımıyla frekansa bağlı olarak hesaplanan N_{ss} değerleri Şekil 4’de verilmiştir. 4:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip olan MPY SBD’nin N_{ss} değerlerinin (frekansın 10 kHz’den 2 Mhz’ e değişmesiyle birlikte) $3,87 \times 10^{12} \text{cm}^2/\text{eV}$ ’dan $4,89 \times 10^{11} \text{cm}^2/\text{eV}$ ’a indiği, 10:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip olan MPY SBD’nin N_{ss} değerlerinin ise $4,49 \times 10^{12} \text{cm}^2/\text{eV}$ ’dan $5,20 \times 10^{11} \text{cm}^2/\text{eV}$ ’a azaldığı görülmektedir. Bu sonuçlar N_{ss} değerlerinin frekansa kuvvetli şekilde bağlı olduğunu göstermektedir.

P3HT:PCBM katkı konsantrasyonunun herhangi bir frekans değerinde N_{ss} profili üzerine olan etkileri incelendiğinde daha yüksek katkı oranına sahip olan yani 4:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip olan Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD’nin daha düşük N_{ss} değerlerinin olduğu gözlemlenmektedir. MPY SBD’lerde artan PCBM katkısıyla N_{ss} değerlerindeki azalmanın sebebi, metal ile polimer arayüzey arasındaki bariyer yüksekliğinin azalması ve yük taşıyıcılarının MPY yapı içindeki mobilitelerindeki artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, PCBM katkı konsantrasyonunun artmasıyla birlikte SBD içindeki kusurların pasivize edildiği varsayılarak C - V , G/w - V ve R_f - V değerlerindeki ortaya çıkan değişimin temel sebebi N_{ss} ’ de meydana gelen değişime atfedilmektedir.



Şekil 4. Oda sıcaklığında 4:1 ve 10:1 P3HT:PCBM katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD’lerin frekansa bağlı N_{ss} değişim grafiği.

Frekansa Bağlı Dielektrik Özellikleri

Elektriksel analizler sonuçları dikkate alındığında 4:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'nin daha iyi elektriksel özellikler göstermesi nedeniyle bu kısımda sadece 4:1 P3HT:PCBM katkı oranı kullanılarak hazırlanan MPY yapıdaki Au/P3HT:PCBM/n-Si SBD'nin dielektrik özellikleri incelenmiştir. Buna göre, 4:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip Au/P3HT:PCBM/n-Si SBD'nin dielektrik sabiti ϵ' , dielektrik kayıp ϵ'' , kayıp açısı $\tan\delta$, ac elektriksel iletkenliği σ_{ac} , elektrik modülünün reel ve imajiner kısımları M' ve M'' oda sıcaklığında frekansa bağlı olarak yapılan C ve G/w ölçümlerinden yararlanılarak analiz edilmiştir.

Kompleks permitivite, elektrik ve dielektrik özelliklerinin kimyasal ve fiziksel davranışları hakkında önemli bilgiler vermek için kullanılır ve aşağıdaki şekilde ifade edilir [17,18,19]:

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (3)$$

Burada, ϵ' (dielektrik sabit) depolanan enerjiyi, ϵ'' (dielektrik kayıp) harcanan enerjiyi göstermektedir. Kuvvetli yığılım bölgesinde ($V_G > 0$) farklı frekans değerleri altında ϵ^* in gerçel kısmını (ϵ') hesaplamak için aşağıdaki denklemden yararlanılır [20]:

$$\epsilon' = \frac{C}{C_0} \quad (4)$$

Bu denklemde, C_0 boşluğun kapasitans değeri olup $C_0 = \epsilon_0(A/d)$ şeklinde ifade edilir. Diğer yandan, A cm^2 cinsinden doğrultucu kontak alanı, d polimer arayüzey tabaka kalınlığı ve ϵ_0 serbest uzayın (boşluğun) dielektrik geçirgenlik sabitidir ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14} \text{F/cm}$). Kompleks permitivite'nin sanal kısmı (ϵ'') ise iletkenlik ölçümlerinden yararlanılarak aşağıdaki eşitlikten belirlenir:

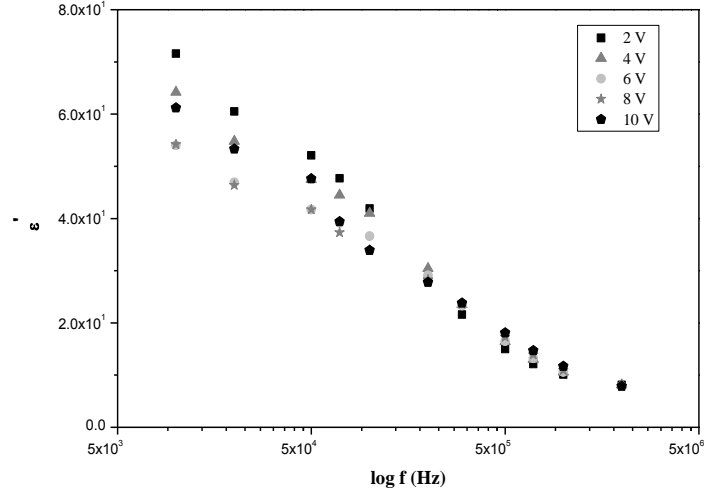
$$\epsilon'' = \frac{G}{\omega C_0} \quad (5)$$

Burada G , MPY yapının iletkenliği, ω ise açısal frekanstır. Kayıp açısı $\tan\delta$ değerleri ise kompleks permitivitenin sanal (ϵ'') ve gerçel (ϵ') kısımları kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [21]:

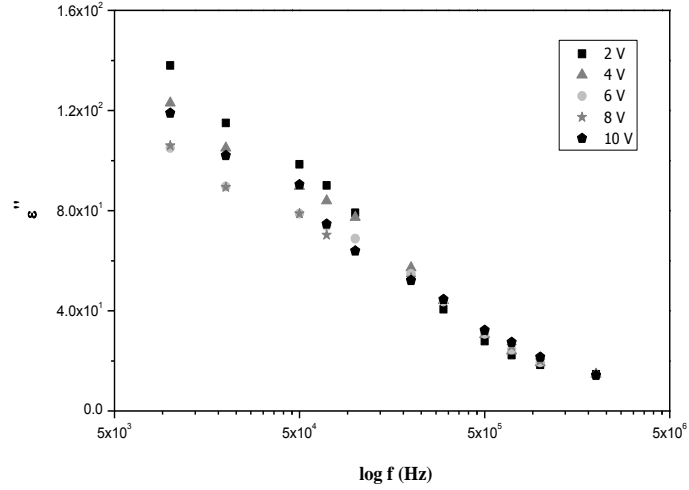
$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (6)$$

Denklem (6)' da görüldüğü gibi $\tan\delta$, ϵ'' nün ϵ' ne bölümüyle elde edilen bir değerdir. Dolayısıyla kayıp açıda oluşacak değişimleri etkileyen tek nicelik ϵ' ve ϵ'' parametrelerinde meydana gelen değişimlerdir. Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7' de sırasıyla ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ 'nın frekansa ve gerilime bağlı olarak elde edilen grafikleri verilmiştir. Şekil 5 ve Şekil 6 da görüldüğü üzere frekans değerlerinin artmasıyla birlikte ϵ' ve ϵ'' parametrelerinde azalma gözlemlenmektedir. ϵ' ve ϵ'' düşük frekans bölgesinde uygulanan gerilime güçlü bir şekilde bağlılık gösterirken yüksek frekans değerlerine gidildiğinde ise ϵ' ve ϵ'' nün gerilimden bağımsız bir davranış sergilediği görülmektedir. Ortaya çıkan frekansa bağlı bu davranış, arayüzeydeki tuzaklarda bulunan ve arayüzey polarizasyonuna olumlu katkıda bulunan elektrik dipollerinin alanı izleyememesinin bir sonucudur [22,23]. Yüksek frekans değerlerinde ise dipoller ac frekans doğrultusunda yeniden düzenlenebilmek için daha az zamana sahip

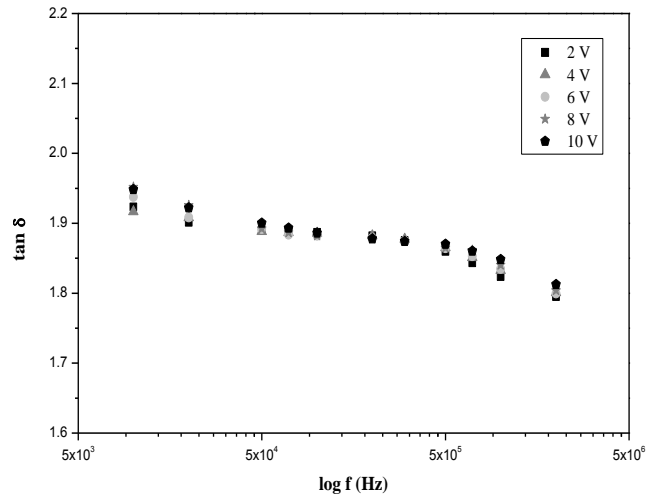
olduklarından ϵ' ve ϵ'' parametreleri gerilimden bağımsız hale gelerek birbiri ile örtüşmeye başlamıştır [24].



Şekil 5. Oda sıcaklığında farklı gerilim değerindeki Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyodun dielektrik sabit (ϵ') karakteristiğinin frekansa bağlı değişim grafiği



Şekil 6. Oda sıcaklığında farklı gerilim değerindeki Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyodun dielektrik kayıp (ϵ'') karakteristiğinin frekansa bağlı değişim grafiği



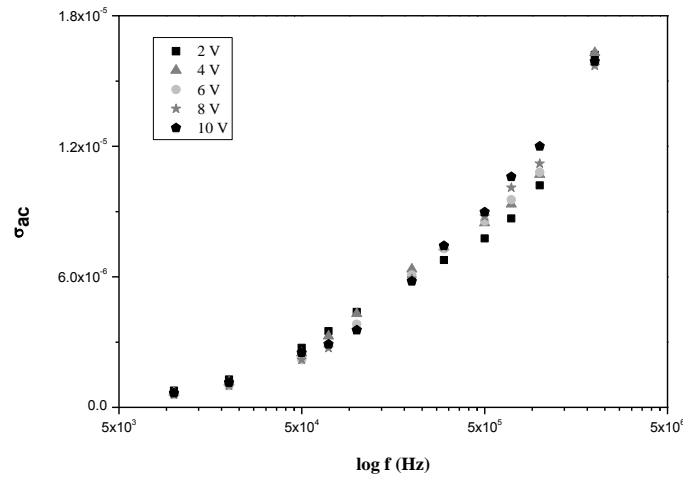
Şekil 7. Oda sıcaklığında farklı gerilim değerindeki Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyodun kayıp açısı ($\tan\delta$) karakteristiğinin frekansa bağlı değişim grafiği

Şekil 7, ϵ' ve ϵ'' parametrelerinden hesaplanan $\tan\delta$ değerlerinde hem frekansa hem de gerilime bağlı olarak neredeyse hiçbir değişim olmadığını göstermektedir.

Ac elektriksel iletkenlik dağılımı (σ_{ac}) malzeme hakkında bilgi veren önemli parametrelerden biridir ve aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir:

$$\sigma_{ac} = W\epsilon''\epsilon_0 \quad (7)$$

4:1 P3HT:PCBM katkı oranı kullanılarak hazırlanan Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD için frekans ve gerilime bağlı olarak elde edilen σ_{ac} değerleri Şekil 8' de gösterilmiştir.



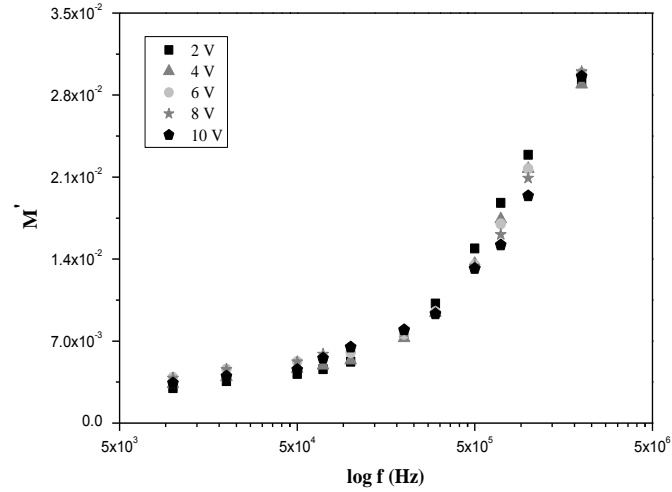
Şekil 8. Oda sıcaklığında farklı gerilim değerindeki Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyodun ac elektriksel iletkenliği (σ_{ac}) karakteristiğinin frekansa bağlı değişim grafiği

Şekil 8'de görüldüğü üzere frekansın artmasıyla birlikte ac iletkenlik değerinde de artış görülmektedir. Bu artışın sebebi, frekansın artmasıyla polarizasyonun azalmasıdır. Polarizasyonun azalmasıyla birlikte de daha çok taşıyıcı katkı sağlayacağından ac iletkenlik artış göstermektedir. Düşük frekans değerlerinde σ_{ac} 'nin gerilimden bağımsız olduğu gözlemlenirken yüksek frekans değerlerine doğru gidildikçe ac iletkenlikte gerilime bağlı bir değişimin olduğu gözlemlenmiştir.

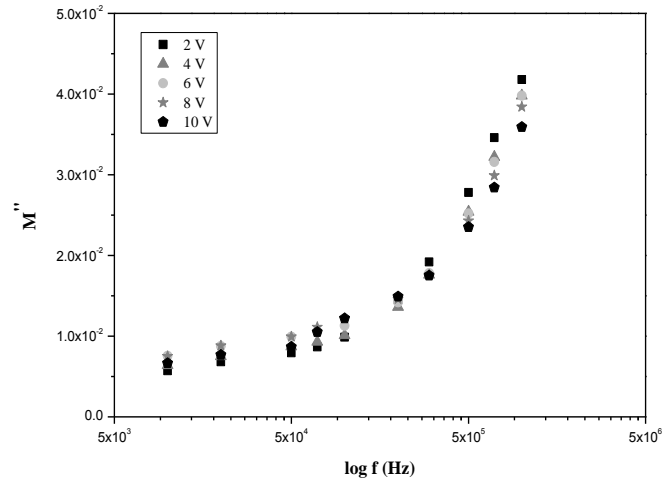
Üretilen MPY SBD yapıların dielektrik özelliklerinin analizi için son yıllarda diğer yöntemlere kıyasla daha çok tercih edilen elektrik modülü formülizasyonu yöntemi kullanılmaktadır [25,26]. Elektrik modülü (M^*), ϵ' ve ϵ'' değerleri kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [27] :

$$M^* = \frac{1}{\epsilon^*} = M' + jM'' = \frac{\epsilon'}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} + j \frac{\epsilon''}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} \quad (8)$$

Elektrik modülünün reel (M') ve imajiner (M'') kısımlarının frekans ve gerilime bağlı değişimi Şekil 9 ve Şekil 10' da gösterilmiştir. ϵ' , ϵ'' değerlerinde frekansın artmasıyla görülen azalmanın sonucu olarak artan frekans ile M' ve M'' değerleri artış göstermektedir. Ayrıca M' ve M'' değerleri, düşük frekans bölgesinde gerilimden bağımsız bir davranış gösterip sıfıra doğru yaklaşırken, frekansın artmasıyla birlikte gerilime bağlı bir değişim göstermektedirler. M' ve M'' karakteristiğinin böyle olması bu bölgede dielektrik durulma mekanizmasının frekansa bağlı olmasına atfedilebilir [28,29].



Şekil 9. Oda sıcaklığında farklı gerilim değerindeki Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotun elektrik modülünün reel kısmının (M') frekansa bağlı değişim grafiği



Şekil 10. Oda sıcaklığında farklı gerilim değerindeki Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotun elektrik modülünün imajiner kısmının (M'') frekansa bağlı değişim grafiği

IV. SONUÇ

4:1 ve 10:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) SBD'lerin oda sıcaklığında kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) ölçümleri yapılarak 1 MHz frekans değerinde karşılaştırılmaları yapılmıştır.

Elde edilen bulgular doğrultusunda, 4:1 P3HT:PCBM katkı konsantrasyonuna sahip olan SBD'nin kapasitans ve iletkenlik değerlerinin, 10:1 P3HT:PCBM katkı konsantrasyonuna sahip olan SBD'ye göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Kapasitans ve iletkenlik değerlerindeki bu değişimin sebebinin arayüzey durumlarının pasivize olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. SBD'lerin R_f -V grafikleri karşılaştırıldığında ise yüksek PCBM katkı oranı kullanılarak üretilen diyotun seri direnç değerlerinin doğru beslem bölgesinde düşük, ters beslem bölgesinde ise kısa devre direncinin daha yüksek olduğu, yani daha iyi bir diyot karakteristiği sergilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca hesaplanan N_{ss} değerlerinin frekansa bağlı değişimleri karşılaştırılarak da PCBM katkısının artması sonucu arayüzey durumlarının azaldığı gösterilerek diyotların kapasitans, iletkenlik ve direnç değerlerindeki meydana gelen değişimin sebebi, N_{ss} teki değişime atfedilmiştir.

Farklı P3HT:PCBM katkı oranı kullanılarak üretilen Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotlarda artan PCBM katkısı ile diyotun temel elektriksel parametrelerinin geliştirildiği tespit edilmiştir. Buna göre, bir sonraki basamakta daha ideal davranış gösteren 4:1 P3HT:PCBM katkı oranı ile hazırlanan Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) yapının dielektrik özellikleri incelenmiştir. $C-V$ ve $G/w-V$ ölçümlerinden yararlanılarak frekans ve gerilime bağlı dielektrik sabit (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp açısı ($\tan\delta$), elektrik modülünün reel ve imajiner kısmı (M' ve M''), ac elektrik iletkenliği (σ_{ac}) hesaplamaları yapılmıştır.

ϵ' ve ϵ'' değerlerinin frekansın artmasıyla azaldığı ve yüksek frekans değerlerinde ise gerilime olan bağıllığını yitirip birbirleriyle örtüştüğü gözlemlenmiştir. ϵ' ve ϵ'' değerlerinde düşük frekans bölgesinde meydana gelen bu değişimin sebebi olarak arayüzeyde bulunan tuzak seviyelerindeki yükler ve yüzey polarizasyonundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüksek frekans bölgesinde ise dipoller uygulanan elektrik alanı takip edememekte ϵ' ve ϵ'' değerleri ve gerilimden bağımsız hale gelmektedir. Dielektrik sabit ve dielektrik kayıptan yararlanılarak elde edilen kayıp açısı ($\tan\delta$) değerinin ise artan frekans ile değerinde çok da bir değişim olmadığı bulunmuş ve literatürdeki benzer çalışmalarla da uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. ϵ' , ϵ'' değerlerinde frekansın artmasıyla görülen azalmanın sonucu olarak artan frekans ile M' ve M'' değerleri artış göstermektedir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma TÜBİTAK tarafından (Proje no: 213M762) ve Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje no: BAP 2015.05.02.327).

V. KAYNAKLAR

- [1] S.M. Sze, K.K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd Ed., John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, (2007).
- [2] Z. Chiguvare, J. Parisi, V. Dyakonov *Journal of Applied. Physics* **94** (2003) 2440.
- [3] H. Hoppe, N.S. Sariciftci *Journal of Materials Research* **19(7)** (2004) 1924-1945.
- [4] M. Turmuş, *N tipi silisyum tabanlı altlık üzerine Pyrene (C₁₆H₁₀) maddesinin kaplanarak elde edilen yapıların akım iletim mekanizmaları*, Yüksek Lisans Tezi, Bingöl Üniversitesi, Bingöl-Türkiye, (2014).
- [5] S Z. Nalçacıgil, *Perylene türevi organik yariletken ince filmlerin optik özelliklerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya-Türkiye, (2011).
- [6] F. Boy, *Organik arayüzeyli GaAs Schottky diyodların elektriksel karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya-Türkiye, (2013).
- [7] B.L. Sharma (Ed.), *Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications*, Plenum Press, New York, (1984).
- [8] N. Şimşir, *Metal/organik/inorganik Schottky diyodların sıcaklığa bağlı elektriksel karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya-Türkiye, (2012).
- [9] A.F. Özdemir, D.A. Aldemir, A. Kökçe, S. Altındal *Synthetic Metals* **159(14)** (2009) 1427-1432.
- [10] S. Demirezen, Ş. Altındal *Current Applied Physics* **10(4)** (2010) 1188-1195.
- [11] Ö. Tüzün Özmen *Microelectronics Reliability* **54(12)** (2014) 2766-2774.

- [12] E.H. Nicollian, J.R. Brews, *MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) Physics and Technology*, John Willey and Sons, New York, (1982).
- [13] D.K. Schroder, *Semiconductor Material and Device Characterization*, 2nd ed., John Wiley&Sons, New York, (1998).
- [14] S. Demirezen, Z. Sönmez, U. Aydemir, Ş. Altındal *Current Applied Physics* **12(1)** (2012) 266-272.
- [15] U. Aydemir, *Au/SrTiO₃/n-Si (Mfs) Schottky diyotların elektriksel parametrelerinin I-V, C-V ve DIts metodu ile incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara-Türkiye, (2009).
- [16] W.A. Hill, C.C. Coleman *Solid-State Electronics* **23(9)** (1980) 987.
- [17] V.V. Daniel, *Dielectric Relaxation*, Academic Press, London, (1967).
- [18] A. Zaafour, M. Megdiche, M. Gargouri *J. Alloys Compd.* **584** (2014) 152.
- [19] H.M. Zaki *Physica B* **363** (2005) 232.
- [20] A. Kaya, Ö. Vural, H. Tecimer, S. Demirezen, Ş. Altındal *Curr. Appl. Phys.* **14** (2014) 322.
- [21] C.P. Smyth, *Dielectric Behavior and Structure*, McGraw-Hill, New York, (1995).
- [22] K. Rajasekar, A. Subbarayan, R. Sathyamoorthy *Solar Energy Materials and Solar Cells* **90(15)** (2006) 2515.
- [23] İ. Yücedağ, *Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılarda elektrik ve dielektrik özelliklerinin sıcaklık ve frekansa bağlı incelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara-Türkiye, (2007).
- [24] A. Kaya, Ş. Altındal, Y. Asar, Z. Sönmez *Chinese Physics Letters* **30(1)** (2013) 017301.
- [25] P. Pissis, A. Kiritsis *Solid-state Ion* **97** (1997) 105.
- [26] K. Prabakar, S.K. Narayandass, D. Mangalaraj *Phys. Status Solidi (A)* **199(3)** (2003) 507.
- [27] H.E. Aral, *MIS yapıların dielektrik özelliklerinin frekans ve sıcaklığa bağlı incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara-Türkiye, (2010).
- [28] M. Popescu, I. Bunget, *Physics of Solid Dielectrics (Materials Science Monographs, 19)*, Elsevier Science Ltd., (1984).
- [29] İ. Dökme, Ş. Altındal, M. Gökçen, *Microelectronic Engineering* **85 (9)** (2008) 1910.