



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky Bariyer Diyotun Bazı Elektriksel Parametrelerinin Frekansa Bağlı Kapasitans-Voltaj (C-V) Karakteristikleri ile İncelenmesi

Engin YAĞLIOĞLU*, Özge TÜZÜN ÖZMEN

Fizik Bölümü, Fen Edebiyat Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE
*Sorumlu yazarın e-posta adresi: enginyagliolu@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotun frekansa bağlı kapasitans-voltaj (C-V) karakteristikleri, oda sıcaklığında 1kHz-1MHz frekans aralığında incelenmiştir. Deneysel sonuçlara göre kapasitans değerlerinin artan frekansla azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, difüzyon potansiyeli (V_D), donör taşıyıcı yoğunluğu (N_D), Fermi enerjisi (E_F), tüketim tabakasının genişliği (W_D) maksimum elektrik alan (E_m), potansiyel bariyer yüksekliği (Φ_B), Schottky engel alçalması ($\Delta\Phi_B$) gibi elektriksel parametreler frekansa bağlı C-V ölçümlerinin analizinden elde edilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, C-V analizinden elde edilen Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotun temel elektriksel parametreleri, Au/n-Si (MY) Schottky bariyer diyotunkiler ile kıyaslandığında P3HT:PCBM arayüzey organik tabaka sayesinde geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Schottky bariyer diyot, Organik yarıiletken, Kapasitans-voltaj (C-V) karakteristikleri

Investigation of Some Electrical Parameters of Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPS) Schottky Barrier Diodes Using Frequency Dependent Capacitance-Voltage (C-V) Characteristics

ABSTRACT

The frequency dependent capacitance-voltage (C-V) characteristics of Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPS) Schottky barrier diode were investigated in the frequency range of 1kHz-1MHz at room temperature. The results show that the values of capacitance increases while the frequency decreases. Furthermore, the electrical parameters, such as diffusion potential (V_D), doping concentration of donor atoms (N_D), Fermi energy level (E_F), depletion layer width (W_D), maximum electric field (E_m), barrier height (Φ_B), Schottky barrier lowering ($\Delta\Phi_B$), were determined from the analysis of frequency dependent C-V measurements. As a result of this study, the basic electrical parameters of Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPS) Schottky barrier diodes deduced from C-V analysis are improved due to the P3HT:PCBM interfacial organic layer when compared with those of Au/n-Si (MS) Schottky barrier diodes.

Keywords: Schottky barrier diode, Organic semiconductor, Capacitance-voltage (C-V) characteristics

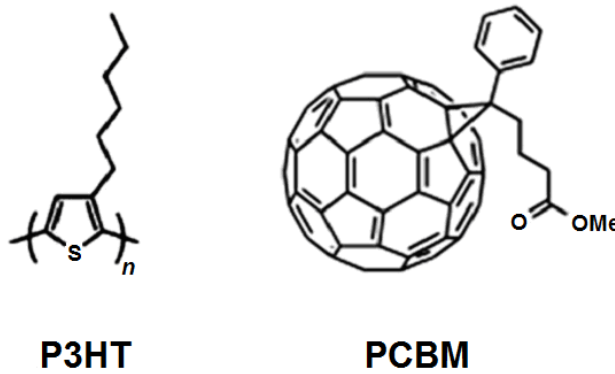
I. GİRİŞ

ORGANİK yarıiletkenler, elektronikte kullanılan inorganik yarıiletkenler ile karşılaştırıldığında kolay üretim teknolojileri, düşük üretim maliyeti ve geniş yüzeyli kullanım alanlarına sahip olması gibi birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlar, organik ışık yayan diyotlar (OLED), organik alan etkili transistörler (OFETs), organik fotodiyotlar (OPDS), organik fotovoltaik (OPV) piller ve organik Schottky diyotlar gibi elektronik elemanlarında organik yarıiletkenlerin kullanımını çekici hale getirmektedir [1,2].

Metal-yarıiletken (MY) kontak, Schottky bariyer diyot yapısındadır. MY yapının özellikleri, metalin iş fonksiyonu, bant aralığı, yarıiletken tipi ve konsantrasyonu gibi etkilere bağlıdır. MY yapıya ek olarak metal-yalıtkan-yarıiletken (MYY) ve metal-polimer-yarıiletken (MPY) olarak adlandırılan metal ve yarıiletken arasına ince bir yalıtkan arayüzey veya polimer yalıtkan tabakanın varlığında da Schottky bariyer diyotu oluşturulabilir. Bu yapılar arasında, MPY yapılar, son zamanlarda gittikçe yaygınlaşan endüstriyel uygulamaları nedeniyle MY ve MY Y yapılarına göre çok daha popüler hale gelmiştir [3,4].

Schottky bariyer diyotların üretiminde kullanılan farklı yarıiletkenler ve arayüzey tabakası olarak kullanılan organik veya inorganik malzemeler elde edilen elektronik cihazın elektriksel karakteristiğini önemli ölçüde etkilemektedir [5,6]. Elektronik cihazların elektrik ve dielektrik özellikleri, malzemenin arayüzey durumlarına ve MPY yapılarında polimerik arayüzey tabakasına önemli ölçüde bağlıdır [7].

Organik yarıiletkenler arasında poly(3-hexylthiophene) (P3HT) ve [6,6]-phenyl C61 butyric acid methyl ester (PCBM) karışımının endüstriyel uygulamaları oldukça umut vericidir [8,9]. Ayrıca bu organik karışım kullanılarak üretilen fotovoltaik cihazlar diğer malzemeler ile üretilen fotovoltaik cihazlar ile kıyaslandığında çok daha yüksek verimlilik vermekle birlikte yaklaşık %5 enerji verimliliğine ulaşmıştır [10]. Yapılan çalışmalarda elde edilen bu yüksek verimliliğinden dolayı P3HT ve PCBM kimyasalları diğer organik yarıiletkenlere kıyasla daha çok tercih edilmektedir [8-10]. Şekil 1' de P3HT ve PCBM' in kimyasal yapıları görülmektedir.



Şekil 1. P3HT ve PCBM kimyasal yapısı

Daha önceki çalışmalarda MPY Schottky bariyer diyotların arayüzeyine polyvinyl alcohol [11], perylene [12], rhodamine-101 [13], chitin [14] gibi organik malzemeler eklenerek MPY Schottky bariyer diyotların performansı geliştirilmiştir. Bununla birlikte, bu çalışma ile ilk kez MPY yapıda

arayüzey tabakası olarak P3HT:PCBM organik karışımı kullanılmıştır. Bu malzeme kullanılarak diyotun elektriksel özelliklerinin gelişmesi beklenmektedir.

MPY Schottky bariyer diyotların performansını artırmak için, elektriksel özelliklerini anlamak ve ayrıntılı bir şekilde analiz etmek oldukça önemlidir. Bu çalışmada Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotun kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri ile elde edilen elektriksel parametreleri incelenmiştir. C-V ölçümleri, 1kHz-1MHz frekans aralığında, oda sıcaklığında ve karanlıkta yapılmıştır. C-V ölçümlerinin sonucunda, difüzyon potansiyeli (V_D), donör taşıyıcı yoğunluğu (N_D), Fermi enerjisi (E_F), tüketim tabakasının genişliği (W_D) maksimum elektrik alan (E_m), potansiyel bariyer yüksekliği (Φ_B), Schottky engel alçalması ($\Delta\Phi_B$) parametreleri frekansa bağlı olarak detaylı olarak analiz edilmiştir.

II. DENEY

Bu çalışmada, Poly(3-hexylthiophene) (P3HT) ve [6,6]-phenyl C61 butyric acid methyl ester (PCBM) Sigma-Aldrich Company Ltd. marka kullanılmıştır. Toz halde bulunan P3HT ve PCBM kimyasalları, sırasıyla, 60°C' de 10g/l ve 5g/l' lik konsantrasyonlar ile, klorobenzen içinde eritilerek solüsyon haline getirilmiştir.

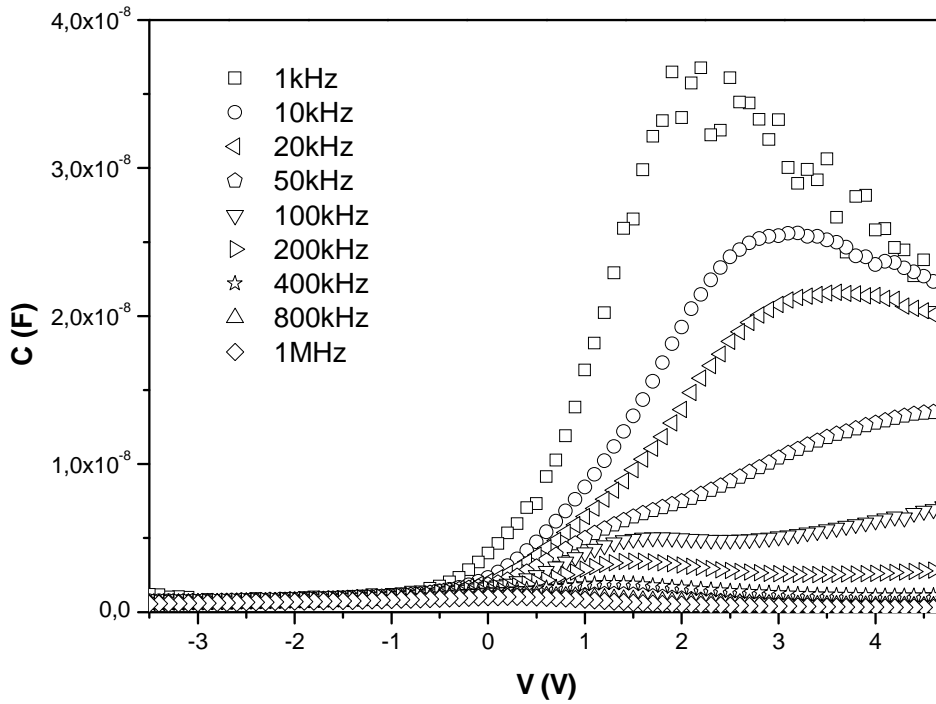
N-tipi (Fosfor katkılı) <100> yönelime sahip tek kristal Si pul, altlık olarak kullanıldı. Bir tarafı parlatılmış Si pulun kalınlığı 350±25µm ve öz direnci ise 4,8Ω.cm' dir. Si pul, RCA temizleme yöntemiyle kimyasal olarak temizlenmiş ve temizlenen Si pulun arka yüzeyi maske kullanılmadan ~2500Å kalınlıklı gümüş (Ag) metali ile kaplanmıştır. Ag kaplama işlemi termal buharlaştırma sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Buharlaştırılan Ag tabakanın, Si pulun arka yüzeyinde iyi bir omik kontak oluşturabilmesi için tüp fırında N₂ akışı altında 450°C' de 30 dakika boyunca tavlanmıştır. Omik kontakın üretimi sırasında Si pulun hava ile teması dolayısıyla pulun ön yüzeyinde oluşan oksit tabakası %50 hidroflorik asit (HF) çözeltisi ile temizlenmiş ve bu oksit temizleme işleminin hemen ardından ön yüzey üzerine P3HT:PCBM (2:1) organik bileşiği spin kaplama tekniğiyle kaplanmıştır. Organik tabakanın kaplanma işleminden sonra organik film içerisindeki çözücünün buharlaştırılması için malzemeler sıcak plaka üzerinde 85°C' de 10 dakika süreyle kurutulmuştur.

Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotu üretmek için 1mm çaplı daireler içeren bakır maske kullanılarak P3HT:PCBM organik filmin üzerine dairesel şekilli altın (Au) doğrultucu kontaklar oluşturulmuştur. Ag kaplama işleminde olduğu gibi, Au kaplama işleminde de termal buharlaştırma sistemi kullanılmış olup, buharlaştırma işlemi sırasında basınç ~1x10⁻⁶mbar olarak sabitlenmiştir. Aynı zamanda, kaplanan Au kontakların kalınlığı termal buharlaştırma sisteminde bulunan kuartz kristal kalınlık monitörü sayesinde gözlenmiştir.

Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotun elektriksel analizi için kapasitans-voltaj (C-V) karakteristikleri incelenmiş olup, C-V ölçümleri oda sıcaklığında ve karanlıkta yapılmıştır. Bu C-V karakteristikleri HP4192A LF empedans analizörü ile 1kHz-1MHz arasında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bilgisayara C-V ölçümlerini kaydetmek için bilgisayara bağlı IEEE-488 AC/DC dönüştürücü kart kullanılmıştır.

III. BULGULAR ve TARTIŞMA

Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotun kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri oda sıcaklığında geniş frekans (1kHz-1MHz) ve geniş voltaj aralığında (-5V ile 5V) gerçekleştirilmiştir. Au/P3HT:PCBM/n-Si Schottky bariyer diyotun C-V grafiği Şekil 2' de verilmiştir. Şekil 2' de kapasitans değerlerinin frekansa bağlılığı açıkça gözükmemektedir. Negatif voltajlarda - terslenim bölgesinde- kapasitans değerlerinde değişimin olmadığı yani voltajın bu bölgede kapasitans değerlerini etkilemediği gözükmemektedir. Difüzyon potansiyeli (V_D), donör taşıyıcı yoğunluğu (N_D), Fermi enerjisi (E_F), tüketim tabakasının genişliği (W_D) maksimum elektrik alan (E_m), potansiyel bariyer yüksekliği (Φ_B), Schottky engel alçalması ($\Delta\Phi_B$) C-V ölçümlerinin sonucunda yapılan analizler ile elde edilmiştir.



Şekil 2. Oda sıcaklığında Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotun 1kHz-1MHz aralığındaki farklı frekanslar değerleri için kapasitans-voltaj (C-V) karakteristikleri

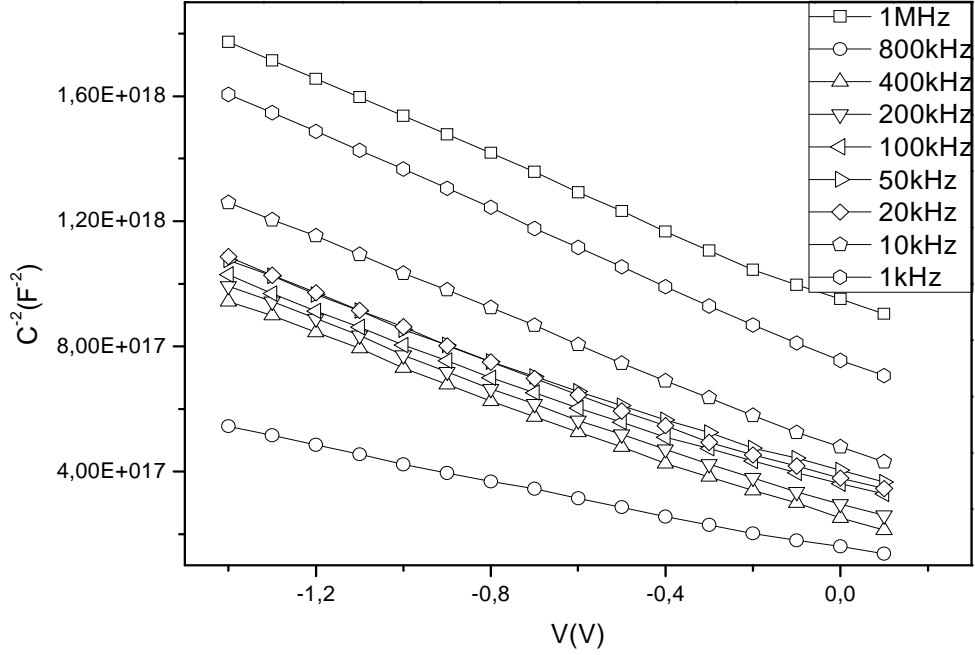
Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotun farklı frekanslar için C⁻²-V karakteristikleri Şekil 3' de verilmiştir. Grafikten görülebileceği gibi 1kHz-1MHz aralığında farklı frekanslar için elde edilen doğruların birbirlerine hemen hemen paralel oldukları gözükmemektedir. Her bir frekans için bu doğruların eğilim çizgileri çizilip doğru denklemleri elde edildiğinde doğruların voltaj eksenini kestiği noktadaki değerleri yani kesişim voltajı (V_0) değerleri kullanılarak difüzyon potansiyeli (V_D) ve her bir doğruların eğiminden donör taşıyıcı yoğunluğu (N_D) değerleri incelenen her bir frekans için hesaplanmıştır. Diyotun difüzyon potansiyeli şu ifade kullanılarak hesaplanabilir:

$$V_D = V_0 + \frac{kT}{q} \quad (1)$$

Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotun donör taşıyıcı yoğunluğu (N_D) Denklem (2) kullanılarak bulunmuştur.

$$C^{-2} = \frac{2}{(q\epsilon_s N_D A^2)} (V_0 + V) \quad (2)$$

Burada ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, A diyot alanı, N_D donör taşıyıcı yoğunluğu, V ters beslem voltajı ve V_0 Denklem (1)'de kullandığımız kesişim voltajıdır.



Şekil 3. Oda sıcaklığında Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotun farklı frekanslarda C^{-2} - V karakteristikleri

Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotun oda sıcaklığında Fermi enerjisi E_F ;

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_C}{N_D} \right) \quad (3)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada N_C iletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğudur bu durumda,

$$N_C = 4,82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m_e^*}{m_0} \right)^{3/2} \quad (4)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada m_e^* elektronların etkin kütlesi, m_0 ise elektronun kütlesidir. İletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğu olan N_C Denklem (4) kullanılarak hesaplandıktan sonra Denklem (3)'de yerine yazılarak Fermi enerjisi E_F bulunmuştur.

Tüketim tabakasının genişliği (W_D) ise

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_S \epsilon_0 V_D}{qN_D}} \quad (5)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır.

Maksimum elektrik alan E_m ,

$$E_m = \sqrt{\frac{2qN_A V_D}{\epsilon_S \epsilon_0}} \quad (6)$$

ifadesi ile elde edilir. Denklem (6)' dan elde ettiğimiz E_m değeri kullanılarak Schottky engel alçalması $\Delta\Phi_B$,

$$\Delta\Phi_B = \sqrt{\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_S \epsilon_0}} \quad (7)$$

formülü ile hesaplanmıştır.

Potansiyel engel yüksekliği ise Denklem (1)' den elde edilen difüzyon potansiyeli (V_D), Denklem (3)' den elde edilen Fermi enerjisi (E_F) ve Denklem (7)' den elde edilen Schottky engel alçalmasına bağlı olarak

$$\Phi_B = V_D + E_F - \Delta\Phi_B \quad (8)$$

ile hesaplanmıştır.

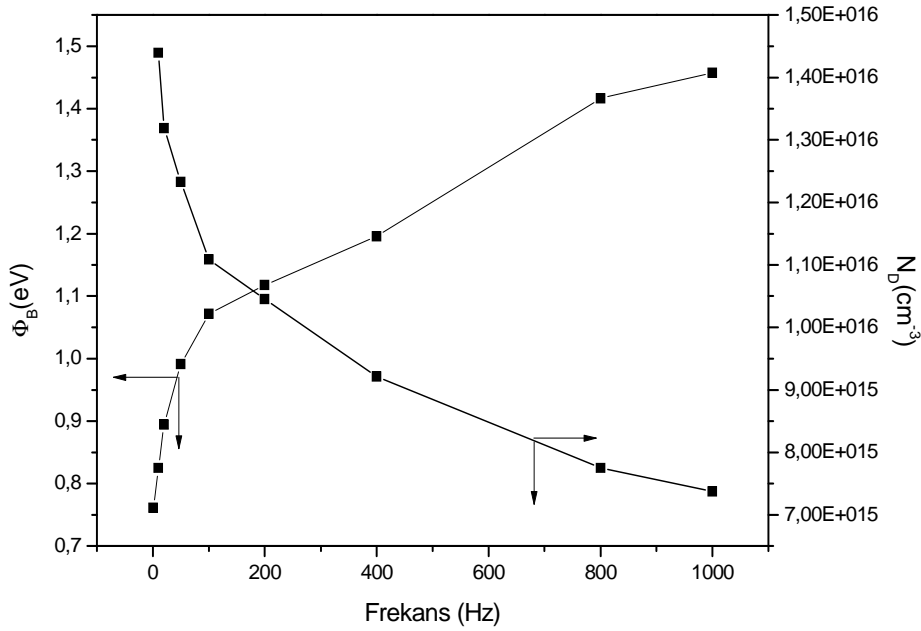
1kHz-1MHz aralığındaki farklı frekans değerleri için hesaplanan ve yukarıda hesaplanma teknikleri ayrıntılı olarak ifade edilen tüm bu parametreler Tablo 1 de verilmiştir. Tablodan da görüleceği gibi Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotun oda sıcaklığında 1kHz' den 1MHz' e kadar farklı frekanslarda yaptığımız deneylerde artan frekansla difüzyon potansiyeli (V_D), Fermi enerjisi (E_F), tüketim tabakasının genişliği (W_D) ve potansiyel bariyer yüksekliği (Φ_B) değerlerinin arttığı görülmüştür. Bunlarla birlikte, donör taşıyıcı yoğunluğu (N_D), maksimum elektrik alan (E_m) ve Schottky engel alçalması ($\Delta\Phi_B$) değerlerinin ise artan frekans değerleriyle azaldığı tabloda ifade edilmiştir. Tabloda listelenen ve burada da tartıştığımız frekansa bağlı olarak elektriksel parametre değerlerindeki tüm değişimler literatürde uygun olup daha önce yapılmış çalışmalarda da benzer değişimler görülmüştür [11,12]. Aynı zamanda, Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotun karanlıkta ve oda sıcaklığındaki C-V analizinden elde edilen bu elektriksel parametreler, organik ara yüzey tabakası kullanmadan üretilen Au/n-Si Schottky bariyer diyotun Ref. [15]' de verilen C-V analizi sonuçları ile kıyaslandığında P3HT:PCBM arayüzey organik tabakasının diyotun elektriksel parametrelerini önemli bir şekilde geliştirdiği sonucuna varılabilir.

Tablo 1. Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotun oda sıcaklığında C^2-V grafiğinden elde edilen parametreler

f (kHz)	V_D (eV)	N_D (10^{16} cm^{-3})	E_F (eV)	W_D (10^{-5} cm)	E_m (10^4 V.cm^{-1})	Φ_B (eV)	$\Delta\Phi_B$ (10^{-2} eV)
1	0,61	3,2	0,149	1,58	7,91	0,73	3,11
10	0,66	1,44	0,170	2,44	5,49	0,78	2,59
20	0,72	1,32	0,172	2,67	5,52	0,87	2,60
50	0,82	1,23	0,174	2,94	5,68	0,95	2,63
100	0,89	1,11	0,177	3,25	5,63	1,03	2,62
200	0,94	1,05	0,178	3,43	5,61	1,08	2,62
400	1,01	0,92	0,181	3,79	5,47	1,15	2,58
800	1,23	0,77	0,186	4,55	5,52	1,38	2,60
1000	1,27	0,74	0,187	4,74	5,48	1,42	2,58

Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyot için C-V analizinden elde edilen ve Tablo 1 de listelenen elektriksel parametrelerin frekansa bağlı sonuçları, literatürde MPY Schottky bariyer diyot kullanılarak yapılan çalışmalardaki sonuçlar ile kıyaslandığında oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir [11,12].

Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotun karanlıkta ve oda sıcaklığındaki C-V analizinden elde edilen Φ_B ve N_D parametrelerinin frekansa bağlı değişimi Şekil 4' de verilmiştir.



Şekil 4. Oda sıcaklığında Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotun farklı frekans değerlerinin Φ_B ve N_D ' ye karşı iki eksenli grafiği

Şekil 4' den de görüleceği gibi artan frekansla Φ_B değeri artarken N_D üstel olarak azalmaktadır. Bu beklenen bir davranıştır ve arayüzey durumlarına atfedilebilir [16,17].

IV. SONUÇ

Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotun oda sıcaklığında kapasitans-voltaj (C-V) ölçüm tekniği kullanılarak elektriksel bazı özellikleri incelenmiştir. Elektriksel parametrelerin uygulanan frekansa bağlı değişimini incelemek için tüm C-V ölçümleri 1kHz-1MHz arasındaki frekans aralığında gerçekleştirilmiştir.

C-V ve C^{-2} -V grafiklerinden elde edilen, difüzyon potansiyeli (V_D), Fermi enerjisi (E_F), tüketim tabakasının genişliği (W_D) ve potansiyel bariyer yüksekliği (Φ_B) değerlerinin artan frekans değerleri ile arttığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, donör taşıyıcı yoğunluğu (N_D), maksimum elektrik alan (E_m) ve Schottky engel alçalması ($\Delta\Phi_B$) değerlerinin ise artan frekansla değerleriyle azaldığı bulunmuştur. Artan frekans değerleriyle birlikte donör taşıyıcı yoğunluğunun (N_D) üstel olarak azalması ve potansiyel bariyer yüksekliği (Φ_B) değerlerinin artması arayüzey durumlarının varlığına atfedilebilir.

Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotunda kullanılan arayüzey organik tabakanın (P3HT:PCBM), Au/n-Si (MY) Schottky bariyer diyotu ile kıyaslandığında diyotun temel elektriksel parametrelerini geliştirdiği tespit edilmiştir. Bu durumda, elektronik uygulamalarında Au/n-Si (MY) Schottky bariyer diyot yerine Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotun kullanılmasının malzeme kalitesini geliştirmek adına daha avantajlı olabileceği sonucuna varılabilir.

V. REFERANSLAR

- [1] Z. Chiguvare, J. Parisi, V. Dyakonov, *J. Appl. Phys.* **94** (2003) 2440.
- [2] H. Hoppe, N. S. Sariciftci, *J. Mater. Res.* **19** (2004) 1924.
- [3] A.F. Özdemir, D.A. Aldemir, A. Kökçe, S. Altındal, *Synth. Met.* **158** (2009) 1427.
- [4] S. Demirezen, Ş. Altındal, *Curr. Appl. Phys.* **10** (2010) 1188
- [5] F. Yakuphanoglu, *Synth. Met.* **158** (2008) 108.
- [6] J.S. Park, B.R. Lee, J.M. Lee, J.S. Kim, S.O. Kim, M.H. Song, *Appl. Phys. Lett.* **96** (2010) 243306.
- [7] M. Gökçen, T. Tunç, Ş. Altındal, İ. Uslu, *Curr. Appl. Phys.* **12** (2012) 525.
- [8] F.C. Krebs, *Polymeric Solar Cells: Materials, Design, Manufacture*, DEStech Publications, Inc., Lancaster, Pennsylvania, 2010.
- [9] M. Punke, S. Mozer, M. Stroisch, M. Gerken, G. Bastian, U. Lemmer, D.G. Rabus, P. Henzi, *Proc. of SPIE* **6185** (2006) 618505.
- [10] G. Li, V. Shrotriya, J.S. Huang, Y. Yao, T. Moriarty, K. Emery, Y. Yang, *Nature Mater.* **4** (2005) 864.
- [11] S. Demirezen, Z. Sönmez, U. Aydemir, Ş. Altındal, *Curr. Appl. Phys.* **12** (2012) 266.
- [12] S. Zeyrek, E. Acaroğlu, Ş. Altındal, S. Birdoğan, M.M. Bülbül, *Curr. Appl. Phys.* In Press (2013).
- [13] M. Çakar, N. Yıldırım, S. Karatas, C. Temirci, A. Turut, *J. Appl. Phys.* **100** (2006) 74505.
- [14] K. Akkılıç, M.E. Aydın, I. Uzun, T. Kılıçoğlu, *Synth. Met.* **156** (2006) 958.
- [15] S. Alialy, H. Tecimer, H. Uslu, Ş. Altındal, *J. Nanomed. Nanotechol.* **4** (2013) 1000167.
- [16] K.E. Bohlin, *J. Appl. Phys.* **60** (1986) 1223.
- [17] F. Parlaktürk, Ş. Altındal, A. Tataroğlu, M. Parlak, A. Agasiev, *Microelectron. Eng.* **85** (2008) 81.