

Metal Oksit ve Organik Bazlı Çoklu Heteroeklemin Yapısal ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi

Sıtkı AKTAŞ^{1*}, Fatih ÜNAL²

Öz

Bu çalışmada, yarıiletken metal oksit ZnO bileşiği elektrokimyasal kaplama yöntemi kullanılarak cam/ITO üzerine büyütülmüştür. Daha sonra C₂₄H₁₂ organik yarıiletken katmanı termal buharlaştırma yöntemiyle cam/ITO/ZnO ekleminin üzerine kaplanmıştır ve cam/ITO/ZnO/C₂₄H₁₂ çoklu heteroeklemi üretilmiştir. Üretilen tabakaların yüzeysel analizi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmış, ZnO tabakasının nanopul (nanoflake) ve nanoçubuk, C₂₄H₁₂ tabakasının nanotel şeklinde büyüdüğü görülmüştür. Ayrıca ZnO tabakasının elementel dağılımı Enerji dağılımlı X-ray spektroskopisi (EDS) ile incelenmiş, Zn ve O elementlerinin tabaka içerisinde homojen bir dağılım sergiledikleri görülmüştür. ±1.5V uygulama potansiyeli aralığında karanlık ve 100mW/cm² ışık şiddeti altında Ag/ITO/ZnO/C₂₄H₁₂/Ag çoklu heteroekleminin elektriksel özellikleri karakterize edilmiş. Karanlık ortamda, seri direnç (R_s), diyot idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_b), ters doyma akımı (I₀) sırasıyla ≈10⁴Ω, 7.5-6.5, 0.647 eV ve 5,7E-7 A değerlerini almışken, 100mW/cm² ışık şiddeti altında bu değerlerin sırasıyla ≈10³Ω, 6.5-1.3, 0.914 eV ve 1.9E-11 A olduğu görülmüştür. Çoklu heteroeklemin fotoiletkenlik mekanizması için önemli parametreler olan fotoakım (I_{ph}), fotoduyarlılık (R) ve fotohassasiyet (S) değerleri ileri besleme altında farklı voltaj değerlerinde belirlenmiştir. Ayrıca çoklu heteroeklemin fotovoltajik parametreleri hesaplanmış ve dolun faktörü FF'nin 0.56 olduğu görülmüştür. Tüm bu analizler sonucunda ürettiğimiz Ag/ITO/ZnO/C₂₄H₁₂/Ag çoklu heteroeklemin fotodiyot ve fotovoltajik davranış sergilediği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Fotodiyot, Çoklu heteroeklem, Hibrit heteroeklem, ZnO, C₂₄H₁₂, I-V karakterizasyon

Investigation of Structural and Electrical Properties of Metal Oxide and Organic Based Multi Heterojunction

Abstract

In this study, semiconductor metal oxide ZnO compound was grown on glass/ITO substrate by electrochemical deposition technique. Later on, C₂₄H₁₂ organic semiconductor layer was deposited on glass/ITO/ZnO junction by thermal evaporation method and glass/ITO/ZnO/C₂₄H₁₂ multi heterojunction was fabricated. Surface analyses of produced layers was performed by Scanning electron microscopy (SEM) and it is seen that surface morphology of ZnO and C₂₄H₁₂ has nanoflake-nanorod structures and, nanowire structure, respectively. In addition, the elemental distribution of the ZnO layer was examined by Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS), and it was observed that Zn and O elements exhibited a homogeneous distribution within the layer. The electrical properties of Ag/ITO/ZnO/C₂₄H₁₂/Ag multi heterojunction were characterized under dark and 100mW/cm² light intensity in the range of ±1.5V application potential. In the dark environment, series resistance (R_s), diode ideality factor (n), barrier height (Φ_b), reverse saturation current (I₀) were ≈10⁴Ω, 7.5-6.5, 0.647 eV and 5.7x10⁻⁷ A, respectively, while under 100mW/cm² light intensity, these values were found to be ≈ 103Ω, 6.5-1.3, 0.914 eV and 1. 9x10⁻¹¹ A, respectively. The photocurrent (I_{ph}), photosensitivity (R) and photosensitivity (S) values, which are important parameters for the photoconductivity mechanism of the multi heterojunction, were determined at different voltage values under forward bias. In addition, the photovoltaic parameters of the multi heterojunction were calculated and the fill factor FF was found to be 0.56. As a result, it was observed that the Ag/ITO/ZnO/C₂₄H₁₂/Ag multi-heterojunction exhibited photodiode and photovoltaic behaviour.

Keywords: Photodiode, Multi heterojunction, Hybrid junction, ZnO, C₂₄H₁₂, I-V characterization

¹Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Giresun, Türkiye, sitki.aktas@giresun.edu.tr

²Giresun Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi, Giresun, Türkiye, fatih.unal@giresun.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0002-9143-6752>.

²<https://orcid.org/0000-0002-6155-7051>

1. Giriş

Çinko oksit (ZnO) nanoyapılar, elektronik ve fotonik cihazlarda potansiyel uygulamalarından dolayı oldukça dikkat çekmektedir. Çinko oksit geniş bant aralığı, piezoelektrik özelliği, yüksek uyarılma bağlanma enerjisi ve optoelektronik özellikleri açısından yarıiletken teknolojisinde çokça tercih edilen bir malzemedir (Sharma ve ark., 2014; Pathak ve ark., 2016; Isteyag ve Muzaffer, 2020). Ametal, geçiş metalleri ve nadir toprak elementlerinin ZnO'nun elektriksel ve optik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla ZnO içerisine katkılandığı örnekler literatürde mevcuttur (Ueda ve ark., 2001; Pathak ve ark., 2016; Samadi ve ark., 2016). Bunun yanında ZnO yapısının kalınlığı ve kaplama yöntemleri de elektriksel ve optik özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli bir paya sahiptir (Lee ve ark., 2002; Isteyag ve Muzaffer, 2020). ZnO nano yapıları DC ve RF magnetron püskürtme (Lee ve ark., 2002; Pathak ve ark., 2016), termal buharlaştırma (Chrissanthopoulos ve ark., 2011), atomik katman biriktirme (Pietruszka ve ark., 2014), spin kaplama (Rana ve ark., 2018; Isteyag ve Muzaffer, 2020), hidrotermal sentezleme (Liu ve Zeng, 2003; Zhao ve ark., 2019) ve elektrokimyasal kaplama (Chandrappa ve Venkatesha, 2012; Pourmortazavi ve ark., 2015; Marimuthu ve ark., 2018) gibi sıralanabilecek yöntemlerde kaplanmaktadır.

Aynı zamanda organik yarıiletkenlerde sahip oldukları özellikler bakımından birçok yeni nesil devre elamanları üzerine yapılan çalışmalarda önemli bir yere sahiptirler (Klausk, 2010; Yuvaraja ve ark., 2020; Zhang ve ark., 2020; Zhang ve ark., 2021). Genel olarak kontakların akım taşıma mekanizmasını kontrol edebilmek için yalıtkan veya yarıiletken metal oksit tabakalar tercih edilirken, organik yarıiletkenler sahip oldukları elektriksel karakteristiklerinden dolayı arayüz tabakası olarak önemli ölçüde tercih edilmektedirler (Güllü ve ark., 2010; Pireira ve ark., 2018; Erdal, 2020; Kocuyigit ve ark., 2020; Meng ve ark., 2020). C₂₄H₁₂ (Coronene) çok halkalı hidrokarbonlu monoklinik kristal yapıda bulunan, yüksek taşıyıcı konsantrasyonuna sahip ve fotoluminesans özelliği olan organik bir moleküldür. Bu özelliklerinden dolayı organik bazlı fotodiyotlar ve ışık yayan diyotların (LED) geliştirilmesinde ara yüz tabakası olarak tercih edilmektedir (Chen ve ark., 2012; Erdal, 2020; Ünal, 2021).

Bu çalışmada ZnO tabakası cam/ITO üzerine başarılı bir şekilde elektrokimyasal kaplama yöntemiyle büyütülmüştür. Cam/ITO/ZnO tabakasının üzerine C₂₄H₁₂ organik tabakası termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak biriktirilmiştir. Farklı yöntemlerle üretilen ZnO ve C₂₄H₁₂ tabakaların yüzey morfolojileri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiş ve ayrıca ZnO tabakasının elementel dağılımları enerji dağılım spektroskopisi (EDS) yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Elektriksel özelliklerinin incelenebilmesi için en alt tabaka ITO ve en üst tabaka C₂₄H₁₂ üzerine termal buharlaştırma yöntemiyle noktasal Ag kontakları atılmıştır ve Ag/ITO/ZnO/C₂₄H₁₂/Ag çoklu heteroeklemi elde edilmiştir. Optoelektronik uygulamalara bir

alternatif sunmak için elektriksel analiz $\pm 1.5V$ potansiyel aralığında karanlık ve 100 mW/cm^2 ışık şiddeti altında gerçekleştirilmiştir. Farklı metotlar kullanarak karanlık ve ışıklı ortamda seri direnç R_s , diyot idealite faktörü n , engel yüksekliği Φ_b , ters doyma akımı I_0 gibi diyot parametreleri ve 100 mW/cm^2 ışık şiddeti altında heteroeklemin fotoiletkenliği hakkında önemli parametreler olan fotoakım I_{ph} , fotoduyarlılık R ve fotohassasiyet S değerleri belirlenmiştir. Ayrıca ürettiğimiz çoklu heteroeklemin ışık altında fotovoltajik parametreleri belirlenmiş ve buradan doluluk faktörü FF hesaplanmıştır.

2. Materyal ve Metot

ZnO ince film tabakasının cam/ITO (2x1cm) üzerine elektrokimyasal kaplama yöntemiyle büyütülmeden önce, cam/ITO tabakası ilk olarak sabunlu su ile 10 dakika ultrasonik banyoda tutuldu. Daha sonra, ultra saf su ile durulanarak, sırasıyla 10 dakika boyunca aseton ve propanal içerisinde ultrasonik banyoya bırakıldı. Son aşamada, cam/ITO yüzeyi nitrojen gazı ile kurutulmuştur.

Çoklu heteroeklem elektrokimyasal kaplama ve termal buharlaştırma yöntemleri kullanılarak iki aşamada üretilmiştir. İlk olarak, elektrokimyasal kaplama çözeltisi 5 mM ZnCl_2 (20 mL) ile 250 mM LiCl (10 mL) karıştırılarak toplamda 30 mL elde edilmiştir ve ince film üçlü elektrot kombinasyonu ile AUTOLAB PGSTAT128N kaplama sistemi kullanılarak kaplanmıştır. Karşıt elektrot olarak Pt plaka, referans elektrot olarak Ag/AgCl referans elektrodu ve çalışma elektrodu olarakta 2 cm^2 yüzey alanına sahip cam/ITO kullanılmıştır. Üretim boyunca çözelti sıcaklığı hotplate kullanılarak $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de sabit tutulmuş ve uygulama voltajı -0.9 V olarak, kaplama süresi 3600 sn olarak belirlenmiştir ve bu süre sonunda cam/ITO/ZnO tabakası elde edilmiştir.

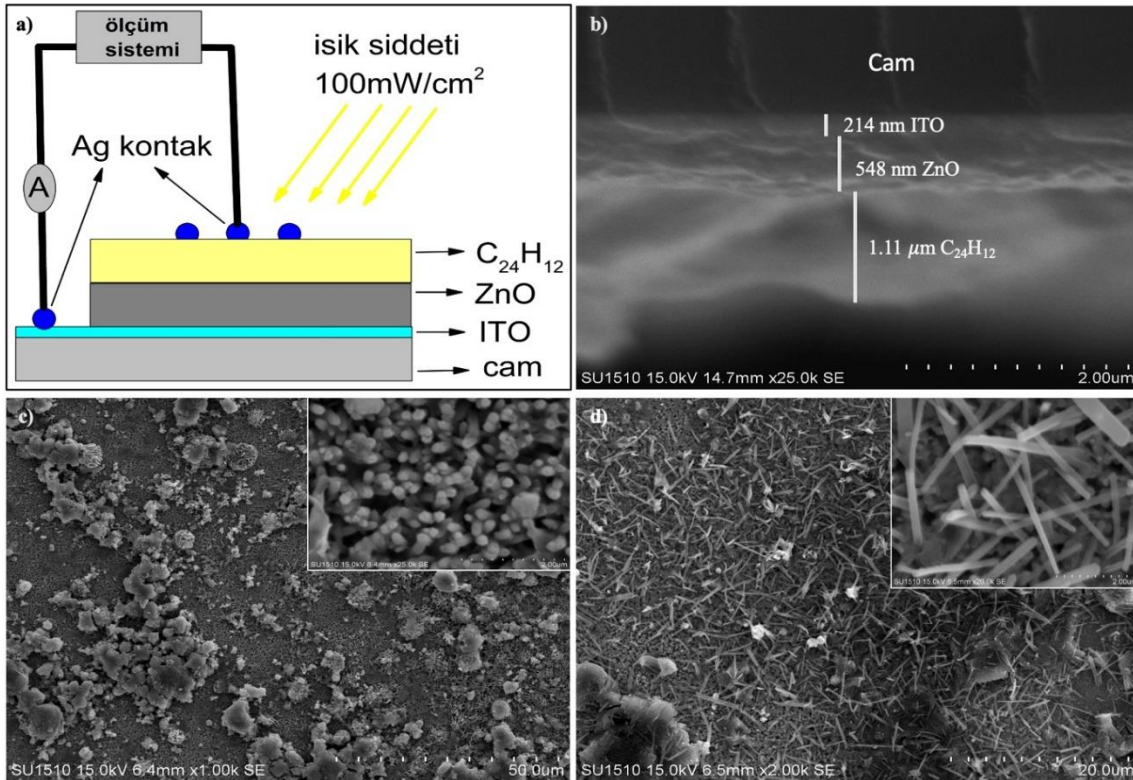
Termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak toz formdaki $\text{C}_{24}\text{H}_{12}$ organik bileşiği ince bir film formunda cam/ITO/ZnO tabakasının üzerine büyütülmüştür ve cam/ITO/ZnO/ $\text{C}_{24}\text{H}_{12}$ çoklu heteroeklemi üretilmiştir. Kaplama oda sıcaklığında ve $\approx 10^{-5}$ Torr basınç altında Vaksis (PVD-MT/2M2T) sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Elektriksel karakterizasyon işlemi için cam/ITO/ZnO/ $\text{C}_{24}\text{H}_{12}$ çoklu heteroekleminin en alt tabakası ITO yüzeyi ile en üst tabakası $\text{C}_{24}\text{H}_{12}$ yüzeyine Ag kontaklar atılmıştır ve Ag/ITO/ZnO/ $\text{C}_{24}\text{H}_{12}$ /Ag çoklu heteroeklem yapısı oluşturulmuştur. Şekil 1a'da bu çoklu heteroeklemin şematik gösterimi verilmiştir.

Elektrokimyasal kaplama yöntemiyle üretilen ZnO tabakasının ve termal buharlaştırma metodu ile büyütülen $\text{C}_{24}\text{H}_{12}$ ince film tabakasının yüzey morfolojileri taramalı elektron mikroskopu (SEM) (Hitachi SU 1510) ile gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında, ZnO yüzeyinin elementel analizi SEM'e bağlı enerji dağılımlı X-ray spektroskopisi (SEM-EDS) kullanılarak yapılmıştır. Çoklu heteroeklemin kesit alanından alınan SEM görüntüleriyle büyütülen film kalınlıkları tespit edilmiştir. Elde edilen

çoklu heteroeklemin I-V karakteristik ölçümleri Solar Simulator LSS 900 Characterisation System kullanılarak karanlık ve 100 mW cm^{-2} ışık şiddeti altında belirlenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

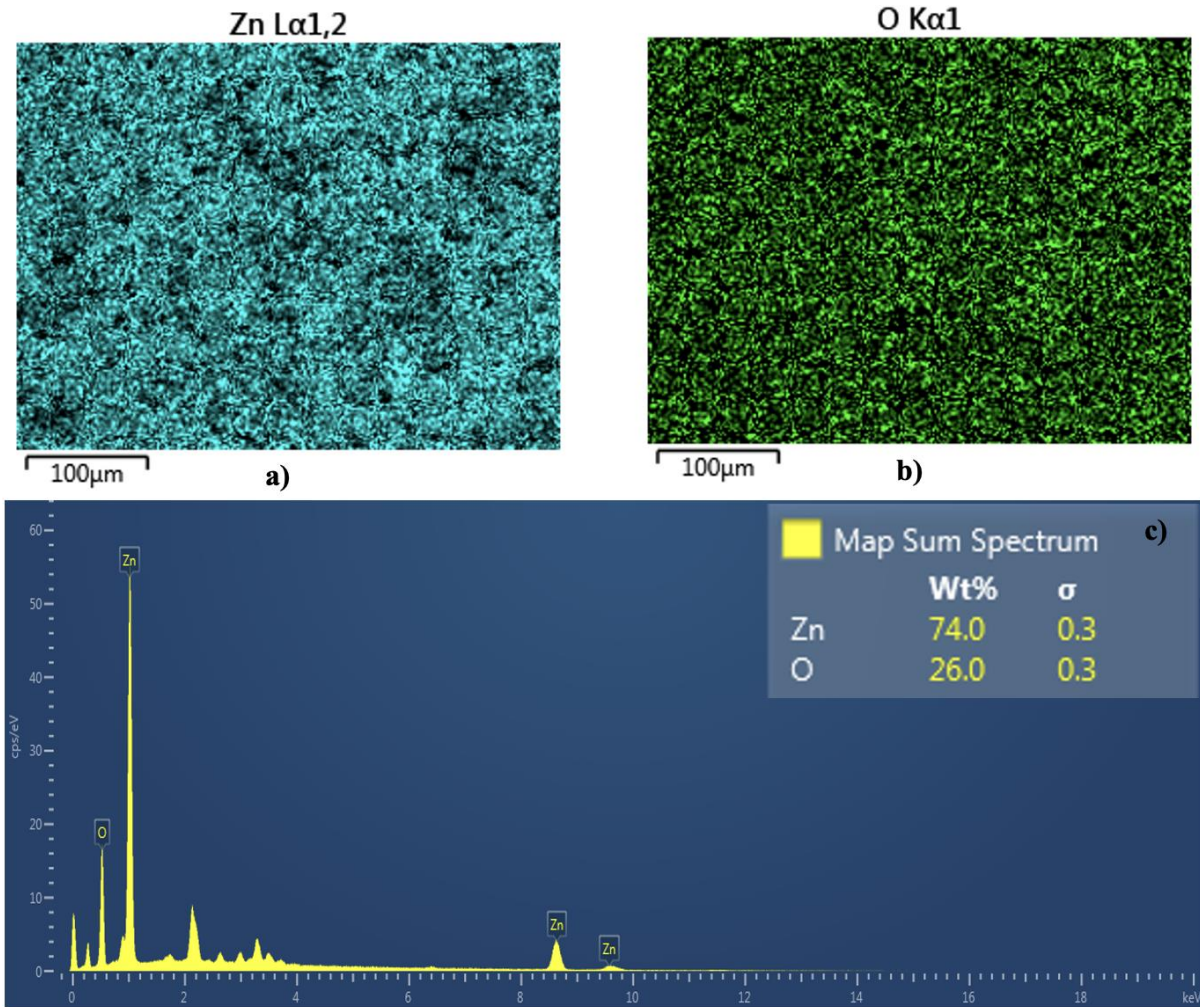
Farklı iki metot kullanılarak üretilen Ag/ITO/ZnO/C₂₄H₁₂/Ag çoklu heteroeklemin kesit alanı SEM görüntüsü Şekil 1b'de verilmiştir. Şekil 1b'den ITO tabakasının kalınlığı 214 nm, ZnO tabakasının kalınlığı 548 nm ve en üst tabaka olan C₂₄H₁₂ tabakasının 1.11 μm kalınlığında olduğu görülmüştür. Şekil 1c'de sunulan SEM görüntüsüne göre ZnO yüzeyinin homojen bir yapıya sahip olmadığı ve nanoçubuk ve nanopul (nanoflake) yapılarının birlikte var olduğu görülmektedir. Bunun yanında Şekil 1c içinde ZnO yüzeyinin 25.000 büyütmede nanoçubuk yapılarının yakından görüntüsü verilmiştir. Şekil 1d'de görüldüğü gibi ZnO yüzeyinde büyütülen C₂₄H₁₂ yapısının genel olarak daha homojen olduğu görülmüştür. Ayrıca Şekil 1d içinde sunulan C₂₄H₁₂ yüzeyinin 20.000 büyütmedeki SEM görüntüsünden, C₂₄H₁₂ tabakasının nanoteller (nanowires) şeklinde büyüdüğü görülmüştür.



Şekil 1. Ag/ITO/ZnO/C₂₄H₁₂/Ag çoklu heteroeklemin a) şematik görüntüsü b) kesit alanından elde edilmiş SEM görüntüsü c) ZnO yüzeyinin 1000 büyütme SEM görüntüsü ve inset görüntü aynı yüzeyin 25.000 büyütme SEM görüntüsü d) Coronene yüzeyinin 2000 büyütme SEM görüntüsü ve inset görüntü aynı yüzeyin 20.000 büyütme SEM görüntüsü.

Elektrokimyasal kaplama yöntemiyle büyütülen ZnO bileşiğinin elementel analizi SEM-EDS kullanılarak yapılmıştır. Şekil 2a ve 2b'de verilen görüntülerde Zn ve O elementlerinin yapı içerisinde

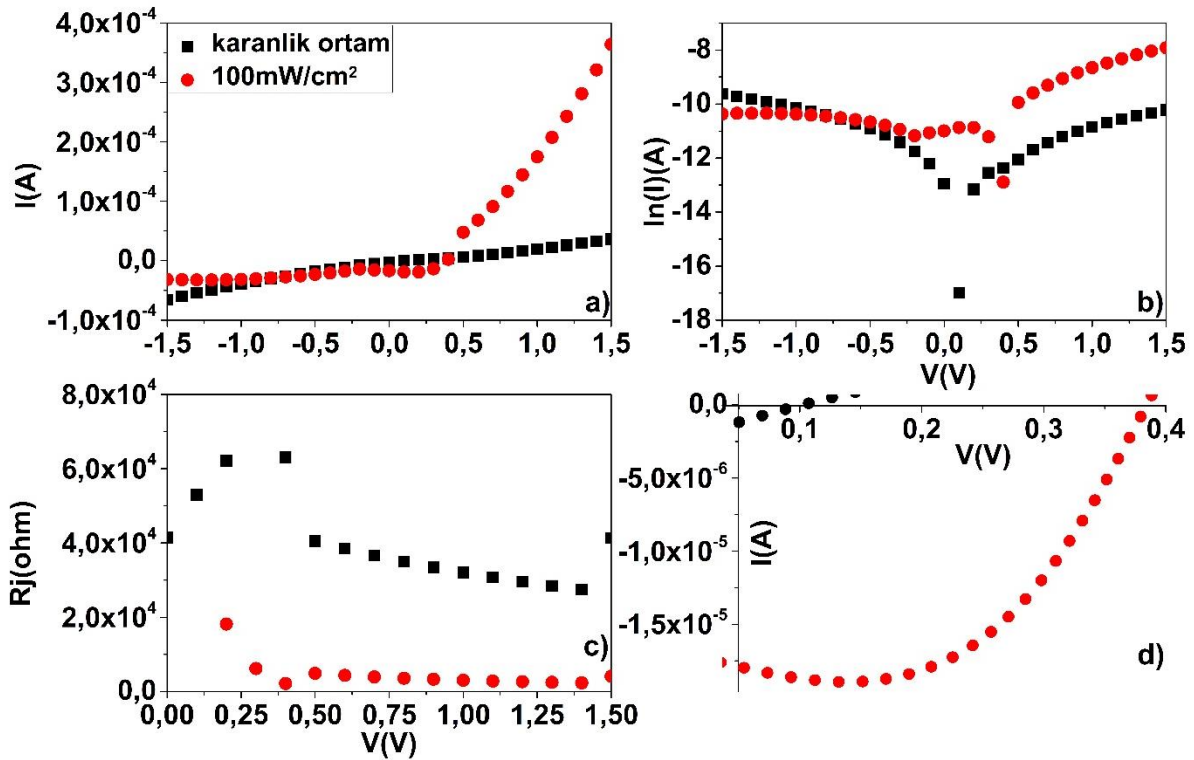
homojen bir şekilde dağılıma sahip oldukları görülmektedir. Şekil 2c'de ZnO bileşiğinin elementel dağılım spektrumu verilmiştir. Yapı içerisinde Zn oranının %74 ve O oranının %26 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2. a) Zn, b) O' nun ZnO ince film yapısındaki dağılımlarının SEM-EDX görüntüleri c) ZnO yapısının EDS spektrumu.

Ürettiğimiz çoklu heteroeklemin optoelektronik özelliklerinin belirlenebilmesi için karanlık ve 100mW/cm^2 ışık şiddeti altında elektriksel özellikleri karakterize edilmiştir. Şekil 3a'da Ag/ITO/ZnO/C₂₄H₁₂/Ag çoklu heteroekleminin $\pm 1.5\text{V}$ potansiyel aralığında karanlık ve 100mW/cm^2 ışık şiddeti altında I-V grafiği verilmiştir. Işık altında ileri besleme potansiyelinde akımın arttığı bariz bir şekilde görülmektedir. Yasak enerji bant aralığından yüksek enerjiye sahip fotonlar eklemler arasında oluşan fakirleşmiş bölge sınırlarında yeni elektron boşluk çiftlerinin oluşmasını sağlar. Dış elektrik alan altında oluşan gerilim bölge sınırlarındaki tanecikler arasında bir iç elektrik alan oluşumuna sebep olur. Bu iç elektrik alan yeni oluşan elektron boşluk çiftlerini birbirinden ayırmaya zorlar. Elektronlar bu iç elektrik alan kuvveti ile hızlı bir şekilde süpürülür ve serbest hale gelir. Serbest hale gelen bu elektronlar doğal olarak asal taşıyıcı konsantrasyonu artırır ve akımın artmasını

sağlar (Ünal, 2013; Ünal, 2021). Ayrıca ışık şiddeti altında ürettiğimiz çoklu heteroekleminin doğrultma oranının arttığı da görülmektedir.



Şekil 3. Ag/ITO/ZnO/C₂₄H₁₂/Ag çoklu heteroekleminin karanlık ve 100 mW/cm² ışık şiddeti altında a) I-V, b) yarı logaritmik I-V, c) R_j-V ve d) fotodiyot ve fotovoltajik bölge gösterim grafikleri.

Şekil 3b’de Ag/ITO/ZnO/C₂₄H₁₂/Ag çoklu heteroeklemin yarı logaritmik I-V grafiği verilmiştir. Ters ve ileri besleme altında özellikle ışıklı ortamda bir asimetrinin olduğu bariz şekilde görülmektedir. İleri besleme altında lineer bölgeler karanlık ortamda 0.1-0.3V arasındaki bölgeye düşerken ışıklı ortamda lineer bölge 0.4-0.5V potansiyel aralığına düşmektedir. Lineer bölge potansiyellerinden daha yüksek potansiyel değerlerine doğru çıkıldıkça seri direnç etkisi ortaya çıkmaktadır ve lineerlik bozulmaktadır. Geri besleme altında doymamışlık akım durumu her iki ortamda da görülmektedir fakat karanlık ortamda bu durum daha fazladır çünkü geri besleme akım eğrisinin eğimi daha fazladır. Işığın etkisiyle bu durum iyileşmiştir. Doymamışlık akım durumunun temel sebebi çoklu heteroeklemi oluşturan tabakalar arasında oluşan arayüzey durumları ve bu tabakalar ile metal kontaklar arasında oluşan görüntü yük kuvvetlerinin azalması sebep olur (Kampen ve ark., 2002).

Şekil 3c’de eklem direncinin ($R_j = dV/dI$) ileri besleme voltajına karşı çizilen grafiği verilmiştir. Uygulama potansiyelinin artmasıyla R_j değerlerinin azaldığı görülmektedir. Düşük voltaj bölgesinde R_j değerleri karanlık ortamda $6.2 \times 10^4 \Omega$ iken ışıklı ortamda $1.8 \times 10^4 \Omega$ ’dur. Yüksek voltaj bölgesinde bu değerler karanlık ortamda $2.7 \times 10^4 \Omega$ ’a düşmüşken ışıklı ortamda $2.3 \times 10^3 \Omega$ ’a kadar düşmüştür.

Yüksek voltaj bölgesindeki R_j değerleri aynı zamanda çoklu heteroeklemin seri direnç değerleridir. R_j değerlerindeki bu düşüşün sebebi fotoiletkenliğin artmasıyla açıklanabilir.

Şekil 3d'de Ag/ITO/ZnO/C₂₄H₁₂/Ag çoklu heteroekleminin fotovoltaiik ve fotodiyot bölgeleri gösterilmiştir. Bu bölgeden 100 mW cm⁻² ışık şiddeti altında fotovoltaiik parametreler olan I_{mpp} , I_{sc} , V_{mpp} , V_{oc} ve FF değerleri belirlenmiştir. Burada I_{mpp} maksimum güç bölgesi akımı, I_{sc} kısa devre akımı, V_{mpp} maksimum güç bölgesi voltajı, V_{oc} açık devre voltajı ve FF dolun faktörüdür. Fotodiyotlar için I-V grafiğinde 4 bölge vardır (Allison, 1990). V_{oc} değeri, I-V eğrisinin bu bölgede gerilim eksenini kestiği noktadan elde edilir. I_{sc} değeri, I-V eğrisinin akım eksenini aynı bölgede kestiği noktadan elde edilir. I_{mpp} ve V_{mpp} 'nin değeri, I-V eğrisi ile dördüncü bölgedeki koordinatları arasında çizilebilecek en büyük dikdörtgen içindedir. V_{mpp} değeri bu dikdörtgenin voltaj eksenini kestiği noktadır, I_{mpp} değeri ise bu dikdörtgenin akım eksenini kestiği noktadır. Dolun faktörü (FF) denklem 1'den hesaplanmıştır (Bartesaghi ve ark., 2015).

$$FF = \frac{I_{mpp} \times V_{mpp}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (1)$$

sırasıyla I_{mpp} , I_{sc} , V_{mpp} , V_{oc} ve denklem 1'den hesaplanan FF değeri, $-1.42 \times 10^{-5} A$, -1.78×10^{-5} , 0.27V, 0.38V ve 0.56'dır.

MS (metal-yarıiletken), MPS (metal polimer yarıiletken) SBD (Schottky engel diyotu) diyotlarının akım gerilim mekanizmalarından yola çıkarak ve farklı metotlar kullanılarak bu diyotlara ait diyot idealite faktörü, engel yüksekliği, seri direnç gibi parametreleri hesaplanabilir (Çetinkaya ve ark., 2013; Shetty ve ark., 2015).

Geleneksel metotta akım gerilim arasındaki ilişki termoiyonik emisyon teorisine göre belirlenir ve denklem 2 (Al-Ta'ii ve ark., 2016; Aldemir ve ark., 2017)'de bu denklem verilmiştir.

$$I = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{kT}\right) - 1\right] \quad (2)$$

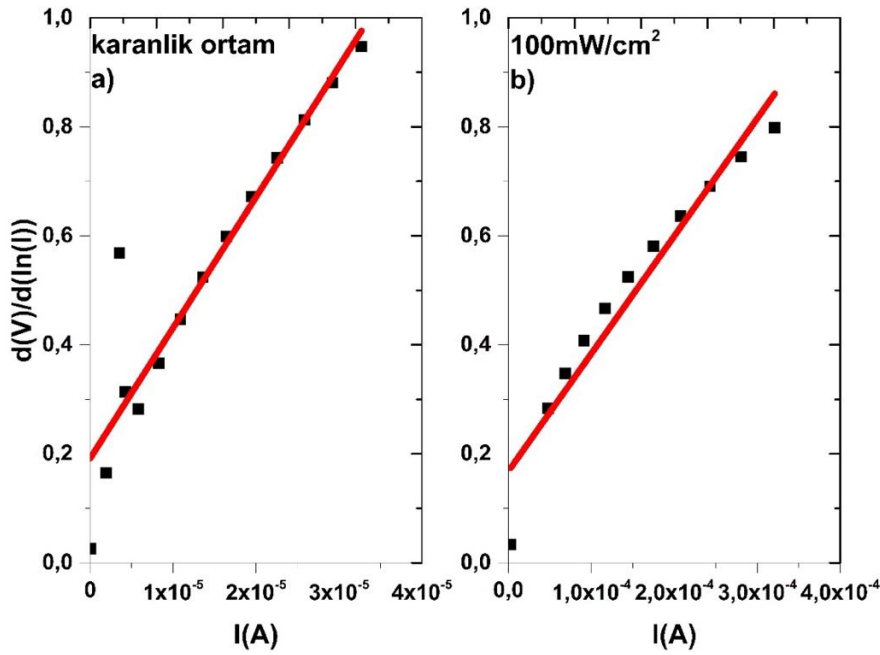
Burada A aktif diyot alanı, A* Richardson sabiti, q elektronun yükü, ϕ_b engel yüksekliği, k Boltzman sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklık, V uygulanan potansiyel, R_s seri dirençtir. Düşük voltaj bölgesinde $\ln(I)$ nın V ye karşı çizilen grafiğinin lineer bölgesinin eğimi diğer sabitlerle birlikte hesaplanırsa n idealite faktörü bulunmuş olur. $\ln(I)$ nın V ye karşı çizilen grafiğinin lineer bölgesinin $\ln(I)$ 'yı kestiği nokta bize ters doyma akımı, I_0 'ı verir. I_0 , n ve diğer sabitler kullanılarak buradan engel yüksekliği de hesaplanabilir.

Cheung&Cheung metodunda ise Cheung&Cheung fonksiyonu (Cheung ve Cheung, 1986) kullanılarak diyot idealite faktörü n ve seri direnç R_s değeri belirlenir. Eşitlik 3'te Cheung&Cheung fonksiyonu verilmiştir.

$$\frac{dV}{d\ln(I)} = IR_s + \frac{nkT}{q} \quad (3)$$

Eşitlik 3'te I-V grafiğinin düşük ve orta voltaj bölgesindeki değerler kullanılarak $\frac{dV}{d\ln(I)}$ 'nin I ya karşı grafiği çizilir. $\frac{dV}{d\ln(I)}$ 'nin I ya karşı çizilen grafiğin eğimi R_s değerini, eğrinin y eksenini kestiği değerden de diğer sabitler kullanılarak n idealite faktörü hesaplanır. Ayrıca Şekil 1c grafiğinden de R_s seri direnç belirlenebilir (Rajagopla Reddy ve ark., 2021).

Şekil 4'te Ag/ITO/ZnO/C₂₄H₁₂/Ag çoklu heteroekleminin a) karanlık ve b) 100 mW cm⁻² ışık şiddeti altında $\frac{dV}{d\ln(I)}$ 'nin I ya karşı çizilen grafiği verilmiştir.



Şekil 4. Ag/ITO/ZnO/C₂₄H₁₂/Ag çoklu heteroekleminin a) karanlık ve b) 100 mW cm⁻² ışık şiddeti altında $\frac{dV}{d\ln(I)}$ 'nin I ya karşı çizilen grafiği.

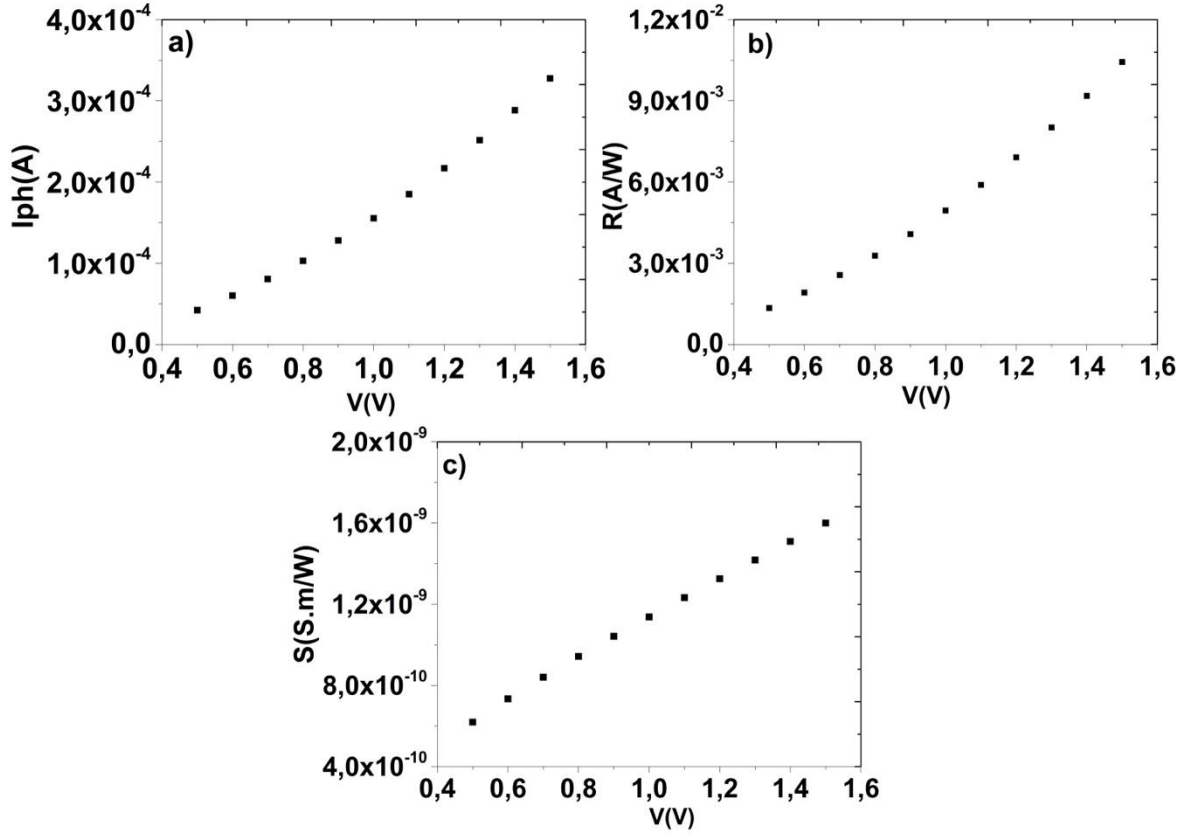
Karanlık ve 100 mW cm⁻² ışık şiddeti altında, geleneksel ve Cheung&Cheung metotlarından hesaplanan n , R_s , ϕ_b ve I_0 parametreleri tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Ag/ITO/ZnO/C₂₄H₁₂/Ag çoklu heteroekleminin karanlık ve 100mW/cm² ışık şiddeti altında elektriksel parametreleri.

Parametre	$\frac{d(V)}{d(\ln(I))} - I$		$\ln(I) - V$		$Rj - V$	
	n	Rs(Ω)	n	Φ_b (eV)	I ₀ (A)	Rs(Ω)
Karanlık	7.40	2.3x10 ⁴	6.37	0.647	5,7E-7	2.7x10 ⁴
100mW/cm ²	6.50	2.1x10 ³	1.31	0.914	1,9E-11	2.3x10 ³

Tablo 1’den görüldüğü üzere farklı metotlarla hesaplanan Rs değerlerinin ışığın etkisiyle azaldığı görülmektedir. Işığın etkisiyle oluşan yeni elektron boşluk çiftleri taşıyıcı konsantrasyonunu artırmış bu da Rs değerlerinin düşmesine sebep olmuştur. Her iki metotla hesaplanan diyot idealite faktörü n değerlerinde ışık şiddetinin artmasıyla düşüş gözlenmiştir. Bu durum Rs değerlerinin azalmasıyla açıklanabilir. Hem karanlık ortamda hem de 100 mW cm⁻² ışık şiddeti altındaki n değerleri ideal diyot değeri olan 1’den uzaktır. Karanlık ortamdaki n>>2 olma durumu elektron hole rekombinasyon durumunun baskın olduğu anlamına gelir. Ayrıca tabakalarda oluşan kirlilik durumları, istenmeyen oksit tabakalarının meydana gelmesi diyot idealite faktörünün olağan değerden sapmasına sebep olur. Ayrıca literatürde n değerinin yüksek olduğu örnekler mevcuttur (Coşkun ve ark., 2018; Koç ve ark., 2019; Serkan ve ark., 2021). Geleneksel metotla hesaplanan Φ_b değeri ışık şiddetinin artmasıyla artmıştır. Bu durum ters doyma akımının azalmasına sebep olmuştur.

Fotoakım ($I_{ph}=I_{ill}-I_{dark}$), fotoduyarlılık (Responsivity, $R=I_{ph}/P_{inc}\cdot A$) ve fotohassasiyet (Sensitivity, $S=R\cdot T/V$) diyotlar için önemli parametrelerdir (Gündüz ve ark., 2013; Zhang ve ark., 2013; Patel ve ark., 2019). Burada I_{ill} ışık altında akım, I_{dark} karanlık ortamdaki akım, P_{inc} ışık şiddeti (100 mW cm⁻²), A kontak alanı, T aktif tabakanın kalınlığı ve V uygulama voltajıdır. Şekil 5a) I_{ph}, 5b) R ve 5c) S değerlerinin ileri besleme altında değişim grafikleri verilmiştir. Uygulama voltajının artmasıyla I_{ph} ve R değerleri eksponansiyel bir artış gözlemlenmişken S değerleri lineer bir artış göstermiştir. 0.5 V uygulama potansiyelinde I_{ph} değeri 4.22x10⁻⁵ A, R değeri 1.34x10⁻³ A W⁻¹, S değeri 6.18x10⁻¹⁰ S.m W⁻¹, 1.5 V uygulama potansiyelinde I_{ph} değeri 3.27x10⁻⁴ A, R değeri 1.04x10⁻² A W⁻¹, S değeri 1.59x10⁻⁹ S.m W⁻¹’dir. Elde edilen sonuçların literatürle uyumlu olduğu görülmüştür (İlhan ve ark., 2021; Aslan ve ark., 2022).



Şekil 5. Ag/ITO/ZnO/C₂₄H₁₂/Ag çoklu heteroekleminin 100 mW cm⁻² ışık şiddeti altında a) I_{ph}, b) R and c) S değerlerinin ileri besleme altında farklı voltaj değerlerine göre değişimi.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Metal oksit ZnO tabakası cam/ITO üzerine başarılı bir şekilde elektrokimyasal kaplama yöntemiyle büyütülmüştür. Cam/ITO/ZnO tabakasının üzerine C₂₄H₁₂ organik tabakası termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak biriktirilmiştir. Farklı yöntemlerle üretilen tabakaların ayrı ayrı SEM ve ZnO tabakasının EDS analizi yapılmıştır. Elektriksel özelliklerinin incelenebilmesi için en alt tabaka ITO ve en üst tabaka C₂₄H₁₂ üzerine termal buharlaştırma yöntemiyle noktasal Ag kontakları atılmıştır ve Ag/ITO/ZnO/C₂₄H₁₂/Ag çoklu heteroeklemi elde edilmiştir. Elektriksel analiz ±1.5V potansiyel aralığında karanlık ve 100 mW cm⁻² ışık şiddeti altında gerçekleştirilmiştir. Üretilen çoklu heteroeklemin doğrultucu karakteristik gösterdiği ve ışık altında elektriksel iletkenliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Farklı metotlar kullanarak karanlık ve ışıklı ortamda R_s, n, Φ_b , I₀ gibi diyot parametreleri ve 100 mW/cm² ışık şiddeti altında heteroeklemin fotoiletkenliği hakkında önemli parametreler olan I_{ph}, R ve S değerleri belirlenmiştir. Ayrıca ürettiğimiz çoklu heteroeklemin ışık altında fotovoltaik parametreleri I_{mpp}, I_{sc}, V_{mpp}, V_{oc} belirlenmiş ve buradan hesaplanan FF değerinin 0.56 olduğu görülmüştür.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Al-Ta'ii, H. M. J., Periasamy, V., and Amin, Y. M., (2016). Electronic Characterization of Au/DNA/ITO Metal-Semiconductor-Metal Diode and Its Application as a Radiation Sensor. *Plos One*, 11(1), e0145423. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0145423>
- Aldemir, D. A., Kökce, A., ve Özdemir, A. F., (2017). Schottky diyot parametrelerini belirlemede kullanılan metotların geniş bir sıcaklık aralığı için kıyaslanması. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1-1. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.279996>
- Allison, J., (1990). *Electronic Engineering Semiconductors and Devices*. London, England: McGraw-Hill College
- Aslan, N., Kurt, M. Ş., and Koç, M. M., (2022). Morpho-structural and optoelectronic properties of diamond like carbon–germanium (DLC-Ge) composite thin films produced by magnetron sputtering. *Optical Materials*, 126, 112229.
- Bartesaghi, D., Pérez, I. D. C., Kniepert, J., Roland, S., Turbiez, M., Neher, D., and Koster, L. J. A., (2015). Competition between recombination and extraction of free charges determines the fill factor of organic solar cells. *Nature Communications*, 6(1), 7083. <https://doi.org/10.1038/ncomms8083>
- Chandrupa, K. G., & Venkatesha, T. V., (2012). Electrochemical synthesis and photocatalytic property of zinc oxide nanoparticles. *Nano-Micro Letters*, 4(1), 14-24.
- Chen, L., Puniredd, S. R., Tan, Y.-Z., Baumgarten, M., Zschieschang, U., Enkelmann, V., Pisula, W., Feng, X., Klauk, H., & Müllen, K., (2012). Hexathienocoronenes: synthesis and self-organization. *Journal of the American Chemical Society*, 134(43), 17869-17872.
- Cheung, S. K., and Cheung, N. W., (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49(2), 85-87. <https://doi.org/10.1063/1.97359>
- Chrissanthopoulos, A., Baskoutas, S., Bouropoulos, N., Dracopoulos, V., Pouloupoulos, P., and Yannopoulos, S., (2011). Synthesis and characterization of ZnO/NiO p–n heterojunctions: ZnO nanorods grown on NiO thin film by thermal evaporation. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 9(2), 132-139.
- Coşkun, B., Mensah-Darkwa, K., Soyly, M., Al-Sehemi, A. G., Dere, A., Al-Ghamdi, A., Gupta, R., and Yakuphanoglu, F., (2018). Optoelectrical properties of Al/p-Si/Fe: N doped ZnO/Al diodes. *Thin solid films*, 653, 236-248.
- Çetinkaya, H. G., Tecimer, H., Uslu, H., & Altındal, Ş., (2013). Photovoltaic characteristics of Au/PVA (Bi-doped)/n-Si Schottky barrier diodes (SBDs) at various temperatures. *Current Applied Physics*, 13(6), 1150-1156. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2013.03.010>
- Erdal, M. O., (2020). Photoresponse properties of coronene nanowires thin-film-based photodiode. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(21), 18980-18987.

- Güllü, Ö., Asubay, S., Aydoğan, Ş., and Türüt, A., (2010). Electrical characterization of the Al/new fuchsin/n-Si organic-modified device. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 42(5), 1411-1416.
- Gündüz, B., Turan, N., Kaya, E., and Çolak, N., (2013). The photo-electrical properties of the p-Si/Fe(II)-polymeric complex/Au diode. *Synthetic Metals*, 184, 73-82. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2013.10.002>
- Ishteyaq, I., and Muzaffar, K., (2020). Performance characterization of (Pt, Au, Pd)/ZnO/n-Si/Al Schottky structures for varied temperature and UV illumination conditions. *Superlattices and Microstructures*, 145, 106604.
- İlhan, M., Koç, M. M., Coşkun, B., Erkovan, M., and Yakuphanoglu, F., (2021). Cd dopant effect on structural and optoelectronic properties of TiO₂ solar detectors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(2), 2346-2365.
- Kampen, T. U., Park, S., and Zahn, D. R. T., (2002). Barrier height engineering of Ag/GaAs(100) Schottky contacts by a thin organic interlayer. *Applied surface science*, 190(1), 461-466. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(01\)00919-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-4332(01)00919-9)
- Klauk, H., (2010). Organic thin-film transistors. *Chemical Society Reviews*, 39(7), 2643-2666.
- Koç, M. M., Aslan, N., Erkovan, M., Aksakal, B., Uzun, O., Farooq, W. A., & Yakuphanoglu, F., (2019). Electrical characterization of solar sensitive zinc oxide doped-amorphous carbon photodiode. *Optik*, 178, 316-326.
- Kocuyigit, A., Yilmaz, M., Aydogan, S., Incekara, U., and Sahin, Y., (2020). The performance of chitosan layer in Au/n-Si sandwich structures as a barrier modifier. *Polymer Testing*, 89, 106546.
- Lee, J., Choi, Y., Kim, J., Park, M., and Im, S., (2002). Optimizing n-ZnO/p-Si heterojunctions for photodiode applications. *Thin solid films*, 403, 553-557.
- Liu, B., & Zeng, H. C., (2003). Hydrothermal synthesis of ZnO nanorods in the diameter regime of 50 nm. *Journal of the American Chemical Society*, 125(15), 4430-4431.
- Marimuthu, T., Anandhan, N., & Thangamuthu, R., (2018). Electrochemical synthesis of one-dimensional ZnO nanostructures on ZnO seed layer for DSSC applications. *Applied surface science*, 428, 385-394.
- Meng, H., Han, Y., Zhou, C., Jiang, Q., Shi, X., Zhan, C., & Zhang, R., (2020). Conductive Metal-Organic Frameworks: Design, Synthesis, and Applications. *Small Methods*, 4(10), 2000396.
- 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.spmi.2019.04.032>
- Pathak, T. K., Kumar, V., Prakash, J., Purohit, L., Swart, H., & Kroon, R., (2016). Fabrication and characterization of nitrogen doped p-ZnO on n-Si heterojunctions. *Sensors and Actuators A: Physical*, 247, 475-481.
- Pereira, M. J., Matta, M., Hirsch, L., Dufour, I., Briseno, A., Gali, S. M., Olivier, Y., Muccioli, L., Crosby, A., & Ayela, C., (2018). Application of Rubrene Air-Gap Transistors as Sensitive MEMS Physical Sensors. *ACS applied materials & interfaces*, 10(48), 41570-41577.
- Pietruszka, R., Luka, G., Witkowski, B., Kopalko, K., Zielony, E., Bieganski, P., Placzek-Popko, E., & Godlewski, M., (2014). Electrical and photovoltaic properties of ZnO/Si heterostructures with ZnO films grown by atomic layer deposition. *Thin solid films*, 563, 28-31.
- Pourmortazavi, S. M., Marashianpour, Z., Karimi, M. S., & Mohammad-Zadeh, M., (2015). Electrochemical synthesis and characterization of zinc carbonate and zinc oxide nanoparticles. *Journal of Molecular Structure*, 1099, 232-238.
- Rajagopal Reddy, V., Prasad, C., Janardhanam, V., & Choi, C.-J., (2021). Electrical and carrier transport properties of Ti/ α -amylase/p-InP MPS junction with a α -amylase polymer interlayer. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-05532-2>
- Rana, V. S., Rajput, J. K., Pathak, T. K., & Purohit, L., (2018). Multilayer MgZnO/ZnO thin films for UV photodetectors. *Journal of Alloys and Compounds*, 764, 724-729.
- Samadi, M., Zirak, M., Naseri, A., Khorashadizade, E., and Moshfegh, A. Z., (2016). Recent progress on doped ZnO nanostructures for visible-light photocatalysis. *Thin solid films*, 605, 2-19.
- Serkan, U., Coşkun, B., Koç, M. M., ve Erkovan, M., (2021). Electrical Properties of ZnO: TiO₂ Nanocomposite Thin Films. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 221-231.
- Sharma, S., Vyas, S., Periasamy, C., and Chakrabarti, P., (2014). Structural and optical characterization of ZnO thin films for optoelectronic device applications by RF sputtering technique. *Superlattices and Microstructures*, 75, 378-389.

- Shetty, A., Roul, B., Mukundan, S., Mohan, L., Chandan, G., Vinoy, K. J., and Krupanidhi, S. B., (2015). Temperature dependent electrical characterisation of Pt/HfO₂/n-GaN metal-insulator-semiconductor (MIS) Schottky diodes. *AIP Advances*, 5(9). <https://doi.org/10.1063/1.4930199>
- Ueda, K., Tabata, H., & Kawai, T., (2001). Magnetic and electric properties of transition-metal-doped ZnO films. *Applied Physics Letters*, 79(7), 988-990.
- Ünal, F., (2013). *InSe ince filmlerinin farklı alt tabanlar üzerinde büyütülmesi ve optik, yapısal, fotoelektrik özelliklerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Kafkas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kars.
- Ünal, F., (2021). *ITO cam üzerine büyütülen InSe/rubrene, CIS/rubrene, CIGS/rubrene, InSe/coronene, CIS/coronene, CIGS/coronene heteroeklemlerin yapısal, optik ve elektriksel özelliklerinin belirlenmesi*, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Yuvaraja, S., Nawaz, A., Liu, Q., Dubal, D., Surya, S. G., Salama, K. N., and Sonar, P., (2020). Organic field-effect transistor-based flexible sensors. *Chemical Society Reviews*, 49(11), 3423-3460.
- Zhang, D., Fan, B., Ying, L., Li, N., Brabec, C. J., Huang, F., and Cao, Y., (2021). Recent progress in thick-film organic photovoltaic devices: *Materials, devices, and processing*. *SusMat*, 1(1), 4-23.
- Zhang, D.W., Li, M., & Chen, C.F., (2020). Recent advances in circularly polarized electroluminescence based on organic light-emitting diodes. *Chemical Society Reviews*, 49(5), 1331-1343.
- Zhang, X., Zhang, X., Wang, L., Wu, Y., Wang, Y., Gao, P., Han, Y., & Jie, J., (2013). ZnSe nanowire/Si p-n heterojunctions: Device construction and optoelectronic applications. *Nanotechnology*, 24(39), Article 395201. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/24/39/395201>
- Zhao, X., Nagashima, K., Zhang, G., Hosomi, T., Yoshida, H., Akihiro, Y., Kanai, M., Mizukami, W., Zhu, Z., & Takahashi, T., (2019). Synthesis of monodispersely sized ZnO nanowires from randomly sized seeds. *Nano Letters*, 20(1), 599-605.