

Ag/pentacen/Cu MIM Yapısının Optoelektronik Özelliklerinin İncelenmesi

Fatih ÜNAL^{1*} 

Öz

Ag/pentacen/Cu MIM yapısı (metal-insulator-metal) termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak başarılı bir şekilde üretilmiştir. Üretilen yapının temel I-V karakterizasyonu karanlık ve 20, 40, 60, 80, 100 mW.cm⁻² ışık şiddetinde incelenmiştir. MIM yapısının diyot parametreleri; idealite faktörü (n), engel yüksekliği (ϕ_b), ters doyma akımı (I_0), seri direnç (Rs) ve Shunt direnç (Rsh) değerleri hem karanlık hem de farklı ışık şiddetlerinde belirlenmiştir. Karanlık ortamda sırasıyla n, ϕ_b , I_0 , Rs ve Rsh değerleri 7.95, 0.31 eV, 1.95×10^{-6} A, $3.13 \times 10^4 \Omega$ ile $3.85 \times 10^4 \Omega$ olduğu belirlenmiştir. Ayrıca üretilen MIM yapısının fotodedektör parametreleri; fotoakım (I_{ph}), duyarlılık (R) ve özgül dedektiflik (D*) değerleri de farklı ışık şiddetlerinde incelenmiştir ve maksimum değerlerin sırasıyla 7.85×10^{-5} A, 6.09×10^{-3} A.W⁻¹ ve 1.86×10^7 Jones olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Metal-insulator-metal, MIM, pentasen, optoelektronik.

Investigation of Optoelectronic Properties of Ag/Pentacene/Cu MIM Structure

Abstract

Ag/pentacene/Cu MIM structure (metal-insulator-metal) was successfully produced using thermal evaporation method. The basic I-V characterization of the produced structure was investigated at dark and 20, 40, 60, 80, 100 mW.cm⁻² light intensity. Diode parameters of MIM structure; the ideality factor (n), barrier height (ϕ_b), reverse saturation current (I_0), series resistance (Rs) and Shunt resistance (Rsh) values were determined at both dark and different light intensities. In dark environment, n, ϕ_b , I_0 , Rs and Rsh values were determined as 7.95, 0.31 eV, 1.95×10^{-6} A, $3.13 \times 10^4 \Omega$ and $3.85 \times 10^4 \Omega$, respectively. In addition, the photodetector parameters of the produced MIM structure; photocurrent (I_{ph}), sensitivity (R) and specific detective (D*) values were also investigated at different light intensities and the maximum values were determined to be 7.85×10^{-5} A, 6.09×10^{-3} A.W⁻¹ and 1.86×10^7 Jones, respectively.

Keywords: Metal-insulator-metal, MIM, pentacene, optoelectronic.

¹Giresun Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama Araştırma Merkezi Giresun, Türkiye, faith.unal@giresun.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0002-6155-7051>

1. Giriş

Metal-insulator-metal (MIM) fotodedektörler yarı iletken bant kenarının çok altındaki foton enerjisini algılama, oda sıcaklığında çalışma ve kontrol edilebilir algılama avantajları nedeniyle son zamanlarda oldukça dikkat çekmektedir (Goykhman, Desiatov, Khurgin, Shappir, & Levy, 2011; Lin, Chen, Lai, & Yu, 2014; Missoni, Ortiz, & Martínez Ricci, 2023; Scales & Berini, 2010; Siddik, Haldar, Das, Roy, & Sarkar, 2023; C. Zhang, Wu, Zhan, Giannini, & Li, 2016). MIM yapılarının foton algılama özelliğinin yanı sıra fotokataliz, yüzey görüntüleme ve fotovoltaj gibi uygulama alanlarında da kullanılmaktadır (C. Zhang et al., 2016).

Çeşitli organik malzemeler arasında, polisiklik aromatik hidrokarbon ailesinden olan pentasen ($C_{22}H_{14}$), yüksek hol hareketliliği nedeniyle en umut verici organik yarı iletkenlerden biridir (Gundlach, Kuo, Nelson, & Jackson, 1999). Fakat yüksek foto duyarlılığa sahip olmasına rağmen pentasen üzerine oldukça az çalışma yapılmıştır (Kim, Choi, Kim, Kim, & Im, 2003). Pentasen üzerine yapılan ilk çalışma termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak transparan Au ile Al metalleri arasına sandviç şeklinde gerçekleştirilmiştir (Lee, Hwang, Park, Kim, & Im, 2004). Ancak çalışmalar oldukça sınırlıdır (Lee et al., 2004).

İnce film bazlı optoelektronik cihaz üretiminde oldukça yaygın kullanılan yöntemler vardır (Mahmoud, Ibrahim, & Riad, 2000). Bu yöntemler arasında termal buharlaştırma yöntemi, temiz ve pürüzsüz filmler üretmek, üretilen filmin kalınlığının kontrol edilebilir olması, vakum ortamında gerçekleştiğinden dolayı ekstra kirliliklerin önüne geçilebilmesi gibi özelliklerinden dolayı oldukça yaygın kullanılmaktadır (Ünal, 2021).

Bu yüzden bu çalışmada Ag ve Cu metalleri arasına pentasen kaplanarak MIM yapısı oluşturulmuş, temel diyot ve fotodiyot parametreleri karanlık ve farklı ışık şiddetlerinde karakterize edilmiş ve pentasen bazlı cihaz uygulamalarına bir alternatif sunmak amaçlanmıştır.

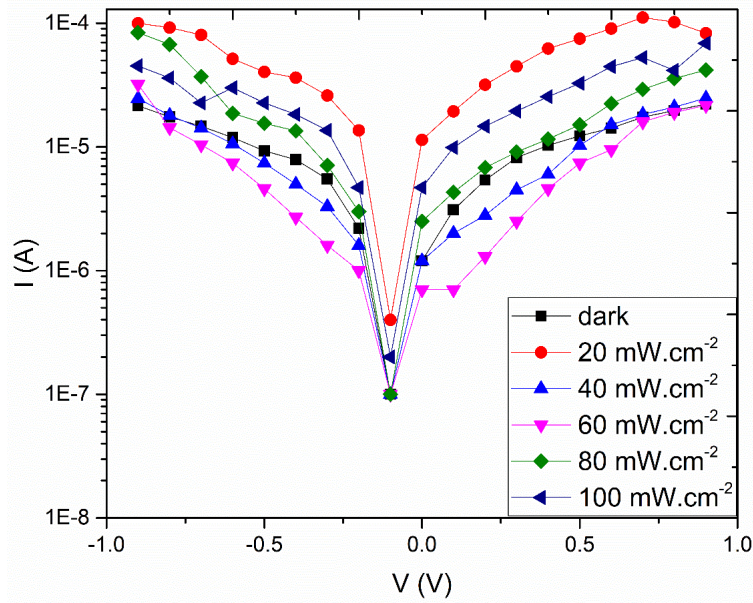
2. Materyal ve Metod

Kaplama prosesinin tümü Vaksis marka (PVD- MT/2M2T) model termal buharlaştırma sistemiyle gerçekleştirilmiştir. Alt kontak olarak 200 nm kalınlığındaki Cu metali 1 cm² lik cam alt taban üzerine $\approx 10^{-6}$ torr basınç altında buharlaştırılmıştır. Daha sonra yaklaşık 100 nm kalınlığında pentasen yalıtkan (insulator) tabakası $\approx 10^{-6}$ torr basınç altında Cu plaka üzerine büyütülmüştür. Üst kontak olarak Ag metali çapı 0.77 mm olan dairesel boşluklara sahip maske kullanılarak penatcene üzerine yine $\approx 10^{-6}$ torr basınç altında kaplanmıştır ve Ag/pentasen/Cu MIM yapısı üretilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Ag/pentase/Cu MIM yapısının optoelektronik özelliklerinin belirlenmesi

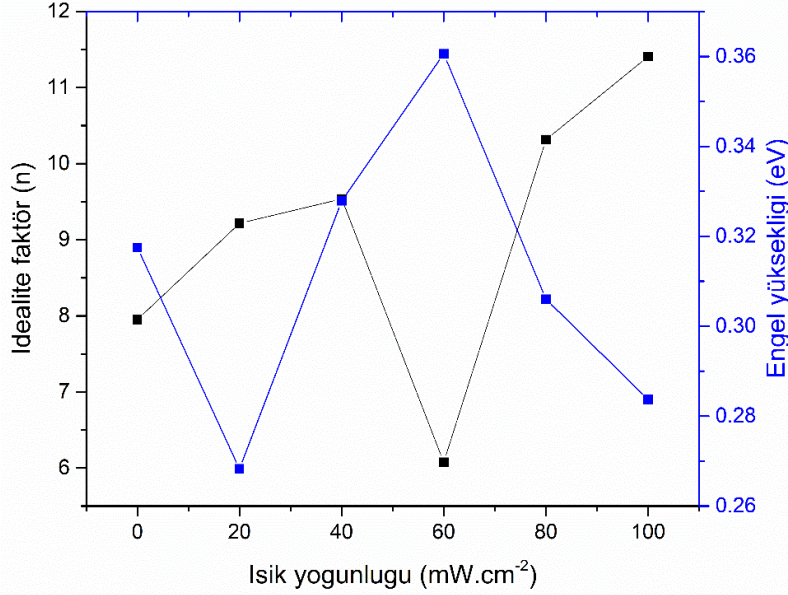
Ag/pentase/Cu MIM yapısının elektriksel analizi ± 0.9 V potansiyelde karanlık ve 20, 40, 60, 80, 100 mW.cm^{-2} ışık şiddetleri altında gerçekleştirilmiştir. Şekil 1’de Ag/pentase/Cu yapısının yarılogaritmik I-V grafiği verilmiştir. Ters ve düz beslem altında akım değerlerinin bir asimetric davranış sergilediği ve yapının ışığa duyarlı olduğu gözlemlenmiştir. 0.1 V değerinde ve karanlıkta cihazın doğrultma oranı (RR) 3.1×10^1 iken sırasıyla 20, 40, 60, 80 ve 100 mW.cm^{-2} ışık şiddetlerinde 4.85×10^1 , 2.0×10^1 , 7×10^0 , 4.3×10^1 ve 4.9×10^1 dir. Yüksek voltaj bölgesine doğru gidildikçe RR değeri exponansiyel bir şekilde azalmaktadır ve 1’e yaklaşmaktadır. Yüksek voltaj bölgesindeki heteroeklemlerin RR değerlerinin azalması metal ile organik tabaka arayüzdeki yük birikimine bağlanabilir (Saron, Hashim, Naderi, & Allam, 2013; Unal, 2023; Xu, Zhang, He, Wang, & Xie, 2011).



Şekil 1. Ag/pentase/Cu MIM yapısının I-V karakterizasyonu

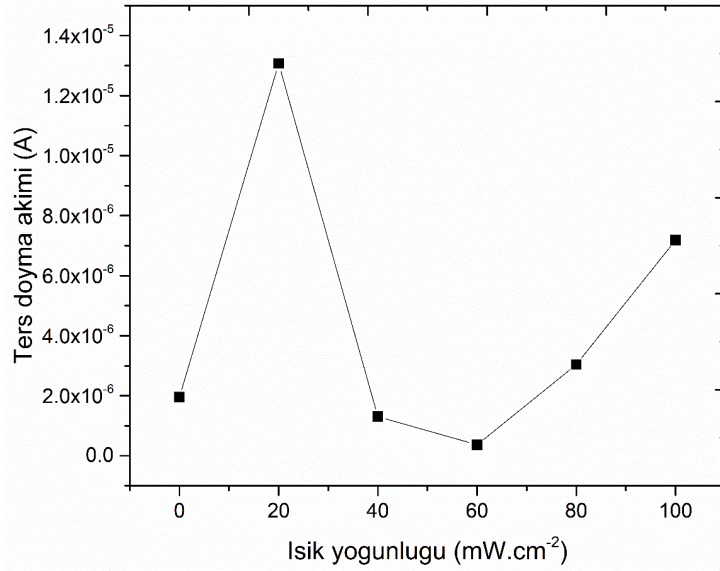
Asimetric davranış sergileyen heteroeklemler termiyonik emisyon teorisiyle analiz edilebilir (Sze, Li, & Ng, 2021). Ag/pentase/Cu yapısının termiyonik emisyon teorisiyle hesaplanan idealite faktörü ve engel yüksekliği ϕ_b değerlerinin ışık şiddetine bağlı değişimleri Şekil 2’de verilmiştir. Karanlık ortamda Ag/pentase/Cu yapısının n değeri 7.95 iken ϕ_b değeri 0.31 eV’dir. Işık şiddetinin artmasıyla n ve ϕ_b değerleri dalga bir şekilde değerler almaktadır ve aralarında ters bir korelasyon vardır. Dalgalı değişim ışığın etkisiyle organik tabakadaki moleküllerin yeniden düzenlenmesi ile

açıklanabilir. Yüksek ϕ_b değeri n değerini ideale yaklaştırmaktadır ve en düşük n değeri 6.07 ile 60 mW.cm^{-2} de 0.36 eV ϕ_b değerinde gözlemlenmiştir. Termoiyonik emisyon teorisiyle hesaplanan n değerleri ideal değer olan 1'den oldukça uzaktır. Bunun nedeni, tabakalarda istenmeyen oksit oluşumu, arayüz durumlarının varlığı, kirlilik oluşumu ve seri direnç etkisidir (Çakar & Türüt, 2003).



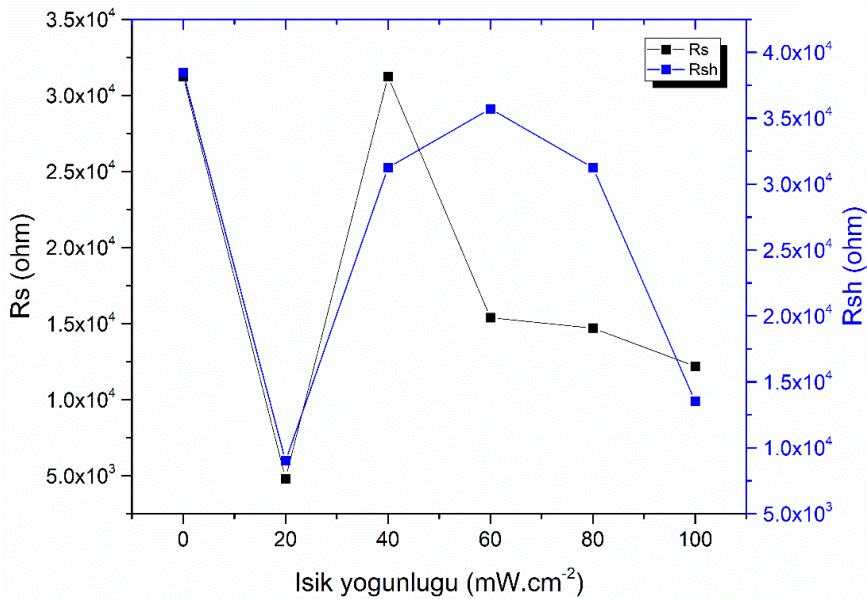
Şekil 2. Ag/pentase/Cu MIM yapısının idealite faktörü ve engel yüksekliğinin ışık şiddetine bağlı değişimi

Ag/pentase/Cu MIM yapısının ters doyma akımı (I_0) değerlerinin ışık şiddetine bağlı değişimi Şekil 3'te verilmiştir. Karanlık ortamda I_0 değeri 1.95×10^{-6} A iken en yüksek I_0 değeri 20 mw.cm^{-2} ışık şiddetinde 1.3×10^{-5} A olarak en düşük I_0 değeri 60 mw.cm^{-2} ışık şiddetinde 3.68×10^{-7} A olarak belirlenmiştir. Engel yüksekliğinin en düşük olduğu ışık yoğunluğunda ters doyma akımı maksimum, engel yüksekliğinin maksimum olduğu değerde ters doyma akımı minimum değere ulaşmıştır. Engel yüksekliği değerinin büyük olması sızıntı akımlarının metal ile organik tabaka arasında geçişi engellemektedir.



Şekil 3. Ag/pentaseen/Cu MIM yapısının ters doyma akımının ışık şiddetine bağlı değişimi

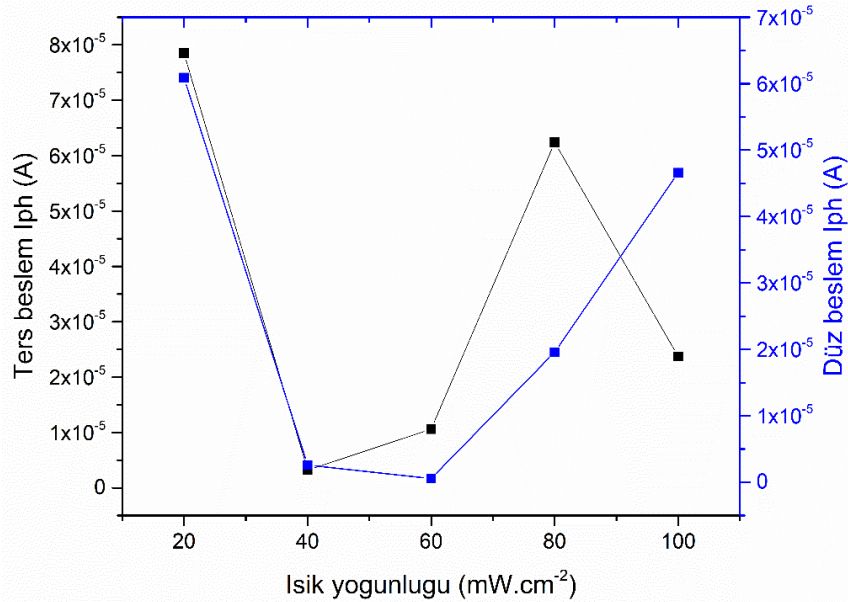
Seri direnç (R_s) ve shunt direnç (R_{sh}) asimetric davranış sergileyen yapılarda oldukça önemli parametrelerdir. Bu parametrelerin belirlenebilmesi için eklem direnci ohm kanunundan yola çıkılarak R_j ($R_j = dV/dI$) nin uygulama potansiyeline karşı çizilen grafiğinden belirlenebilir. Yüksek ters beslem voltaj bölgesinde neredeyse sabit kalan R_j değeri bize R_{sh} değerini verirken düz beslemin yüksek voltaj bölgesinde neredeyse sabit kalan R_j değeri bize R_s değerini verir (Çaldıran, Şinoforoğlu, Metin, Aydoğan, & Meral, 2015; Zurnacı et al., 2021). Şekil 4'te Ag/pentaseen/Cu MIM yapısının R_s ve R_{sh} değerlerinin ışık şiddetine bağlı değişimi verilmektedir. Karanlık ortamda R_s ve R_{sh} değerleri sırasıyla $3.13 \times 10^4 \Omega$ ile $3.85 \times 10^4 \Omega$ olduğu belirlenmiştir. En düşük R_s ve R_{sh} değerleri engel yüksekliğinin en düşük olduğu 20 mW.cm^{-2} de gözlemlenmiştir ve bu değerler sırasıyla $4.8 \times 10^3 \Omega$ ile $9 \times 10^3 \Omega$ dur.



Şekil 4. Ag/pentaseen/Cu MIM yapısının seri ve shunt direnç değerlerinin ışık şiddetine bağlı değişimi

Işık enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren cihazlara fotodedektörler denir. Fotodedektörlerin çalışması; ışıkla taşıyıcıların üretilmesi, bu taşıyıcıların transferi ve yük taşıyıcı çıkış sinyalini sağlamak için uç elektrotta ekstraksiyondur ("Photodetectors and Solar Cells," 2006). Ag/pentase/Cu MIM yapısının fotodedektör parametreleri; fotoakım I_{ph} ($I_{ph}=I_{ill}-I_{dark}$), üretilen fotoakımın gelen optik gücün oranı olan Responsivity ($R=I_{ph}/P_{inc.A}$) ve dedektör gürültüsüne kıyasla zayıf bir sinyalin ne kadar iyi tespit edilebileceğini karakterize eden özgül dedektiflik $D^*=R\sqrt{A}\cdot(A/2qI_{dark})^{1/2}$ ile hesaplanmıştır (Aktas et al., 2023; Gündüz, Turan, Kaya, & Çolak, 2013; Kaur & Kumar, 2021; Patel et al., 2019; X. Zhang et al., 2013). Burada I_{ill} ışık altında akım, I_{dark} karanlık ortamdaki akım, P_{inc} ışık şiddeti, A aktif alandır.

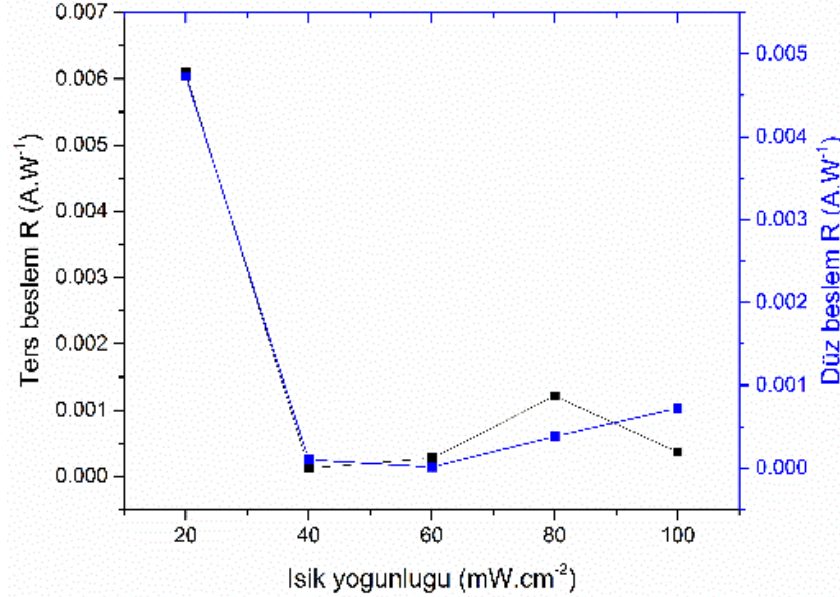
Şekil 5'te Ag/pentase/Cu MIM yapısının I_{ph} değerinin ters ve düz beslemde ışık şiddetine bağlı değişimi verilmektedir. Hem ters hem de düz beslemde maksimum I_{ph} değerleri $20 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ ışık şiddetinde gözlemlenmiştir. Ters beslemde maksimum I_{ph} değeri $7.85 \times 10^{-5} \text{ A}$ iken düz beslemde maksimum I_{ph} değeri $6.09 \times 10^{-5} \text{ A}$ 'dır. Seri direncin düşük olması I_{ph} değerlerinin yüksek olmasına sebep olmuştur. Ayrıca $20 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ ışık şiddeti Ag/pentase/Cu MIM yapısının maksimum fotojenere olduğu ve doygunluğa ulaştığı ışık şiddetidir. Ters beslemde minimum I_{ph} değeri $40 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ ışık şiddetinde gözlemlenmişken, düz beslemde minimum I_{ph} değeri $60 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ ışık şiddetinde gözlemlenmiştir. Bu değerler sırasıyla $3.2 \times 10^{-6} \text{ A}$ ve $5.57 \times 10^{-7} \text{ A}$ dir.



Şekil 5. Ag/pentase/Cu MIM yapısının $\pm 0.9 \text{ V}$ 'ta I_{ph} değerlerinin ışık şiddetine bağlı değişimi

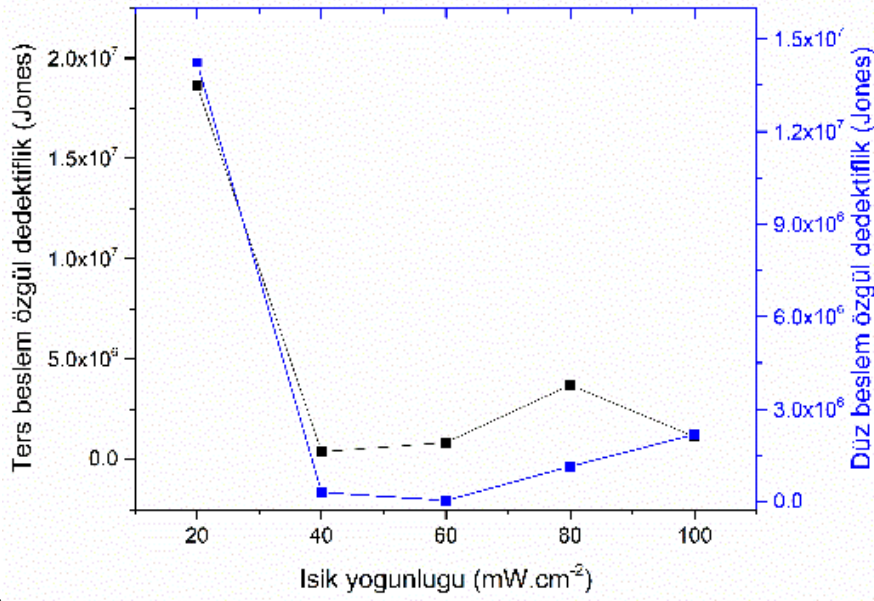
Şekil 6'da Ag/pentase/Cu MIM yapısının R değerlerinin ışık şiddetine bağlı değişimi verilmektedir. Hem ters hem de düz beslemde maksimum R değeri $20 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ ışık şiddetinde gözlemlenmiştir. Ters beslemde maksimum R değeri $6.09 \times 10^{-3} \text{ A}\cdot\text{W}^{-1}$ iken düz beslemde maksimum

R değeri $4.72 \times 10^{-3} \text{ A.W}^{-1}$ 'dir. Işık şiddetinin artmasıyla hem ters hem de düz beslemde R değerleri neredeyse exponansiyel bir şekilde azalmıştır. Bu azalışın sebebi ışık yoğunluğunun radyal değişimiyle ışık soğrulmasının azalmasıdır (Patel et al., 2019). Ters beslemde en düşük R değeri 40 mW.cm^{-2} ışık şiddetinde iken düz beslemde en düşük R değeri 60 mW.cm^{-2} ışık şiddetindedir. Bu değerler sırasıyla $1.24 \times 10^{-4} \text{ A.W}^{-1}$ ve $1.29 \times 10^{-5} \text{ A.W}^{-1}$ 'dir.



Şekil 6. Ag/pentaseen/Cu MIM yapısının $\pm 0.9 \text{ V}$ 'ta R değerlerinin ışık şiddetine bağlı değişimi

Şekil 7 de Ag/pentaseen/Cu MIM yapısının D^* değerlerinin ışık şiddetine bağlı değişimi verilmektedir. Maksimum D^* değeri hem ters hem de düz beslemde 20 mW.cm^{-2} ışık şiddetinde gözlemlenmiştir. Bu değerler sırasıyla 1.8×10^7 Jones ile 1.42×10^7 Jones'tur. Işık şiddetinin yükselmesiyle D^* değerleride R ye benzer şekilde trend sergilemişlerdir. Ters beslemde en düşük D^* değeri 3.8×10^5 Jones iken düz beslemde en düşük D^* değeri 0.4×10^5 Jones'tur.



Şekil 7. Ag/pentasen/Cu MIM yapısının ± 0.9 V'ta D^* değerlerinin ışık şiddetine bağlı değişimi

3. Sonuçlar ve Öneriler

İki metal arasına organik pentasen bileşiği termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak başarılı bir şekilde büyütülmüştür ve MIM yapısı üretilmiştir. Üretilen yapının I-V karakteristiğinden asimetric davranış sergilediği ve ışığa duyarlı olduğu gözlemlenmiştir. Karanlık ve ışık altında MIM yapısının hem diyot parametreleri hem de fotodedektör parametreleri belirlenmiştir. Karanlık ortamda sırasıyla n , ϕ_b , I_0 , R_s ve R_{sh} değerleri 7.95, 0.31 eV, 1.95×10^{-6} A, $3.13 \times 10^4 \Omega$ ile $3.85 \times 10^4 \Omega$ olduğu görülmüştür. Işık altında diyot ve fotodedektör parametrelerinin değişimi sebepleriyle birlikte tartışılmış ve açıklanmıştır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Aktas, S., Ünal, F., Kurt, M. S., Koç, M. M., Arslan, T., Aslan, N., & Coşkun, B. (2023). Investigation of fundamental electrical and optoelectronic properties of an organic- and carbon-based MnPc/GC photodiode with high photosensitivity. *Physica Scripta*. Retrieved from <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1402-4896/aceb41>
- Çakar, M., & Türüt, A. (2003). The conductance and capacitance-frequency characteristics of the organic compound (pyronine-B)/p-Si structures. *Synthetic Metals*, 138(3), 549-554. doi:10.1016/S0379-6779(02)01249-3
- Çaldıran, Z., Şinoforoğlu, M., Metin, Ö., Aydoğan, Ş., & Meral, K. (2015). Space charge limited current mechanism (SCLC) in the graphene oxide-Fe₃O₄ nanocomposites/n-Si heterojunctions. *Journal of Alloys and Compounds*, 631, 261-265. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.117>

- Goykhman, I., Desiatov, B., Khurgin, J., Shappir, J., & Levy, U. (2011). Locally oxidized silicon surface-plasmon Schottky detector for telecom regime. *Nano Letters*, 11(6), 2219-2224.
- Gundlach, D., Kuo, C.-C., Nelson, S., & Jackson, T. (1999). *Organic thin film transistors with field effect mobility > 2 cm²/Vs*. Paper presented at the 1999 57th Annual Device Research Conference Digest (Cat. No. 99TH8393).
- Gündüz, B., Turan, N., Kaya, E., & Çolak, N. (2013). The photo-electrical properties of the p-Si/Fe(II)-polymeric complex/Au diode. *Synthetic Metals*, 184, 73-82. doi:<https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2013.10.002>
- Kaur, D., & Kumar, M. (2021). A strategic review on gallium oxide based deep-ultraviolet photodetectors: recent progress and future prospects. *Advanced optical materials*, 9(9), 2002160.
- Kim, S., Choi, Y., Kim, K., Kim, J., & Im, S. (2003). Fabrication of p-pentacene/n-Si organic photodiodes and characterization of their photoelectric properties. *Applied Physics Letters*, 82(4), 639-641.
- Lee, J., Hwang, D. K., Park, C. H., Kim, S. S., & Im, S. (2004). Pentacene-based photodiode with Schottky junction. *Thin Solid Films*, 451-452, 12-15. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2003.10.086>
- Lin, K.-T., Chen, H.-L., Lai, Y.-S., & Yu, C.-C. (2014). Silicon-based broadband antenna for high responsivity and polarization-insensitive photodetection at telecommunication wavelengths. *Nature Communications*, 5(1), 3288.
- Mahmoud, S. A., Ibrahim, A. A., & Riad, A. S. (2000). Physical properties of thermal coating CdS thin films using a modified evaporation source. *Thin Solid Films*, 372(1), 144-148. doi:[https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(00\)01053-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(00)01053-1)
- Missoni, L. L., Ortiz, G. P., & Martínez Ricci, M. L. (2023). Understanding the coupling between MIM cavities due to single and double Tamm plasmon polaritons. *Optical Materials: X*, 20, 100273.
- Patel, A., Pataniya, P., Solanki, G. K., Sumesh, C. K., Patel, K. D., & Pathak, V. M. (2019). Fabrication, photoresponse and temperature dependence of n-VO₂/n-MoSe₂ heterojunction diode. *Superlattices and Microstructures*, 130, 160-167. doi:<https://doi.org/10.1016/j.spmi.2019.04.032>
- . Photodetectors and Solar Cells. (2006). In *Physics of Semiconductor Devices* (pp. 663-742).
- Saron, K. M. A., Hashim, M. R., Naderi, N., & Allam, N. K. (2013). Interface properties determined the performance of thermally grown GaN/Si heterojunction solar cells. *Solar Energy*, 98, 485-491.
- Scales, C., & Berini, P. (2010). Thin-film Schottky barrier photodetector models. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 46(5), 633-643.
- Siddik, A., Haldar, P. K., Das, U., Roy, A., & Sarkar, P. K. (2023). Organic-inorganic FAPbBr₃ perovskite based flexible optoelectronic memory device for light-induced multi level resistive switching application. *Materials Chemistry and Physics*, 297, 127292.
- Sze, S. M., Li, Y., & Ng, K. K. (2021). *Physics of semiconductor devices*: John wiley & sons.
- Unal, F. (2023). Production of coronene/2–3% Al:CdO nanocomposite heterojunctions by hybrid methods and comparison of optoelectronic properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(4), 279. doi:10.1007/s10854-022-09745-x
- Ünal, F. (2021). *DETERMINATION OF THE STRUCTURAL, OPTICAL AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF InSe/RUBRENE, CIS/RUBRENE, CIGS/RUBRENE, InSe/CORONENE, CIS/CORONENE, CIGS/CORONENE HETEROJOINTS GROWTH ON ITO GLASS*. (Doctoral). Inonu University, Turkey.
- Xu, Z., Zhang, L., He, H., Wang, J., & Xie, M. (2011). Growth of GaN on Si (111): Surfaces and crystallinity of the epilayers and the transport behavior of GaN/Si heterojunctions. *Journal of Applied Physics*, 110(9), 093514.
- Zhang, C., Wu, K., Zhan, Y., Giannini, V., & Li, X. (2016). Planar microcavity-integrated hot-electron photodetector. *Nanoscale*, 8(19), 10323-10329. doi:10.1039/C6NR01822J
- Zhang, X., Zhang, X., Wang, L., Wu, Y., Wang, Y., Gao, P., . . . Jie, J. (2013). ZnSe nanowire/Si p-n heterojunctions: Device construction and optoelectronic applications. *Nanotechnology*, 24(39). doi:10.1088/0957-4484/24/39/395201
- Zurnacı, M., Ünal, F., Demir, S., Gür, M., Şener, N., & Şener, İ. (2021). Synthesis of a new 1,3,4-thiadiazole-substituted phenanthroimidazole derivative, its growth on glass/ITO as a thin film and analysis of some surface and optoelectronic properties. *New Journal of Chemistry*, 45(48), 22678-22690. doi:10.1039/D1NJ04375G