

MoO₃ Arayüzey Tabakalı Metal/Yarıiletken Yapısının Düşük Frekans Değerleri için Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi

Yunus Özen^{1,2*}, Halil İbrahim Efkeri², Tarık Asar^{1,2}, Süleyman Özçelik^{2,3}¹Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 06500, Ankara, Türkiye²Gazi Üniversitesi, Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi, 06500, Ankara, Türkiye³Gazi Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Fotonik Bölümü, 06500, Ankara, Türkiye

Öne Çıkanlar

- MoO₃ ince filmin elde edilerek dielektrik davranışının ortaya konması
- Düşük frekans değerleri için analiz yapılması
- Au/MoO₃/n-GaAs yapısının bir MOS kapasitör gibi davranması

Makale Bilgileri

Geliş: 14.04.2021
Kabul: 27.04.2021

Anahtar Kelimeler

Au/MoO₃/n-GaAs yapısı,
C-V ve G/ω-V ölçümleri,
Düşük frekans analizi,
Dielektrik parametreler

Özet

Bu çalışmada, Molibden trioksit (MoO₃) ara tabakalı Au/n-GaAs yapısının dielektrik özellikleri 0-4 V aralığında 0.25 V adımlarla düşük frekanslar için incelendi. MoO₃ ince filmi radyo frekansı (RF) magnetron püskürtme yöntemi kullanılarak n-tipi GaAs alttaş üzerine biriktirildi. Au/MoO₃/n-GaAs yapısının oda sıcaklığında 10, 20, 30, 50, 70 ve 100 kHz frekanslarında, kapasitans-voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj (G/ω-V) ölçümleri yapıldı. Bu ölçüm sonucunda C ve G dataları kullanılarak Au/MoO₃/n-GaAs yapısının dielektrik parametreleri belirlendi. Dielektrik sabiti (ε'), dielektrik kayıp (ε''), dielektrik kayıp tanjantı (tanδ), elektriksel modülüsün (M) gerçel kısmı (M'), sanal kısmı (M'') ve elektrik iletkenliği (σ_{ac}) gibi dielektrik parametreler frekansa bağlı olarak hesaplandı. Elde edilen sonuçlara göre, MoO₃ arayüzey tabakasının kapasitör uygulamaları için uygun olduğu görüldü.

Investigation of Dielectric Properties of Metal/Semiconductor Structure with MoO₃ Interface Layer for Low Frequency Values

Highlights

- Determination of the dielectric behavior by obtaining the MoO₃ thin film
- Analysis for low frequency values
- Au/MoO₃/n-GaAs structure behaves like a MOS capacitor

Article Info

Received: 14.04.2021
Accepted: 27.04.2021

Keywords

Au/MoO₃/n-GaAs structure,
C-V and G/ω-V measurements,
Low frequency analysis,
Dielectric parameters

Abstract

In this study, the dielectric properties of Au / n-GaAs structure with Molybdenum trioxide (MoO₃) interlayer were investigated for low frequencies in the temperature range of 0-4 V by 0.25 V steps. MoO₃ thin films were deposited on n-type GaAs substrate using radio frequency (RF) magnetron sputtering method. 10, 20, 30, 50, 70 and 100 kHz frequencies capacitance-voltage (C - V) and conductance - voltage (G/ω - V) measurements of the Au/ MoO₃/n-GaAs structure were made at room temperature. As a result of this measurement, dielectric parameters of Au/MoO₃/n-GaAs structure were determined by using C and G data. Dielectric parameters such as dielectric constant (ε'), dielectric loss (ε''), dielectric loss tangent (tanδ) real modulus (M'), imaginary modulus (M'') and electrical conductivity (σ_{ac}) were calculated depending on the frequency. According to the results, it has been seen that the MoO₃ interface layer is suitable for capacitor applications.



1. GİRİŞ

Molibden trioksit (MoO_3), vanadyum pentoksit (V_2O_5) veya tungsten trioksit (WO_3) gibi geleneksel geçiş metal oksit (TMO) bazlı ince filmler optoelektronik ve elektronik cihazlarda oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Bu filmler organik, inorganik ve hibrit yapıların cihaz performansını iyileştirmek için bir arayüz katmanı oluştururlar [1–3]. Yeni nesil teknoloji için tasarlanmış yapılara entegre olabilmek, yüksek şeffaflık değerleri, çeşitli yapılarda elektrot olarak bulunabilmeleri ve şarj üretimi / rekombinasyon olarak kullanılabilmesi nedeniyle TMO ince filmlere olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır [4, 5]. Özellikle, TMO ince filmlerinin arayüz özelliklerini kontrol etme ayrıcalığı, onları yeni nesil optoelektronik cihazların geliştirilmesi için umut verici bir malzeme haline getirmiştir [6]. TMO malzemeleri arasında MoO_3 , organik ve perovskite güneş hücreleri, organik ışık yayan cihazlar, gaz ve kimyasal sensörler, depolama cihazları gibi elektronik ve optoelektronik teknoloji için en yaygın kullanılan malzemelerden biridir [7–12]. MoO_3 ince filmlerin yaygın olarak kullanılmasının nedeni sadece gösterdikleri üstün elektronik özellikler değil, aynı zamanda kolay üretim ve depolama süreçleri ile üretilebilmesidir.

MoO_3 oluşturmak için termal buharlaşma [13], püskürtme [14], darbeli lazer biriktirme [15], kimyasal buhar biriktirme [16] atomik katman biriktirme [17], elektrodepozisyon [18] ve sprey piroliz [19] teknikleri gibi literatürde çok sayıda biriktirme tekniği bildirilmiştir. Bu biriktirme teknikleri arasında, homojen, yoğun ve tam stokiometrik ince filmler elde etme kabiliyeti nedeniyle püskürtme sistemi yaygın olarak tercih edilmektedir [20–22].

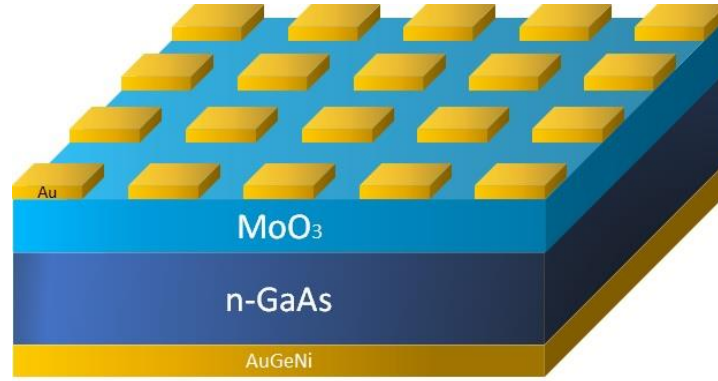
Son zamanlarda, MoO_3 tabanlı cihazlar üzerinde yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları artarak devam etmektedir. Alttaş olarak, teknolojik açıdan önemli olan yarı iletkenler Si ve GaAs yaygın kullanılmaktadır, çünkü bunlar entegre devrelerle hala oldukça uyumludurlar. Özellikle MoO_3 , arayüz katmanı olarak metal-oksit-yarı iletken (MOS) çoklu eklem tabanlı Schottky cihaz uygulamaları için benzersiz bir malzeme sistemi haline gelmiştir; burada arayüz kontrolünün, benzersiz elektriksel, optik ve yapısal özelliklerinden dolayı metal-yarı iletken temasında büyük önem taşımaktadır. Yeni nesil elektronik ve optoelektronik cihazları tasarlamak için, GaAs ve TMO malzemelerden oluşturulan hibrit yapıların fiziğini anlamak oldukça önemlidir. GaAs, taşıyıcılarının düşük etkili kütlesi nedeniyle yüksek hızlı ve radyo frekansı cihazları için gerekli olan mükemmel elektronik özellikleri sergiler.

Metal-yalıtkan-yarı iletken (MIS) ve metal-oksit-yarı iletken (MOS) yapıları, MS yapıları arasına bir arayüz katmanı eklenerek elde edilir. Arayüzey tabakalı MS yapısı, frekansa bağlı veya sıcaklığa bağlı admittans spektroskopisi ölçümlerindeki bazı değişiklikler gösterebilir. MIS / MOS yapılarının dielektrik özelliklerini etkileyen bazı parametreler vardır. Bunlardan bazıları malzeme hazırlama yöntemi, arayüzey tabakasının oluşumu ve homojenliği, arayüz durum yoğunluğu, metal ve yarı iletkenler arasındaki bariyer yüksekliğidir [23]. MIS / MOS yapılarının hem elektrik hem de dielektrik özelliklerini analiz etmenin en iyi yöntemlerinden biri frekansa bağlı analizdir. Arayüz durumlarının etkisini daha iyi anlamak için frekansa bağlı C-V-f ve G/ ω -V-f ölçümleri yapılır. Bu ölçümler sonucunda çeşitli fiziksel davranışlar belirlenebilir. Ek olarak, dielektrik davranışın frekansa bağlı olarak analizi, bir yapının gevşeme sürecini ve moleküler hareketini incelemeyi mümkün kılar [24, 25]. Dielektrik karakterizasyon, dielektrik sabiti ile yakından ilgili olan arayüz, elektronik, dipolar ve iyonik polarizasyonlardan etkilenen iletim mekanizmaları hakkında bilgi sağlar. Uygulanan bir elektrik alanının etkisi altındaki dielektrik malzemenin polarizasyon kapasitesi, karmaşık dielektrik sabitinin gerçek kısmı ile elde edilebilir [24, 25].

Bu çalışmada Au/ MoO_3 /n-GaAs yapısının dielektrik özellikleri 10–100 kHz frekans ve 0–4 V voltaj aralığında araştırıldı. Yapının ϵ' , ϵ'' , M' , M'' , ve σ_{ac} değerleri kapasitans-voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj (G/ ω -V) ölçüm değerleri kullanılarak hesaplandı.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

MoO₃ ince film yapısı RF magnetron püskürtme yöntemi kullanılarak (100) yönlendirmeli n-tipi GaAs alttaş üzerine biriktirildi. Biriktirme işleminden önce, GaAs alttaşın yüzey kirlilikleri gidermek için kimyasal bir temizleme işlemine tabi tutuldu. Temizleme işleminden sonra, GaAs alttaş ve MoO₃ hedefi püskürtme sistemine yüklendi. GaAs alttaş üzerine 30 nm'lik ince bir MoO₃ tabakası 0.2 Å/s lik biriktirme hızı ile 10⁻⁶ mbar'lık basınç altında biriktirildi. Yapının elektriksel karakterizasyonu için, başlangıçta 350 °C'de 200 nm kalınlığında AuGeNi biriktirilerek bir omik arka kontak oluşturuldu. Daha sonra, iyi omik kontak davranışı elde etmek için 350 °C'de son tavlama işlemi gerçekleştirildi. Son olarak, MoO₃/n-GaAs/AuGeNi yapısının fabrikasyonu, MoO₃ filmin ön yüzeyine kare şekilli doğrultucu kontaklar (2 mm x 2 mm, 200 nm kalınlık) yüksek saflıkta Au (% 99,999) kullanılarak biriktirmesi ile tamamlandı. C-V ve G/ω-V ölçümleri 10-100 kHz frekans aralığında HP 4192A LF empedans analizör yardımıyla oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Hazırlanan Au/MoO₃/n-GaAs/AuGeNi yapısının şematik diyagramı Şekil 1'de verildi.



Şekil 1. Au/MoO₃/n-GaAs/AuGeNi yapısının şematik gösterimi

3. BULGULAR

Hazırlanan Au/MoO₃/n-GaAs yapısının frekansa ve voltaja bağlı dielektrik özelliklerini incelemek için C-V ve G/ω-V ölçümleri 10, 20, 30, 50,70 ve 100 kHz için 0-4 V aralığında 0.25 V adımlar ile incelendi. Metal ile yarıiletken arasına sandviçlenen bir ince filmin veya tabakanın kompleks dielektrik sabiti $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$ şeklinde ifade edilir ve burada ϵ' kompleks dielektrik sabitinin gerçel kısmı, ϵ'' ise sanal kısmı olup sırasıyla ölçülen sığa C ve G/ω değerlerinden voltaja bağlı olarak elde edilebilir. Hazırlanan yapının düşük frekanslarda ölçülen C-V ve G/ω-V ölçüm değerleri kullanılarak kompleks dielektrik sabiti (ϵ^*) aşağıdaki denklemle elde edilir [26–29].

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon' - j\epsilon'' = \frac{C}{C_0} - j \frac{G}{\omega C_0} \quad (1)$$

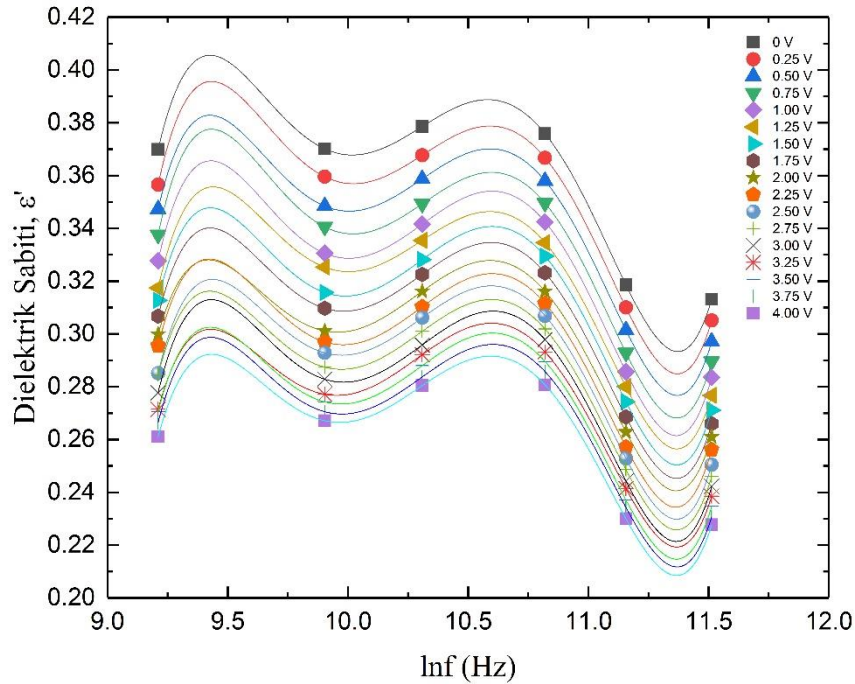
Elektriksel ve dielektrik davranıştan hesaplanan ϵ' ve ϵ'' değerleri, malzemenin fiziksel özellikleri hakkında bilgi sağlar. ϵ' olan gerçel kısım, malzemenin yük depolama ölçüsü ya da malzemenin kutuplaşabilmesidir. Sanal kısım ϵ'' ise kayıp faktörü olarak isimlendirilir, malzeme içerisinde ısı şeklinde yayılan enerjinin bir ölçüsü yani iyonik iletimden ya da malzemenin kutuplanmasının neden olduğu enerji kaybını ifade eder. Burada malzemenin dielektrikte oluşan enerji kaybı oranı kayıp tanjantı olarak adlandırılır [30]. ϵ' değerleri, ölçülen kapasitans değerleri kullanılarak aşağıdaki ifadeden elde edilebilir

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_0} . \quad (2)$$

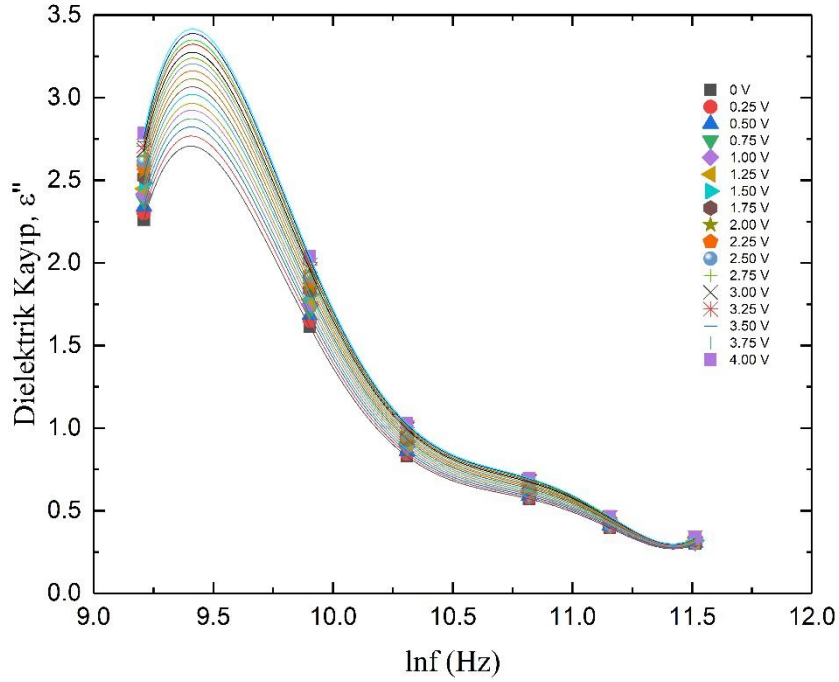
ε'' değerleri aşağıdaki denklemden ölçülen iletkenlik değerleri kullanılarak elde edilebilir

$$\varepsilon'' = \frac{G}{\omega C_0} . \quad (3)$$

İdeal durumda, MIS veya MOS tipi bir aygıtın veya kapasitörün C ve G/ω değerlerinin frekanstan bağımsız olması ve artan voltaj ile artması beklenir. Bu durum, ε' ve ε'' değerleri için de geçerlidir. Ancak uygulamalarda bu durum ideal durumunda olduğunda oldukça farklıdır. Çünkü bu aygıtlarda hem seri direnci (R_s) hem de arayüzey durumları/tuzakları (N_{ss}) sıfıra götürmek oldukça zordur. C-V ve G/ω-V ölçümlerinden ε' ve ε'' grafikleri 10 – 100 kHz aralığında voltaja bağlı olarak sırasıyla Şekil 2 ve 3'de verildi.



Şekil 2. Oda sıcaklığında Au/MoO₃/n-GaAs yapısı için voltaja bağlı ε' -lnf grafiği



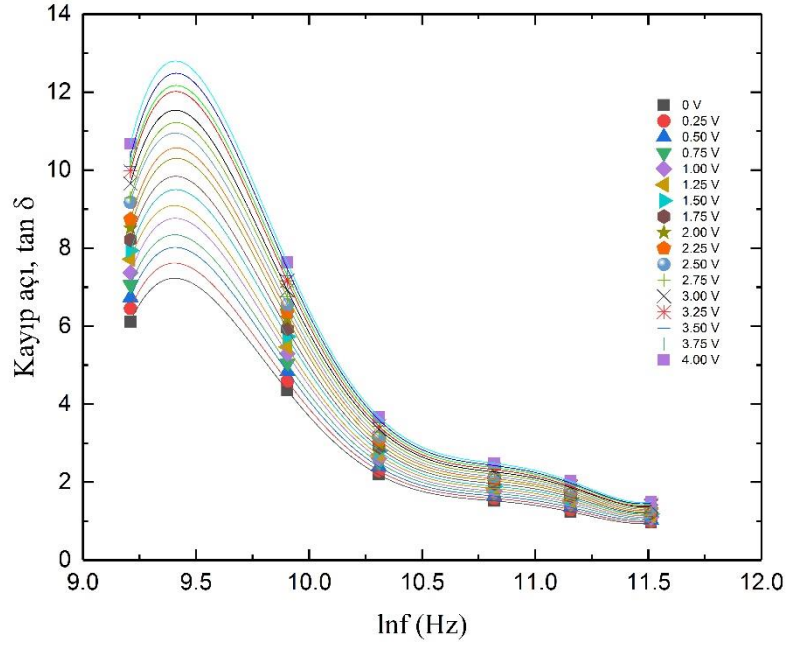
Şekil 3. Oda sıcaklığında Au/MoO₃/n-GaAs yapısı için voltaja bağlı ε'' – lnf grafiği

Şekil 2 ve 3'de görüldüğü gibi ε' ve ε'' değerleri hem frekansa hem de voltaja oldukça bağlıdır. Şekil 2'de görüldüğü gibi, ε'-lnf eğrisi tüm voltaj değerleri için aynı davranışı sergilemektedir. 10, 20, 30 ve 50 kHz değerleri için voltaja bağlı değerler neredeyse sabit bir davranış sergilerken, 70 ve 100 kHz değerleri için azalma eğilimi gösterdiler. Şekil 3'de görüldüğü gibi, ε'' değerleri artan frekansla azaldı. Artan frekans değeri ile birlikte ε'' değerleri her bir voltaj değeri için birbirine yaklaştı ve 100 kHz değerinde sabit bir değer aldı.

Diğer önemli bir dielektrik parametresi olan dielektrik kayıp tanjantı (tanδ) değeri, elde edilen ε' ve ε'' değerleri kullanılarak aşağıdaki eşitlikten her bir frekans değeri için hesaplandı ve 0-4 V aralığında 0.25 V adımlar ile Şekil 4' de verildi.

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

Şekil 4' den görüldüğü gibi, tanδ-lnf eğrisi ε''-lnf eğrisi ile benzer davranış sergiledi. Artan frekans değerine bağlı olarak her bir voltaj değeri için birbirlerine yaklaştığı görüldü.

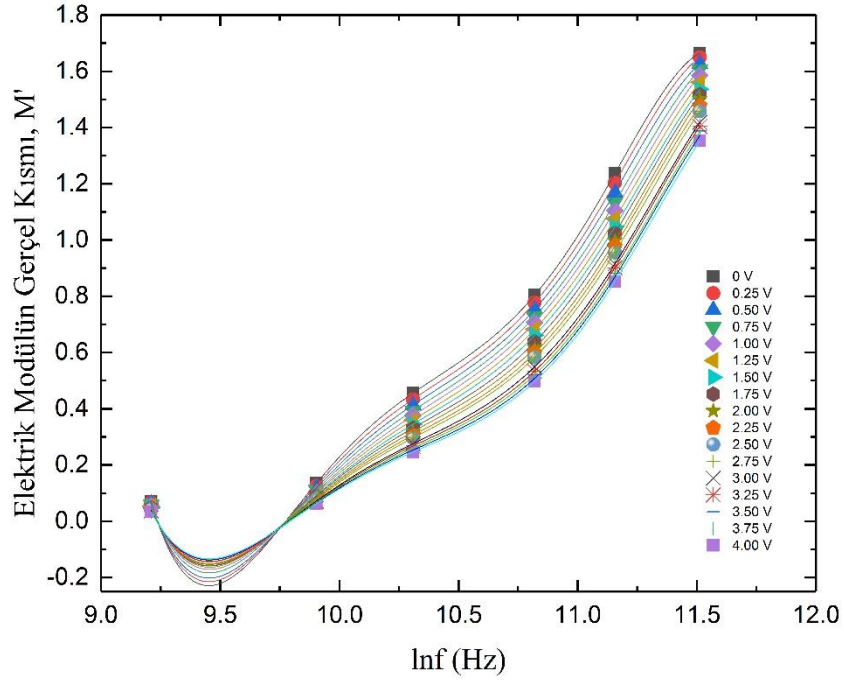


Şekil 4. Oda sıcaklığında Au/MoO₃/n-GaAs yapısı için voltaja bağlı tan δ – ln f grafiği

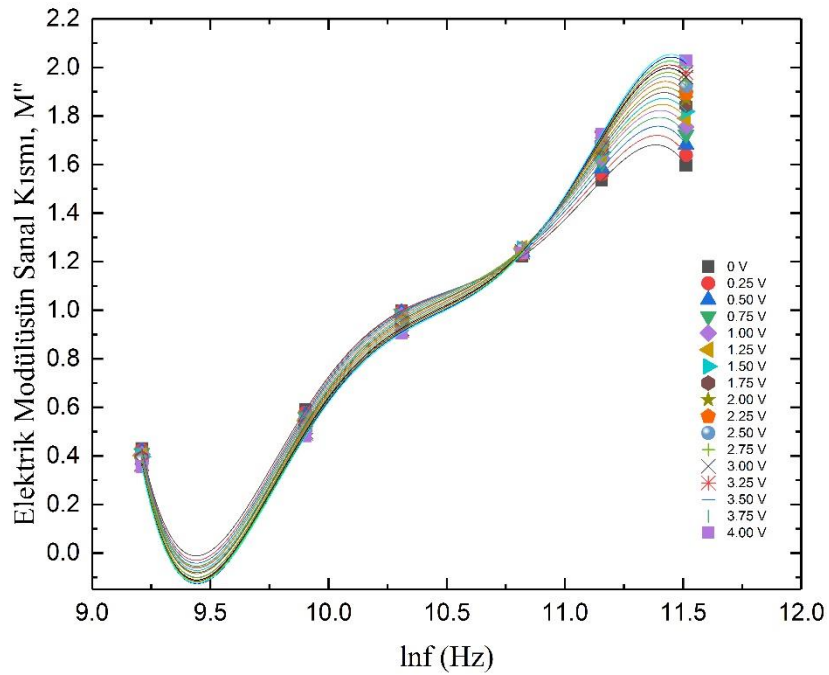
Aşağıdaki denklem, karmaşık geçirgenliği M^* formalizmine dönüştürmek için kullanılır. M' ve M'' değerleri, farklı frekans değerleri için 0-4 aralığında 0.25 V artışlarla ϵ' ve ϵ'' değerlerinden elde edilir

$$M^* = \frac{1}{\epsilon^*} = M' + jM'' = \frac{\epsilon'}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} + j \frac{\epsilon''}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} \cdot \quad (5)$$

$M' - \ln f$ ve $M'' - \ln f$ eğrileri sırasıyla Şekil 5 ve 6'da verildi. Şekil 5'de görüldüğü gibi M' değerleri frekansa bağlı olarak frekans arttıkça her bir voltaj değeri için arttı. 10 kHz için her bir voltaj değeri için sabit bir değer alırken artan frekans ile artış sergiledi. Şekil 6'da görüldüğü gibi her bir voltaj değeri için 50 kHz değerine kadar artan frekans ile artmakta iken 50 kHz'de M'' değerleri bir çakışma noktasına sahip olduğu görülmüş olup sabit bir değere yaklaştı. 50 kHz'den yani çakışma noktasından sonra terslenime sahip olduğu görülmüş olup 4V için en yüksek değeri aldı.



Şekil 5. Oda sıcaklığında Au/MoO₃/n-GaAs yapısı için voltaja bağlı M' – lnf grafiği

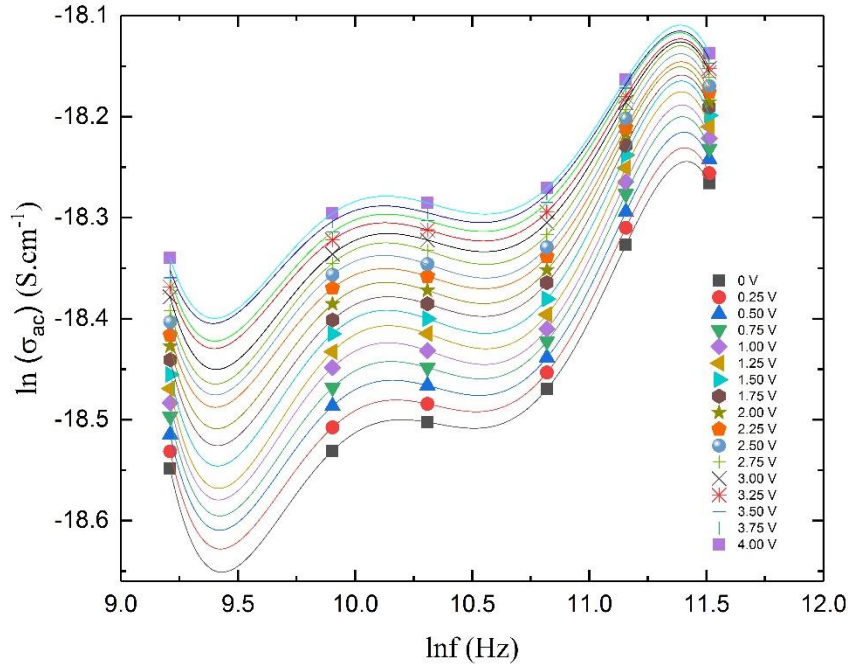


Şekil 6. Oda sıcaklığında Au/MoO₃/n-GaAs yapısı için voltaja bağlı M'' – lnf grafiği

σ_{ac} değerleri aşağıdaki denklemden elde edildi. σ_{ac} – lnf eğrisi 0-4 V aralığında 0.25 V adımlarla Şekil 7'de verildi. Şekil 7'den de görüldüğü gibi, σ_{ac} değerleri her bir voltaj değeri için 50 kHz'e kadar yaklaşık sabit bir değer alırken 50 kHz'den sonra hafif bir artış sergiledi.

$$\sigma_{ac} = \varepsilon'' \omega \varepsilon_0$$

(6)



Şekil 7. Oda sıcaklığında Au/MoO₃/n-GaAs yapısı için voltaja bağlı $\sigma_{ac} - \ln f$ grafiği

4. TARTIŞMA

Bu çalışmanın amacı, Au/MoO₃/n-GaAs yapısının dielektrik özelliklerini analiz etmektir. n-tipi GaAs alttaş üzerine biriktirilen MoO₃ ince filmi RF magnetron püskürtme yöntemi kullanılarak elde edildi. Au/MoO₃/n-GaAs yapısının 10, 20, 30, 50, 70 ve 100 kHz frekanslarında, C-V ve G/ω-V ölçümleri oda sıcaklığında yapıldı. Bu yapının dielektrik özellikleri, oda sıcaklığında 0-4 V aralığında 0.25 V aralıklarla frekansa bağlı olarak incelendi. ε' , ε'' , M' , M'' , ve σ_{ac} değerleri C ve G ölçüm verileri kullanılarak hesaplandı ve bu parametrelerin frekans ve voltaj ile önemli ölçüde değiştiği görüldü. Ayrıca, ε'' değerinin düşük olarak elde edilmesi yapının iyi bir dielektrik malzeme olduğunu gösterdi. Elde edilen deneysel sonuçlara göre, kullanılan MoO₃ tabakasının MIS/MOS gibi yapılarda arayüzey tabakası olarak kullanılabileceği görüldü.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı tarafından desteklenmiştir (Project No: 2019K12-92587)

ÇIKAR ÇATIŞMASI/ÇAKIŞMASI BİLDİRİMİ

Yazarlar arasında çıkar çatışması/çakışması bulunmamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Giroto C., Voroshazi E., Cheyans D., Heremans P., and Rand B. P., (2011). Solution-Processed MoO₃ Thin Films As a Hole-Injection Layer for Organic Solar Cells, *ACS Applied Materials Interfaces*, 3, 3244.
- [2] Cauduro A. L. F., Reis R. D., Chen G., Schmid A. K., Méthivier C., Rubahn H. G., Bossard-Giannesini L., Cruguel H., Witkowski N., and Madsen M., (2017). Crystalline Molybdenum Oxide Thin-Films for Application as Interfacial Layers in Optoelectronic Devices, *ACS Applied Materials Interfaces*, 9, 7717.
- [3] Simchi H., McCandless B. E., Meng T., and Shafarman W. N., (2014). Structural, optical, and surface properties of WO₃ thin films for solar cells, *Journal of Alloys and Compounds*, 617, 609-615.
- [4] Meyer J., Hamwi S., Kröger M., Kowalsky W., Riedl T., and Kahn A., (2012). Transition Metal Oxides for Organic Electronics: Energetics, Device Physics and Applications, *Advanced Materials*, 24, 5408.
- [5] Kumar G. S., Illyaskutty N., Suresh S., Sreedharan R. S., Nayar V. U., and Pillai V. P. M., (2017). Terbium oxide doped MoO₃ nanostructures: Morphology engineering and enhanced photoluminescence, *Journal of Alloys and Compounds*, 698, 215-227.
- [6] Mahato S., Biswas D., Gerling L. G., Voz C., and Puigdollers J., (2017). Analysis of temperature dependent current-voltage and capacitance-voltage characteristics of an Au/V₂O₅/n-Si Schottky diode, *AIP Advances*, 7, 8.
- [7] Elumalai N. K., Saha A., Vijila C., Jose R., Jie Z., and Ramakrishna S., (2013). Enhancing the stability of polymer solar cells by improving the conductivity of the nanostructured MoO₃ hole-transport layer, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15, 6831.
- [8] Sanehira E. M., Tremolet de Villers B. J., Schulz P., Reese M. O., Ferrere S., Zhu K., Lin Y. L., Berry J. J., and Luther J. M., (2016). Influence of Electrode Interfaces on the Stability of Perovskite Solar Cells: Reduced Degradation Using MoO_x/Al for Hole Collection, *ACS Energy Letters*, 1, 38.
- [9] Wang C., Irfan I., Liu X., and Gao Y., (2014). Role of molybdenum oxide for organic electronics: Surface analytical studies, *Journal Vacuum Science & Technology B*, 32, 040801.
- [10] Rahmani M. B., Keshmiri S. H., Yu J., Sadek A. Z., Al-Mashat L., Moafi A., Latham K., Li Y. X., Wlodarski W., Kalantar-zadeh K., (2010). Gas sensing properties of thermally evaporated lamellar MoO₃, *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 145, 13 – 19.
- [11] Bessonov A. A., Kirikova M. N., Petukhov D. I., M., T. Ryhänen, and Bailey M. J. A., (2015). Layered memristive and memcapacitive switches for printable electronics, *Nature Materials*, 14, 199
- [12] Zhu K., Wang X., Liu J., Li S., Wang H., Yang L., Liu S., and Xie T., (2017). Novel Amorphous MoS₂/MoO₃/Nitrogen-Doped Carbon Composite with Excellent Electrochemical Performance for Lithium Ion Batteries and Sodium Ion Batteries, *ACS Sustainable Chemical Engineer*, 5, 8025
- [13] Koike K., Wada R., Yagi S., Harada Y., Sasa S., and Yano M., (2014). Characteristics of MoO₃ films grown by molecular beam epitaxy, *Japanese Journal of Applied Physics*, 53, 5.
- [14] Okumu J., Koerfer F., Salinga C., and Wuttig M., (2004). In situ measurements of thickness changes and mechanical stress upon gasochromic switching of thin MoO₃ films, *Journal of Applied Physics*, 95, 7632.
- [15] Torres J., Alfonso J. E., and López-Carreño L. D., (2005). XPS and X-ray diffraction characterization of MoO₃ thin films prepared by laser evaporation, *Physica Status Solidi C*, 2, 3726.
- [16] Hosono K., Matsubara I., Murayama N., Woosuck S., and Izu N., (2005). Synthesis of polypyrrole/MoO₃ hybrid thin films and their volatile organic compound gas-sensing properties, *Chemistry of Materials*, 17, 349
- [17] Liu X., Yi S., Wang C., Wang C., and Gao Y., (2014). Electronic structure evolution and energy level alignment at C₆₀/4,4'-cyclohexylidenebis[N,N-bis(4-methylphenyl) benzenamine]/MoO_x/indium tin oxide interfaces, *Journal of applied Physics*, 115, 163708.
- [18] McEvoy T. M., Stevenson K. J., Hupp J. T., and Dang X., (2003). Electrochemical Preparation of Molybdenum Trioxide Thin Films: Effect of Sintering on Electrochromic and Electroinsertion Properties, *Langmuir*, 19, 4316.
- [19] Patil P. R. and Patil P. S., (2001). Preparation of mixed oxide MoO₃-WO₃ thin films by spray pyrolysis technique and their characterisation, *Thin Solid Films* 382, 13.
- [20] Kınacı B., Çetinkaya Ç., Çokduygular E., Efkere H. İ., Sönmez N. A., and Özçelik S., (2020). Negative capacitance phenomena in Au/SrTiO₃/p-Si heterojunction structure, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 31(11), 8718-8726.
- [21] Çokduygular E., Çetinkaya Ç., Yalçın Y., and Kınacı B. (2020)., A comprehensive study on Cu-doped ZnO (CZO) interlayered MOS structure, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 31, 13646- 13656.
- [22] Güzelçimen F., Tanören B., Çetinkaya Ç., Kaya M. D., Efkere H. İ., Özen Y., Bingöl D., Sirkeci M., Kınacı B., Ünlü M. B., and Özçelik S., (2020). The effect of thickness on surface structure of rf sputtered TiO₂ thin films by XPS, SEM/EDS, AFM and SAM, *Vacuum* 182, 109766.
- [23] Al-Dharob M. H., Kökce A., D. Aldemir A., Özdemir A. F., and Altındal Ş., (2020). The origin of anomalous peak and negative capacitance on dielectric behavior in the accumulation region in Au/(0.07 Zn-doped polyvinyl alcohol)/n-4H-SiC metal-polymer-semiconductor structures/diodes studied by temperature-dependent impedance measurements, *J. Phys. Chem. Solids* 144, 109523.

- [24] Taşçıoğlu İ., Sevgili O., Azizian-Kalandaragh Y., Altındal S., (2020). Frequency-Dependent Admittance Analysis of Au/n-Si Structure with CoSO₄-PVP Interfacial Layer, *J Electron Mater* 49(6): 3720–3727.
- [25] Kınacı B. (2021), Dielectric Properties of Au/SrTiO₃/p-Si Structure Obtained by RF Magnetron Sputtering in a Wide Frequency Range, *Silicon* doi.org/10.1007/s12633-021-01067-7.
- [26] Buyukbas-Ulusan A., Taşçıoğlu İ., Tataroğlu A., Yakuphanoglu F., and Altındal S., (2019). A comparative study on the electrical and dielectric properties of Al/Cd-doped ZnO/p-Si structures, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 30, 12122–12129.
- [27] Demirezen S., Tanrikulu E. E., and Altındal Ş., (2019). The study on negative dielectric properties of Al/PVA (Zn-doped)/p-Si (MPS) capacitors, *Indian J. Phys.* 93, 739–747.
- [28] Tecimer H., (2019). On the frequency–voltage dependent electrical and dielectric profiles of the Al/(Zn-PVA)/p-Si structures, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 29, 20141–20145.
- [29] Kınacı B., (2021). The temperature dependent negative dielectric constant phenomena of Au/n–GaAs structure with CZO interfacial layer, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 5928–5935.
- [30] Lvovich V. F., (2012). “Impedance Spectroscopy Applications to Electrochemical and Dielectric Phenomena”, *New Jersey: Wiley*, 368 sayfa.