


Yüksek Sıcaklıkta Tavllanmış Cu Katkılı ZnO (CZO) Arayüzeyli Au/n-Si Yapısının Dielektrik Özelliklerinin Detaylı İncelenmesi

Halil İbrahim Efkere* 

Gazi Üniversitesi, Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi, 06500, Ankara, Türkiye

Öne Çıkanlar

- Elektronik tabanlı cihazlar için Cu katkılı ZnO (CZO) yapısının önemi.
- Malzeme özellikleri tavlama ile iyileştirilen CZO yapısının dielektrik özelliklerinin incelenmesi.
- Gerilime bağlı olarak geniş frekans aralığında (10 kHz-1 MHz) detaylı analiz.

Makale Bilgileri

Geliş: 06/04/2024
Kabul: 28/05/2024

Anahtar Kelimeler

ZnO,
CZO,
Yüksek tavlama sıcaklığı,
Dielektrik özellikler.

Öz

Bu çalışmada, 600 °C'de tavllanmış bakır (Cu) katkılı ZnO (CZO) arayüzeyine sahip Au/n-Si yapısının dielektrik özellikleri araştırıldı. CZO ince film kaplama, RF püskürtme sistemi ile n-tipi Si levha üzerine gerçekleştirildi. Elektriksel analiz için Au metal kontağı yapılarak cihaz tamamlandı. Au/CZO/n-Si yapısının dielektrik parametreleri türü dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), dielektrik kayıp tanjantı ($\tan \delta$) ve ac iletkenliği (σ_{ac}) kapasitans (C) parametreleri ve iletkenlik (G) verileri kullanılarak belirlendi. Bu veriler 10 kHz-1 MHz frekans aralığında 1, 2, 3 ve 4 V için elde edilmiştir. Analiz sonucunda dielektrik parametrelerinin gerilim değerine bağlı olduğu görülmüştür.

Detailed Investigation of the Dielectric Properties of Au/n-Si Structure With Cu-Doped ZnO (CZO) Interface Annealed at High Temperature

Highlights

- The importance of Cu-doped ZnO (CZO) structure for electronic-based devices.
- The investigation of dielectric properties of CZO structure whose material properties were improved by annealing.
- The detailed analysis in a wide frequency range (10 kHz-1 MHz) depending on voltage.

Article Info

Received: 06/04/2024
Accepted: 28/05/2024

Keywords

ZnO,
CZO,
High temperature
annealing,
Dielectric properties.

Abstract

In this study, the dielectric properties of the Au/n-Si structure with Cu-doped ZnO (CZO) interface annealed at 600 °C were investigated. The CZO thin film coating was carried out on the n-type Si wafer with the RF sputtering system. The device was completed by making Au metal contact for electrical analysis. The dielectric parameters kind of dielectric constant (ϵ'), dielectric loss (ϵ''), dielectric loss tangent ($\tan \delta$), and ac conductivity (σ_{ac}) of the Au/CZO/n-Si structure were determined using capacitance (C) and conductance (G) data. These data were obtained for 1, 2, 3, and 4 V in the 10 kHz-1 MHz frequency range. As a result of the analysis, it was seen that the dielectric parameters depend on the voltage value.



Makale, Creative Commons 4.0 (CC BY NC SA) uluslararası lisansı altında açık erişim olarak yayımlanmaktadır.

* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Halil İbrahim Efkere, i.efkere@gazi.edu.tr



1. GİRİŞ

Bileşik bir yarı iletken olan Çinko Oksit (ZnO), yapısındaki oksijen eksikliğinden dolayı n tipi yarı iletkenlerden biridir. ZnO, 3,4eV'lik geniş bant aralığı, güçlü radyasyon direnci, doğada kolay bulunabilirliği ve insan sağlığına zararlı olmaması nedeniyle optik ve optoelektronik çalışmalara geniş fırsatlar sunan yenilikçi bir yarı iletkenidir. Bu nedenle biyomateryaller, dokunmatik ekranlı monitörler, akustik dalga cihazları, UV ışınlarından korunmaya yönelik kozmetik malzemelerin üretimi gibi çeşitli ticari ve teknolojik alanlarda kullanılmaktadır. ZnO bazlı sistemler, yapısındaki oksijen boşlukları ve çinko arayerleri nedeniyle düşük dirence sahiptir [1]. Bu nedenle ZnO, ışık yayan diyotlar (LED'ler), Schottky doğrultucular ve güneş pilleri gibi düşük direnç gerektiren sistemlerde kullanım için iyi bir aday malzemedir [2]. Yenilikçi teknolojik uygulamalarda kullanılmak üzere olağanüstü fiziksel özelliklere sahip ZnO yapısı çeşitli elementler (geçiş metalleri, nadir toprak elementleri vb.) ile katkılanabilmektedir. ZnO'nun elektriksel ve optik özelliklerini önemli ölçüde değiştirmek için Cu, bu elementler arasında en ideal olanıdır çünkü yarıçaplı ve elektronik kabuklu Cu atomları Zn atomlarına benzemektedir [2]. ZnO, metal-oksit-yarı iletken (MOS) hetero eklem yapıları için kullanılan iyi bir arayüz katmanıdır [3,4]. MOS yapılarındaki veya oksit/yarıiletken arayüzüne yakın tuzaklara sahip yapılarındaki arayüz durumlarının elektriksel özellikleri, oksit yapısının homojenliğine, kalınlığına, katkı konsantrasyonuna ve R_s seri direncine bağlıdır [5-7]. MOS yapılarındaki arayüz yoğun düzeyde yakalamaya sahiptir. Tuzak seviyelerini kullanarak elektron hareketliliğini azaltarak ZnO gibi metal oksit yapılarının elektriksel özellikleri değiştirilebilir. Bu durum MOS formundaki ZnO gibi yapıların dielektrik özelliklerinden yararlanılarak enerji depolama cihazı olarak kullanılmasının önünü açmaktadır [8,9].

İnce filmlerin yapısal ve elektriksel özellikleri üretim teknikleriyle doğrudan ilişkilidir [10-15]. RF magnetron püskürtme, kullanılan alt tabakaya iyi yapışan homojen filmler üretebilir. Ayrıca bu teknikle gaz basıncı, altlık sıcaklığı gibi kontrol edilebilir parametrelerle istenilen özelliklerde filmler üretmek mümkündür. RF magnetron püskürtme tekniğinin en önemli avantajlarından biri tekrarlanabilirliktir.

Daha önceki çalışmalarımızda RF magnetron püskürtme tekniği ile biriktirilen bakır (Cu) katkılı ZnO (CZO) ince film yapılarının yapısal, morfolojik ve bazı sıcaklığa bağlı elektriksel özellikleri detaylı olarak incelenmiştir [16]. 600 °C'de tavlanan numunenin analiz sonuçlarının diğer tavlama sıcaklıklarındaki numunelere göre daha iyi olduğunu gözlemledik. Bu nedenle bu çalışmada 600 °C'de tavlanan CZO nanoyapılarının dielektrik özelliklerini frekans bağımlılığının araştırılması amaçlanmıştır. 600 °C'de tavllanmış CZO MOS yapısının iletim mekanizmalarını tahmin etmek için, dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), dielektrik kayıp tanjantı ($\tan\delta$), elektrik modülüsün reel kısmı (M'), elektrik modülüsün sanal kısmı (M''), elektriksel ac iletkenlik (σ_{ac}) parametreleri frekansa bağlı olarak incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

%5 Cu katkılı ZnO yapı RF Magnetron Sputter tekniği ile Si altlık üzerine kaplandı ve 600 °C'de tavlandı. Yapısal ve morfolojik özellikleri daha önce belirlenmiş 250 nm kalınlığındaki MOS yapısındaki CZO yapısının dielektrik özelliklerini belirlemek için kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) ölçümleri yapılmıştır [16].

CZO yapısını biriktirmek için kullanılan n-tipi Si altlık kimyasal olarak temizlenmiştir. Kaplama sırasında hedef malzemeler (ZnO ve Cu) ile altlık (n-Si) arasındaki mesafe 35 mm'dir. Temizlenen altlık sisteme yüklenerek vakum odası 10^{-6} Torr seviyesindeki taban vakuma alınmıştır. Biriktirme işlemi sırasında CZO filminin büyüme hızı 0,2 Å/s'dir.

250 nm kalınlığındaki filmin biriktirilmesinden sonra dielektrik parametrelerin incelenmesi için CZO/n-Si yapısı üretilmiştir. Fabrikasyonda öncelikle termal buharlaştırma sisteminde AuNiGe alaşımı ile CZO/n-Si yapısına 200 nm kalınlığında arka kontak yapılmıştır. Daha sonra CZO/n-Si/AuNiGe yapısı, arka kontağı ohmik hâle getirmek için vakum altında 350 °C'de ısıtılarak tabii tutulmuştur. Son olarak CZO/n-Si/AuNiGe yapısı üzerinde nokta şeklinde doğrultucu Au kontak metalizasyonu gerçekleştirilmiştir. HP4192 A LF empedans analizörü ile oda sıcaklığında 10 kHz-1 MHz frekans aralığında 50 mV ac sinyal uygulanarak C-V ve G/w-V ölçümleri yapılmıştır.

3. BULGULAR

Dielektrik parametreler C-V ölçümünden elde edilen bazı elektriksel parametrelerle hesaplanabilir. Elektriksel analizde ortak parametrelerden biri olan kapasitansı belirlemek için inorganik ince filmlerin iki iletken ve yarı iletken arasına sandviçlenmesi gerekir. Dolayısıyla bu çalışmada CZO filmi Au metal ile n-tipi Si arasına ara katman olarak kaplanmıştır. Fabrikasyon basamakları tamamlandıktan sonra nihai olarak Au/CZO/n-Si yapısı elde edilmiştir. Bazı iletkenlik mekanizması parametrelerinden dielektrik parametreler oda sıcaklığında 10 kHz-1 MHz aralığında geniş bir frekans aralığında incelenmiştir.

Dielektrik özellikler aşağıda verilen kompleks dielektrik geçirgenlik (ϵ^*) denklemi ile analiz edilebilir [5]:

$$\epsilon^* = \epsilon_0 (\epsilon' - j\epsilon'') \quad (1a)$$

Boşluğun dielektrik geçirgenliği ϵ_0 değeri $8,854 \times 10^{12}$ F/m olduğu durumda, dielektrik sabiti olarak adlandırılan ϵ' geçirgenliğin gerçek kısmıdır. ϵ'' geçirgenliğin sanal kısmıdır. Bu denklemde j katsayısı $j = \sqrt{-1}$ 'dir. ϵ' , bir elektrik alanı içerisinde dielektrikte depolanan enerji miktarının bir ölçüsüdür. ϵ'' , elektrik alanının etkisi altında dielektrikte dağılan enerji miktarının bir ölçüsüdür. Dielektrik kaybının bir başka ölçüsü tan δ olarak tanımlanan kayıp tanjantıdır.

ϵ' ve ϵ'' ifadeleri denklem 1b ve denklem 1c'den belirlenebilir.

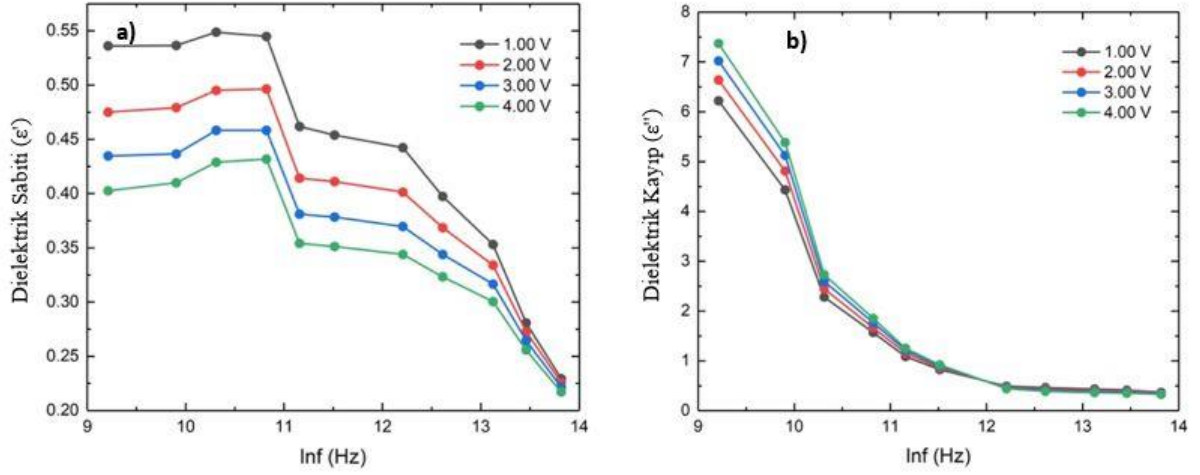
$$\epsilon' = \frac{C}{C_0} \quad (1b)$$

$$\epsilon'' = \frac{G}{C_0} \quad (1c)$$

Bu denklemlerde C_0 olarak verilen ifade boş kapasitörün kapasitansı, ω ise frekansdır. G ölçülen iletkenlik değeridir.

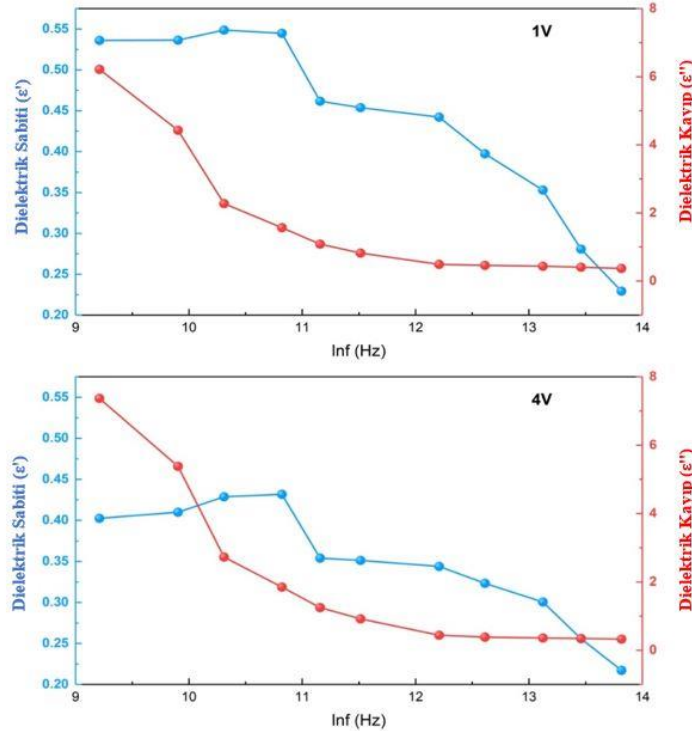
ϵ' -lnf ve ϵ'' -lnf eğrilerinin pozitif (1-4 V) gerilim bölgelerindeki davranışları Şekil 1'de verilmiştir. Burada Şekil 1a'da voltaj değeri 1 V'luk adımlarla 1 V ile 4 V arasında değişmektedir. Bu bölgedeki ϵ' değerlerinin tüm gerilim değerlerinde artan frekansa bağlı olarak azaldığı gözlenmiştir.

Benzer bir davranış ϵ'' -lnf eğrisi için de görülmektedir. Şekil 1b, ϵ'' -lnf eğrisinin pozitif gerilim aralığında (1V-4V) ϵ' -lnf'deki gibi davranışını göstermektedir. Şekil 1b'de görüldüğü gibi iyonlaşma durumları, seri direnç, yerleştirilmiş arayüzey yükleri vb. fiziksel parametreler nedeniyle pozitif gerilim bölgesinde artan frekansa bağlı olarak ϵ'' değeri üstel olarak azalmaktadır [17].



Şekil 1. Farklı pozitif (1V - 4V) gerilimlerde ince film yapısının ϵ' - $\ln f$ (a) ve ϵ'' - $\ln f$ (b) eğrileri

Şekil 2'de frekansa bağlı olarak değişen ϵ' ve ϵ'' değerleri seçilen pozitif gerilim aralığının minimumu olan 1V'de ve maksimumu olan 4V'de gösterilmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi hem 1V hem de 4V için aynı davranış gözlenmektedir. 1V ve 4V gerilim değerlerinde değişken frekansa bağlı olarak ϵ' ve ϵ'' parametrelerindeki karşılaştırmalı değişimler Şekil 2'de verilmiştir. Artan frekansla ϵ'' her iki gerilim değerinde de üstel olarak azalırken, C ve G'nin gerilime bağlı değişimi nedeniyle ϵ' düzensiz bir rejimde de olsa azalmıştır.

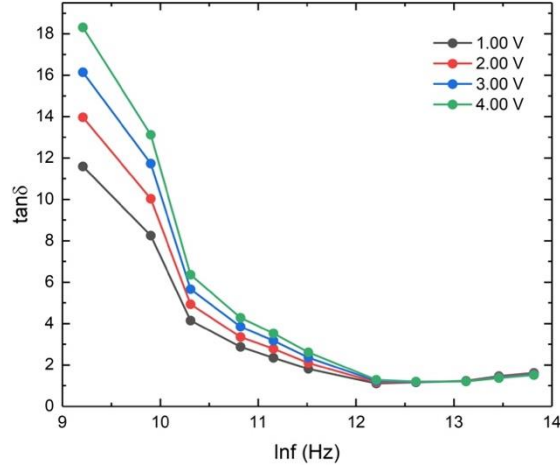


Şekil 2. a) 1V ve b) 4V için gerilim değerlerinin bir fonksiyonu olarak ince film yapısı için ϵ' - $\ln f$ ve ϵ'' - $\ln f$ 'nin karşılaştırmalı gösterimi

Dielektrik kayıp tanjantı ($\tan\delta$) değeri aşağıdaki denklemle hesaplanabilir [18-20].

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (4)$$

Şekil 3 belirli pozitif gerilim bölgelerinde (1-4 V) $\tan\delta$ - $\ln f$ eğrisinin davranışını göstermektedir. Tüm gerilim değerlerinde artan frekans değişimiyle üstel olarak azalan $\tan\delta$ değerinin belli bir frekans değerinden sonra neredeyse sabit olduğu gözlenmiştir.

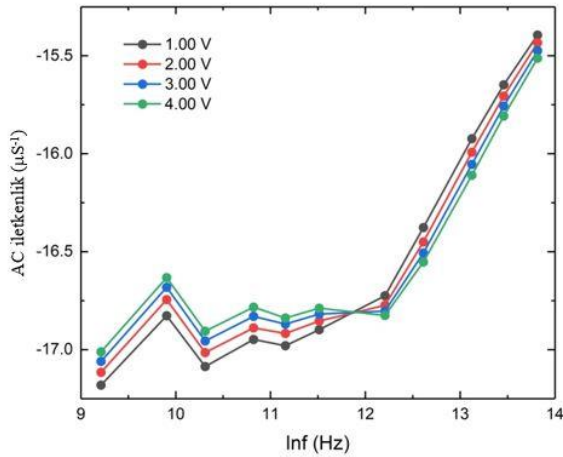


Şekil 3. Farklı pozitif (1V-4V) gerilimlerde ince film yapısının $\tan\delta$ - $\ln f$ eğrileri

σ_{ac} değeri denklem 5 ile hesaplanarak bulunabilir:

$$\sigma_{ac} = \frac{d}{A} \omega C \tan \delta = \varepsilon'' \omega \varepsilon_0 \quad (5)$$

İnce film yapılarının farklı pozitif gerilim (1V-4V) değerlerindeki σ_{ac} eğrileri Şekil 4'te verilmiştir. σ_{ac} değerinin tüm gerilim değerlerinde hemen hemen aynı davranışı gösterdiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte σ_{ac} değeri belirli bir frekans değerinden sonra artan frekans ile artma eğilimi göstermektedir.



Şekil 4. Farklı pozitif (1V-4V) gerilimlerde ince film yapısının σ_{ac} - $\ln f$ eğrileri

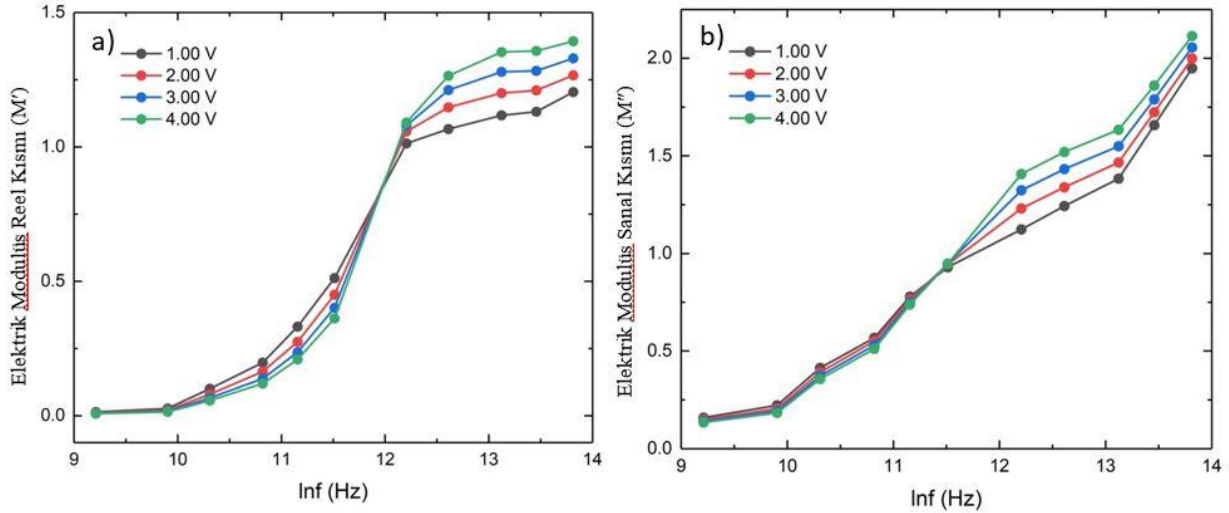
Dielektrik gevşeme hakkında daha fazla bilgi edinmek için Macedo tarafından önerilen ϵ^* 'nin tersi olan M^* kullanılmıştır [21]. Macedo, elektrik modülü $M^* = 1/\epsilon^*$ geçirgenliğinin tersi olarak tanımlar. Uzak yükü gevşeme olayını anlamak için kullanılan M^* , denklem 6'da gösterilen iki M' ve M'' bileşenini içerir. ϵ' ve ϵ'' gibi M' ve M'' bileşenleri enerji depolamaya ve kayıpla ilgilidir.

$$\square^*(\omega) = \frac{1}{\epsilon^*(\omega)} = M'(\omega) + j M''(\omega) \quad (6a)$$

$$M'(\omega) = \frac{\epsilon'}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} \quad (6b)$$

$$M''(\omega) = \frac{\epsilon''}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} \quad (6c)$$

M' ve M'' 'nin frekansa bağlı değişimi Şekil 5'te gösterilmektedir. M' , Şekil 5 (a)'da görülebileceği gibi, artan frekansla birlikte tepe davranışı sergiler. M'' ise artan frekansla neredeyse üstel bir artış göstermektedir (Şekil 5 (b)). Ayrıca her iki şekilde de görüldüğü gibi alçak ve yüksek frekans bölgeleri olmak üzere iki bölge bulunmaktadır. Düşük bölgede her bir gerilim değeri için hem M' hem de M'' değerleri sabit bir değere yakın iken, yüksek frekans bölgesinde çeşitli fiziksel mekanizmalardan dolayı değerler birbirinden farklılık göstermektedir.



Şekil 5. 1V–4V voltaj bölgesindeki elektrik modülüsün (a) reel kısmının (M') ve (b) sanal kısmının (M'') frekans bağımlılığı

4. TARTIŞMA

Frekansa (10 kHz-1 MHz arası) ve gerilime (1-4 V arası) bağlı olarak CZO arayüz katmanına sahip Au/n-Si yapısının dielektrik özellikleri, gerilime bağlı C ve G/ω karakteristikleri kullanılarak elde edilmiştir. Temel dielektrik parametreler olan ϵ' , ϵ'' , $\tan \delta$, σ_{ac} , M' ve M'' değerleri C ve G/ω verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlardan bu parametrelerin hem frekans hem de gerilim değerine bağlı olduğu görülmüştür. Sonuç olarak hem frekansın hem de voltajın elektriksel özelliklerin yanı sıra dielektrik özellikler üzerinde de etkili olduğu belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı (Proje No: 2019K12-149045) tarafından desteklenmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI/ÇAKIŞMASI BİLDİRİMİ

Yazarlar arasında çıkar çatışması/çakışması bulunmamaktadır.

YAZAR KATKI ORANLARI

Halil İbrahim EFKERE: Metodoloji, İçerik analizi, Araştırma, Makalenin yazımı-Orijinal taslak.

KAYNAKLAR

- [1] Shahzad, S., Javed, S., Usman, M. (2021). A review on synthesis and optoelectronic applications of nanostructured ZnO. *Frontiers in Materials*, 8, 613825. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.613825>.
- [2] Çokduygulular, E., Çetinkaya, Ç., Yalçın, Y., Kınacı, B. (2020). A comprehensive study on Cu-doped ZnO (CZO) interlayered MOS structure. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(16), 13646-13656. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-03922-6>.
- [3] Wang, W., Schiff, E. A. (2007). Polyaniline on crystalline silicon heterojunction solar cells. *Applied Physics Letters*, 91(13). doi: <https://doi.org/10.1063/1.2789785>.
- [4] Singh, S. P., Ooi, Z. E., Geok, S. N. L., Goh, G. K., & Dodabalapur, A. (2011). Electrical characteristics of zinc oxide-organic semiconductor lateral heterostructure based hybrid field-effect bipolar transistors. *Applied Physics Letters*, 98(7). doi: <https://doi.org/10.1063/1.3553191>.
- [5] Tataroğlu, A., Altındal, Ş. (2008). Analysis of electrical characteristics of Au/SiO₂/n-Si (MOS) capacitors using the high–low frequency capacitance and conductance methods. *Microelectronic Engineering*, 85(11), 2256-2260. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mee.2008.07.001>.
- [6] Kaya, S., Lok, R., Aktag, A., Seidel, J., Yilmaz, E. (2014). Frequency dependent electrical characteristics of BiFeO₃ MOS capacitors. *Journal of Alloys and Compounds*, 583, 476-480. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.08.204>.
- [7] Pande, P., Haasmann, D., Han, J., Moghadam, H. A., Tanner, P., Dimitrijević, S. (2020). Electrical characterization of SiC MOS capacitors: A critical review. *Microelectronics Reliability*, 112, 113790. doi: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2020.113790>.
- [8] Jin, B., Yan, Q., Dou, Y. (2012). Materials for energy storage and conversion based on metal oxides. *Recent Patents on Materials Science*, 5(3), 199-212. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2011.10.035>.
- [9] Miranda, G. G., e Silva, R. L. D. S., Banerjee, P., Franco Jr, A. (2020). Role of Ga presence into the heterojunction of metal oxide semiconductor on the stability and tunability ZnO ceramics. *Ceramics International*, 46(15), 23390-23396. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.06.022>.
- [10] Schroder, D. K. (2015). *Semiconductor Material and Device Characterization*. John Wiley & Sons.
- [11] Shinde, S. S., Shinde, P. S., Oh, Y. W., Haranath, D., Bhosale, C. H., Rajpure, K. Y. (2012). Structural, optoelectronic, luminescence and thermal properties of Ga-doped zinc oxide thin films. *Applied Surface Science*, 258(24), 9969-9976. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.06.058>.
- [12] Efkere, H. I., Tataroglu, A., Cetin, S. S., Topaloglu, N., Gonullu, M. P., Ates, H. (2018). The effect of thickness on the optical, structural and electrical properties of ZnO thin film deposited on n-type Si. *Journal of Molecular Structure*, 1165, 376-380. doi: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.04.022>.
- [13] Lehraki, N., Aida, M. S., Abed, S., Attaf, N., Attaf, A., Poulain, M. (2012). ZnO thin films deposition by spray pyrolysis: Influence of precursor solution properties. *Current Applied Physics*, 12(5), 1283-1287. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cap.2012.03.012>.
- [14] Mahmood, A., Ahmed, N., Raza, Q., Khan, T. M., Mehmood, M., Hassan, M. M., Mahmood, N. (2010). Effect of thermal annealing on the structural and optical properties of ZnO thin films deposited by the reactive e-beam evaporation technique. *Physica Scripta*, 82(6), 065801. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.09.011>
- [15] Sima, C., Grigoriu, C., Toma, O., & Antohe, S. (2015). Study of dye sensitized solar cells based on ZnO photoelectrodes deposited by laser ablation and doctor blade methods. *Thin Solid Films*, 597, 206-211. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.11.051>.

- [16] Kınacı, B., Çelik, E., Çokduygulular, E., Çetinkaya, Ç., Yalçın, Y., Efkere, H. İ., Özçelik, S. (2021). Effect of annealing on the surface morphology and current–voltage characterization of a CZO structure prepared by RF magnetron sputtering. *Semiconductors*, 55, 28-36. doi: <https://doi.org/10.1134/S1063782621010115>.
- [17] Kınacı, B. (2022). Dielectric properties of Au/SrTiO₃/p-Si structure obtained by RF magnetron sputtering in a wide frequency range. *Silicon*, 14(6), 2717-2722. doi: <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01067-7>.
- [18] Badali, Y., Farazin, J., Pirgholi-Givi, G., Altındal, Ş., Azizian-Kalandaragh, Y. (2021). Graphene doped (Bi₂Te₃–Bi₂O₃–TeO₂): PVP dielectrics in metal–semiconductor structures. *Applied Physics A*, 127, 1-11. doi: <https://doi.org/10.1007/s00339-021-04400-4>.
- [19] Altındal, Ş., Ulusoy, M., Özçelik, S., Azizian-Kalandaragh, Y. (2021). On the frequency-dependent complex-dielectric, complex-electric modulus and conductivity in Au/(NiS: PVP)/n-Si structures. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 20071-20081. doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-021-06419-y>.
- [20] Akbaş, A. M., Tataroğlu, A., Altındal, Ş., Azizian-Kalandaragh, Y. (2021). Frequency dependence of the dielectric properties of Au/(NG: PVP)/n-Si structures. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 7657-7670. doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-021-05482-9>.
- [21] Yerişkin, S. A., Tanrıku, E. E., Ulusoy, M. (2023). Dielectric properties of MS diodes with Ag: ZnO doped PVP interfacial layer depending on voltage and frequency. *Materials Chemistry and Physics*, 303, 127788. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127788>.