

İNDİRGENMİŞ GRAFEN OKSİT ARAYÜZEY TABAKALI METAL OKSİT YARIİLETKEN KAPASİTÖRÜN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

İbrahim KARTERİ (ORCID: 0000-0001-8913-6753)*

Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Elbistan Teknoloji Fakültesi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye

Geliş / Received: 15.04.2017

Düzeltilmelerin gelişi / Received in revised form: 07.06.2017

Kabul / Accepted: 14.06.2017

ÖZ

Bu çalışmada, İndirgenmiş Grafen Oksit (RGO) arayüzey oksit tabakalı Au/RGO/p-Si metal-oksit-yarıiletken (MOS) kapasitörün dielektrik özelliklerinin frekans bağımlılığı 200, 300, 500 ve 700 kHz frekanslarda deneysel kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) ölçümleri alınarak incelendi. Ayrıca MOS kapasitörün dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), dielektrik kayıp açısı ($\tan\delta$), ac elektrik iletkenlik (σ_{ac}), reel ve imajiner elektrik modülü (M' ve M'') değerleri 10 kHz-1 MHz frekans aralığında belirlendi. Elde edilen sonuçlar dielektrik parametrelerin frekansa bağımlı olduğunu açık bir şekilde göstermektedir. ϵ' ve ϵ'' artan frekansla azalmaktadır. σ_{ac} , M' ve M'' değerleri ise artan frekans ile artmaktadır.

Anahtar Kelimeler: RGO, MOS kapasitör, kapasitans ve iletkenlik ölçümleri, dielektrik özellikler

DETERMINATION OF DIELECTRIC PROPERTIES OF METAL-OXIDE SEMICONDUCTOR CAPACITOR WITH REDUCED GRAPHENE OXIDE INTERFACIAL OXIDE LAYER

ABSTRACT

In this study, the frequency dependence of the dielectric properties of Au/RGO/p-Si metal-oxide-semiconductor (MOS) capacitor with silicon nitride (RGO) interfacial oxide layer have been investigated by taking experimental capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G/w-V) measurements at 200, 300, 500 and 700 kHz frequencies. Dielectric constant (ϵ'), dielectric loss (ϵ''), dielectric loss tangent ($\tan\delta$), ac electrical conductivity (σ_{ac}), real and imaginary part of electric modulus (M' and M'') values of the MOS capacitor have been determined in the frequency range of 10 kHz-1 MHz. The obtained results clearly show that the dielectric parameters are frequency dependent. The values of the ϵ' and ϵ'' decrease with increasing frequency. But the values of the σ_{ac} , M' and M'' increase with increasing frequency.

Keywords: RGO, MOS capacitor, capacitance and conductance measurements, dielectric properties

1. GİRİŞ

Hayatımıza giren elektronik aygıtların hemen hemen çoğu yarıiletken malzemelerden oluşmaktadır. Yarıiletken aygıtlar günümüzde sürekli olarak kullanılan bilgisayar ve cep telefonu gibi çoğu aygıtların elektronik bileşenlerini oluşturarak elektronik teknolojisinde önemli bir rol oynamaktadır [1]. Metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapılar için yarıiletken olarak genelde silisyum (Si), germanyum (Ge) ve galyum-arsenide

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 344 300 1893; e-mail / e-posta: i.karteri@ksu.edu.tr

İ. KARTERİ

(GaAs) kullanır. Bu yapılarda yarıiletkenin p veya n-tipi olmasına göre metal olarak genellikle yüksek saflıktaki alüminyum veya altın gibi metaller kullanılır. Silisyumun tercih edilmesinin sebebi doğada bol miktarda bulunması ve kristal yüzeyinde doğal olarak yalıtkan tabakanın elde edilebilmesidir. Oksit tabaka olarak kullanılan yapılar metal ve yarıiletken tabakaları birbirinden izole ederler ve genellikle SiO_2 , SnO_2 , Si_3N_4 gibi malzemeler kullanılır. Bu yapılarda yarıiletken yüzey, arayüzey tabaka ve yalıtkan tabaka yapının elektrik performansı ve dielektrik özellikleri üzerinde büyük öneme sahiptir [2]. Bu arayüzey yalıtkan oksit tabaka metal ile yarıiletkeni birbirinden izole eder ve metal ile yarıiletken arasındaki yük geçişlerini düzenler [3, 4].

Yapılan çalışmalar gösteriyor ki oksit tabakayı seçerken yüzeyi pasivize edecek, sızıntı akımını en aza indirecek, kontrol edilebilir akım-iletim mekanizması gerçekleştirecek ve doğrultucu özelliğe yaklaşacak malzemeler seçmeye dikkat edilir [4]. Kapasitans karakteristikleri yarıiletken ağıta zarar vermeyen güçlü bir spektroskopik metot olup yapısal ve fiziksel parametrelerin belirlenmesini sağlar. Ayrıca kapasitans ölçümleri yük dağılımının belirlenmesine ve ara yüzey durum varlığının tanımlanmasına izin verir. Çünkü yapıya bir voltaj uygulanması ara yüzeydeki tuzakta bulunan taşıyıcının yakalanmasına ya da salınmasına yol açabilir [4, 5]. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda transistörler, diyot ve kapasitör gibi birçok elektronik cihazlarda yaygın olarak RGO araştırılmaktadır [5-14]. Bununla birlikte bazı yapılan çalışmalarda bir MOS aygıtı için bir kapı elektrotu olarak RGO ve grafen yapıları kullanılarak çalışmalar yapıldı [13-16]. Mısra ve ark. [16] tarafından TiN metal kontak altında RGO yapılarıyla birlikte 0,5 V'luk düz bant voltaj değişimi olduğunu gösterdiler.

Bu çalışmanın amacı, MOS yapısında RGO malzemesini kullanarak Au/İndirgenmiş Grafen Oksit (RGO)/p-Si metal-oksit-yarıiletken (MOS) kapasitörün üretilmesi ve elde edilen MOS kapasitörün dielektrik özelliklerinin frekansa bağlı değişimlerini bulmaktır. Hazırlanan Au/RGO/p-Si MOS kapasitörün kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) ölçümleri yapılarak elde edilen dielektrik parametreleri incelenmiştir. Bu ölçümler farklı frekans aralıklarında oda sıcaklığında yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

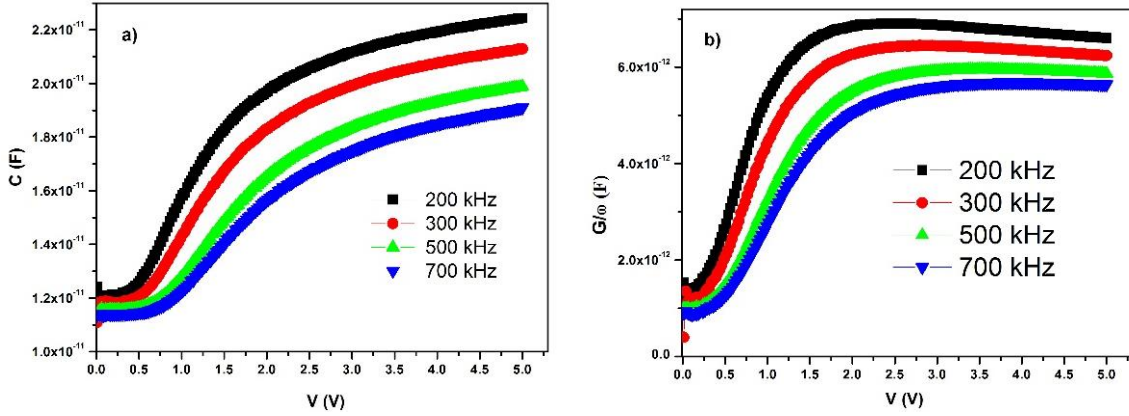
Bu çalışmada, 0,4 mg/mL konsantrasyonlu Reduced Graphene Oxide Water (R-GO) dispersiyon Graf Nano Teknolojik Malzemeler San. ve Tic. Ltd. Şti.'den temin edildi. Au/RGO/p-Si MOS kapasitörün hazırlanması için altlık olarak $R < 0,1-0,5$ ohm cm öz dirençli, $<100>$ yönelimli ve 400 ± 25 μm kalınlığına sahip bir yüzeyi parlatılmış bor katkılı p-Si yarıiletkeni kullanıldı. p-Si wafer kimyasal temizleme işlemi kullanılarak temizlenerek azot gazıyla kurutuldu. Bundan sonra kullanılan RGO dispersiyonun kaplama işlemine geçildi. Temin edilen RGO dispersiyonu p-Si wafer üzerine spin coating metodu ile 3000 rpm hızında 40 saniye parametreleriyle kaplanarak 80°C sıcaklığında sıcak yüzey üzerinde 15 dakika bekletip kurutularak spin kaplama işlemi tamamlanıp RGO/p-Si yapısı elde edildi. Bu RGO/p-Si yapısı hazırlandıktan sonra altın (Au) metal omik ve doğrultucu kontaklar oluşturmak için termal buharlaştırma cihazı kullanıldı. Bu aşamalardan sonra Au/RGO/p-Si (MOS) kapasitörü hazırlanarak probe sistemiyle hazırlanan MOS kapasitörün elektriksel ölçümleri Hioki IM3536 LCR Metre cihazıyla gerçekleştirildi. Bu ölçümler 10 kHz ile 1 MHz frekans aralığında ve 0,01V ile +5V voltaj değerleri arasında sweep ölçüm özelliği (Lineer ve Log) ile oda sıcaklığında gerçekleştirildi.

3. BULGULARI VE TARTIŞMA

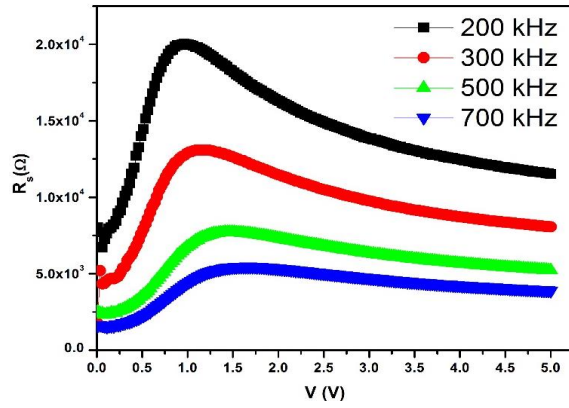
Hazırlanan Au/RGO/p-Si MOS kapasitörün bazı temel fiziksel özelliklerini araştırmak için kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) ölçümleri oda sıcaklığında 200, 300, 500 ve 700 kHz frekanslarda incelendi. Au/RGO/p-Si yapısının C-V ve G/w-V grafikleri sırasıyla Şekil 1a ve b'de verildi. Gerek C-V gerekse G/w-V eğrileri özellikle pozitif gerilim bölgesinde bir frekans dağılımına sahiptir. Bu bölgede belirgin olarak kapasitans ve kondüktans artan frekansla azalmaktadır. Düşük frekanslardaki kapasitans ve kondüktans değerlerinin büyüklüğü yapının arayüzeyindeki arayüzey durumlarının dolup boşalma zamanının frekans bağımlılığından kaynaklanmaktadır [17].

Seri direnç (R_s) değerleri, Au/RGO/p-Si yapısı için verilen C-V ve G/w-V eğrilerinin kuvvetli yığılım bölgesindeki değerlerinden faydalanılarak elde edilebilir [5]. Bir yarıiletken aygıtın (diyot vb.) seri direnç değeri yeterince ileri pozitif gerilimde elde edilen değerdir. Çünkü yarıiletkenin seri direnci ileri pozitif gerilimlerde gerçek değerine ve yeterince ters gerilimlerde (terslenim bölgesinde) sonsuza gider. Şekil 2'de seri direncin farklı frekanslarda voltaja bağlı değişimi verildi. Şekil 2'de görüldüğü gibi seri direnç voltaja bağlı olarak değişerek bir pik gözlenmekte ve özellikle 200 kHz frekans değerinde en yüksek R_s değerini vermektedir. Bu piklerin meydana geldiği gerilim bölgelerinde arayüzey durumlarının yerleşmiş olduğuna atfedilebilir [5, 17].

İNDİRGENMİŞ GRAFEN OKSİT (RGO) ARAYÜZEY TABAKALI METAL OKSİT YARIİLETKEN KAPASİTÖRÜN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ



Şekil 1. MOS kapasitörün farklı frekanslarda (a) Kapasitans-Voltaj (C-V) (b) İletkenlik-Voltaj (G/w-V) karakteristikleri



Şekil 2. MOS kapasitörün farklı frekanslarda Seri direnç-Voltaj (R_s -V) eğrileri

Dielektriklerin, dışardan uygulanan elektrik alana duyarlı olması onların elektriksel özelliklerini araştırmada önemli bir faktör olarak görülür. Bir dielektrik madde, bir elektriksel devre ile özdeşleştirilir. Au/RGO/p-Si yapılı MOS kapasitörün dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), dielektrik kayıp açısı ($\tan\delta$) ve ac iletkenlik (σ_{ac}) gibi dielektrik parametreleri ölçülen kapasitans (C_m) ve iletkenlik (G_m/ω) verileri kullanılarak hesaplandı. Bu parametrelerin frekansa etkisi araştırıldı. Dielektrik maddenin boşluğa göre sahip olduğu bağıl dielektrik geçirgenlik sabiti aşağıda verilen formül ile ifade edilmektedir [18-20].

$$\epsilon^{\prime} = \epsilon' - \epsilon'' \tag{1}$$

Burada, ϵ' kompleks dielektrik sabitinin reel kısmı olup dielektrik sabitini ve ϵ'' ise imajiner kısmı olup dielektrik kaybı ifade etmektedir. Dielektrik sabiti:

$$\epsilon' = \frac{C_{ox}}{C_o} \tag{2}$$

ve dielektrik kayıp:

$$\epsilon'' = \frac{G_m}{C_o \omega} = \frac{d_{ox} G_m}{A \epsilon_o w} \tag{3}$$

eşitlikleri ile verilir. Burada C_o plakaları arası boş kapasitörün kapasitansı ($C_o = \epsilon_o(A/d_{ox})$), A MOS kapasitörün doğrultucu kontak alanı, d_{ox} oksit tabaka kalınlığı ve ϵ_o boşluğun dielektrik geçirgenlik sabitidir ($\epsilon_o = 8,85 \times 10^{-14}$ F/cm). Oksit kapasitansı (C_{ox}),

İ. KARTERİ

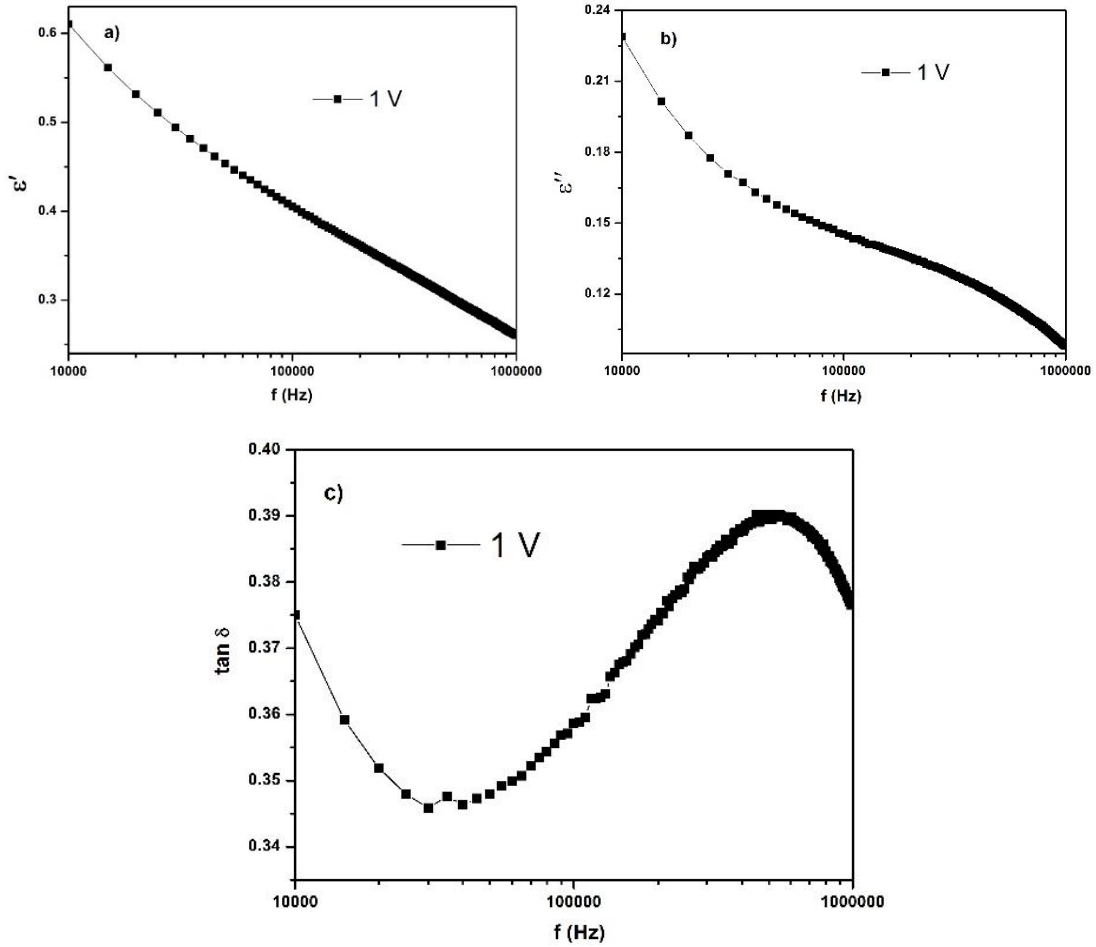
$$C_{ox} = \frac{A\epsilon_{ox}}{d_{ox}} \tag{4}$$

ile verilir [21]. Kayıp açısı, ölçüm esnasında kayıp akımın yük akımına oranı olarak elde edilir ve Eşitlik (5) ile ifade edilir [22,23].

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \tag{5}$$

Ayrıca, ac elektriksel iletkenlik (σ_{ac}) ise eşitlik (6) ile verilir.

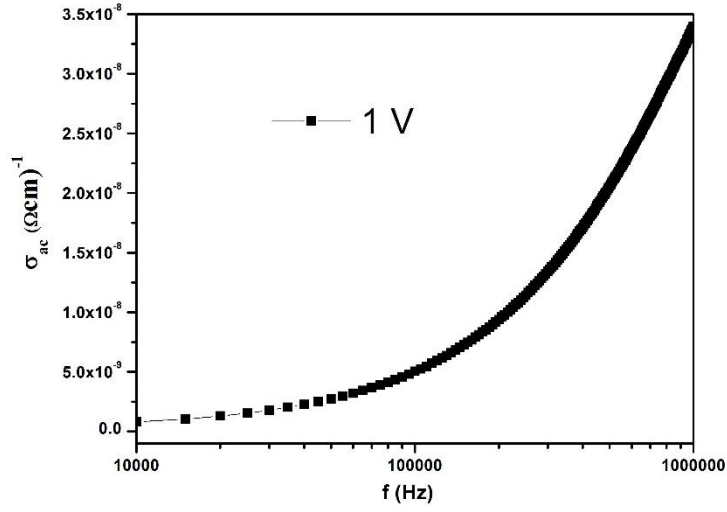
$$\sigma_{ac} = w\epsilon_0\epsilon \tan\delta = \epsilon''w\epsilon_0 \tag{6}$$



Şekil 3. MOS kapasitörün 1 V gerilim altında (a) dielektrik sabiti (ϵ') (b) dielektrik kayıp (ϵ'') ve (c) dielektrik kayıp açısı ($\tan\delta$)'nın frekansa bağlı değişim eğrileri

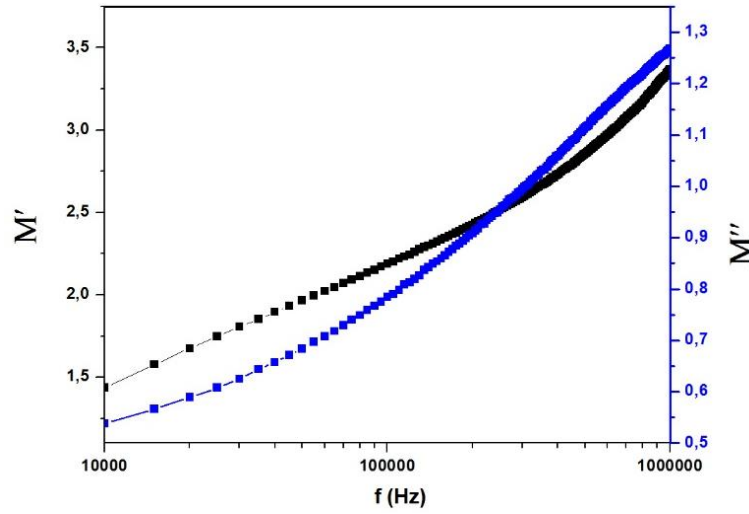
Au/RGO/p-Si yapılu MOS kapasitör için, dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp açısı ($\tan\delta$) ve ac elektriksel iletkenlik (σ_{ac}) frekansa bağımlılığı, 1 V voltaj altında ve 10 kHz ile 1 MHz frekans aralığında incelendi. Burada frekansın etkisini araştırmak için sadece 1V voltaj altında incelemeler uygun görüldü. Şekil 3'te MOS kapasitörün (a) dielektrik sabiti (ϵ') (b) dielektrik kayıp (ϵ'') ve (c) dielektrik kayıp açısı ($\tan\delta$)'nın frekansa bağlı değişim eğrileri gösterilmektedir. Şekil 3a ve b'de görüldüğü gibi ϵ' ve ϵ'' değerleri artan frekans ile azalmaktadır. Frekansın artmasıyla dielektrik sabitindeki bu azalma, frekansın artmasıyla polarizasyonun azalmasının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır [24]. 1 volt gerilim altındaki MOS kapasitörün kayıp açısı ($\tan\delta$) karakteristiğinin frekansa bağlı değişim grafiği Şekil 3c'de gösterilmiştir. Şekil 3c'de görüldüğü gibi $\tan\delta$, frekansın artmasıyla düşük frekanslarda azaldığı ve yüksek frekanslara çıkıldıkça artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Arayüzeyssel kutuplanma nedeniyle, $\tan\delta$ farklı frekanslarda değişim eğiliminde sergilemektedir.

İNDİRGENMİŞ GRAFEN OKSİT (RGO) ARAYÜZEY TABAKALI METAL OKSİT YARIİLETKEN KAPASİTÖRÜN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ



Şekil 4. Elektriksel iletkenliğin (σ_{ac}) 1 V gerilim altında frekansa bağlı değişim eğrileri

Ac elektriksel iletkenlik dağılımı (σ_{ac}) malzeme hakkında bilgi veren önemli parametrelerden biri olan bu özellik Eşitlik (6)' da verilen denklem kullanılarak hesaplandı. MOS kapasitörün elektriksel iletkenliğin (σ_{ac}) 1 V gerilim altında frekansa bağlı değişim eğrileri Şekil 4'te gösterilmektedir. Şekil 4'te gösterildiği gibi σ_{ac} değerleri artan frekansla artmaktadır. Frekansın artmasıyla polarizasyonun azalması bu grafikte görülen frekansın artmasıyla iletkenliğin artmasına neden olmaktadır. Polarizasyonun azalması sonucu olarak taşıyıcı sayısında artış olabileceğinden ac iletkenlik artışı olabilmektedir.



Şekil 5. MOS kapasitörün reel ve imajiner elektrik modülü (M' ve M'') değerlerinin frekansa bağlı değişim eğrileri

Dielektrik durulma spektroskopisi hakkında daha detaylı bir bilgi elde etmek için genellikle elektrik modülüs formülasyonu kullanılmaktadır ve elektrik modülünün frekansa bağlı özellikleri bu yapının dielektrik durulma mekanizması hakkında önemli bilgiler vermektedir. Kompleks empedans veya kompleks dielektrik geçirgenlik sabiti ($\epsilon^* = 1/M^*$) verisi eşitlik (7) ile verilen bağıntı kullanılarak M^* formülüne dönüştürülmüştür [25, 26].

$$M^* = \frac{1}{\epsilon^*} = M' + jM'' = \frac{\epsilon'}{(\epsilon')^2 + (\epsilon'')^2} + j \frac{\epsilon''}{(\epsilon')^2 + (\epsilon'')^2} \quad (7)$$

Burada M' reel ve M'' imajiner elektrik modülü değerlerini ifade etmektedir. MOS kapasitörün reel ve imajiner elektrik modülü (M' ve M'') değerlerinin frekansa bağlı değişim eğrileri Şekil 5'te gösterilmektedir. Şekil 5'te

İ. KARTERİ

görüldüğü gibi frekansa bağlı olarak, elektrik modülünün reel kısmı (M') ve elektrik modülünün imajiner (M'') kısmının frekans arttıkça arttığı görülmektedir. Bu artışın bu şekilde olması M' ve M'' değerlerinin dielektrik durulma mekanizmasının frekansa bağlı olarak değişiklik göstermesine neden olduğu söylenebilir [27]. Farklı frekans değerlerinde ϵ' , ϵ'' , σ_{ac} , M' ve M'' gibi dielektrik parametrelerin değerleri Tablo 1'de verildi. Tablo 1'de görüldüğü gibi ϵ' ve ϵ'' değerleri frekans artırıldığında azalırken σ_{ac} , M' ve M'' değerleri artmaktadır.

Tablo 1. Farklı frekans değerlerinde dielektrik parametrelerin değerleri

f (kHz)	ϵ'	ϵ''	σ_{ac} (Ωcm) ⁻¹ ·10 ⁻⁹	M'	M''
10	0,610	0,228	0,793	1,436	0,538
50	0,453	0,157	2,736	1,966	0,684
100	0,405	0,145	5,037	2,187	0,784
300	0,336	0,129	13,430	2,590	0,994
500	0,303	0,118	20,562	2,855	1,114
700	0,282	0,109	26,625	3,073	1,191
1000	0,260	0,098	33,982	3,366	1,268

4. SONUÇLAR

Au/RGO/p-Si yapıları MOS kapasitörün dielektrik özelliklerini araştırmak için kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) ölçümleri oda sıcaklığında üç farklı frekans değerleri için 200, 300, 500 ve 700 kHz frekanslarda 0,01V' dan +5V' a kadar gerilim aralığında incelendi. Aynı zamanda, dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp açısı ($\tan\delta$), elektrik modülü (M' ve M'') ve ac elektrik iletkenliği (σ_{ac}) 10 kHz ile 1 MHz aralığında frekansa bağlı olarak araştırıldı. Frekansa bağlı ölçümlerde ise C-V ve G/w-V eğrileri özellikle pozitif gerilim bölgesinde frekans dağılımına sahip oldukları ve bu bölgede kapasitans ve iletkenlik artan frekansla azaldığı görüldü. Frekansa bağlı dielektrik özelliklere bakıldığında ise artan frekanslarda iyonik polarizasyonun ϵ' , ϵ'' durumlarına katkıları etkisiz olduğu görülerek artan frekansla ϵ' , ϵ'' değerlerinin azaldığı anlaşıldı. Sonuçların MOS kapasitörün dielektrik parametrelerin frekans ve voltajla önemli ölçüde değiştiğini gösterdi.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimi (Proje No: BAP-2016/6-55M) ve Graf Nano Teknolojik Malzemeler San. ve Tic. Ltd. Şti. tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] SZE, S.M., NG, K.K., Physics of Semiconductor Devices, (3rd ed.), John Wiley and Sons Inc. Hoboken, Canada, USA, 2007.
- [2] BYRUM, L.E., ARIYAWANSA, G., JAYASINGHE, R.C., DIETZ, N., PERERA, A.G.U., MATSIK, S.G., FERGUSON, I.T., BEZINGER, A., LIU H.C., "Negative Capacitance in GaN/AlGaN Heterojunction Dual-Band Detectors", Journal of Applied Physics, 106, 053701-053706, 2009.
- [3] NICOLLIAN, E.H., BREWS, J.R., MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology, Wiley, New York, USA, 1982.
- [4] TERMAN, M., "An Investigation of Surface States at Silicon-Silicon Oxide Interface Employing Metal Oxide Silicon Diodes", Solid State Electron, 5, 285- 299, 1962.
- [5] WANG, Z., WANG, W., WANG, M., "P-type Reduced Graphene Oxide Membranes Induced by Iodine Doping", Journal of Materials Science, 48, 2284-2289, 2013.
- [6] SEO, H., AHN, S., KIM, J., LEE, Y.A., CHUNG, K.H., JEON, K.J., "Multi-Resistive Reduced Graphene Oxide Diode with Reversible Surface Electrochemical Reaction Induced Carrier Control", Scientific Reports, 4, 5642-5649, 2014.
- [7] NUR, S.K., HUSSIN, M.R.M., NASIR, I.M., MUKHTER UZ-ZAMAN, A.S.M., HANIM ABDULLAH W.F., ZOOLFAKAR, A.S., "Study of Reduced Graphene Oxide for Trench Schottky Diode", Materials Science and Engineering, 99, 012031-012036, 2015.

İNDİRGENMİŞ GRAFEN OKSİT (RGO) ARAYÜZEY TABAKALI METAL OKSİT YARIİLETKEN KAPASİTÖRÜN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

- [8] WANG, L., PARK, Y.P.S., CUI, H. LEE, B., LEE, S.M., LEE, H. “Facile Preparation of an N-type Reduced Graphene Oxide Field Effect Transistor at Room Temperature”, *Chemical Communications.*, 50, 1224-1226, 2014.
- [9] ZHU, J.X., YANG, D., YIN, Z.Y., YAN, Q.Y., ZHANG, H., “Graphene and Graphene-Based Materials For Energy Storage Applications”, *Small*, 10, 3480-3498, 2014.
- [10] KE, Q., LIU, Y., LIU, H., ZHANG Y., HU, Y., WANG, J., “Surfactant-Modified Chemically Reduced Graphene Oxide for Electrochemical Supercapacitors”, *RSC Advances*, 4, 26398-26406, 2014.
- [11] CHEN, X.A., CHEN, X.H., ZHANG, F.Q., YANG, Z., HUANG, S.M., “One-pot Hydrothermal Synthesis of Reduced Graphene Oxide/Carbon Nanotube/A-Ni(OH)₂ Composites for High Performance Electrochemical Supercapacitor”, *Journal of Power Sources*, 243, 555-561, 2013.
- [12] BYON, H.R., LEE, S.W., CHEN, S., HAMMOND, P.T., SHAO-HORN Y., “Thin Films of Carbon Nanotubes and Chemically Reduced Graphenes for Electrochemical Micro-Capacitors”, *Carbon*, 49, 457-467, 2011.
- [13] HIBINO, H., KAGESHIMA, H., KOTSUGI, M., MAEDA, F., GUO, F.Z., WATANABE, Y., “Dependence of Electronic Properties of Epitaxial Few-Layer Graphene on the Number of Layers Investigated by Photoelectron Emission Microscopy” *Physical Review B*, 79, 125437-125544, 2009.
- [14] PARK, J. K., SONG, S.M., MUN, J.H., CHO, B.J., “Dramatic Improvement of High-K Gate Dielectric Reliability by Using Mono-Layer Graphene Gate Electrode”, *Proceedings of the 14nm CMOS Technology and Design Co-Optimization and Emerging Memory Technologies, Symposium on VLSI Technology Short Course*, 31-32. Kyoto, Japan, 2012.
- [15] SONG, S.M., PARK, J.K., SUL, O.J., CHO, B.J., “Determination of Work Function of Graphene under a Metal Electrode and Its Role in Contact Resistance”, *Nano Letters*, 12, 3887-3892, 2012.
- [16] MISRA, A., WAIKAR, M., GOUR, A., KALITA, H., KHARE, M., ASLAM, M., KOTTANTHARAYIL, A., “Work Function Tuning and Improved Gate Dielectric Reliability with Multilayer Graphene as a Gate Electrode for Metal Oxide Semiconductor Field Effect Device Applications”, *Applied Physics Letters*, 100, 233506-233601, 2012.
- [17] COWLEY, A.M., SZE, S.M., “Surface State and Barrier Height of Metal Semiconductor Systems”, *Journal of Applied Physics*, 36, 3212-3221, 1965.
- [18] KWAN, C.K., *Dielectric Phenomena in Solids: with Emphasis on Physical Concepts of Electronic Processes*, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 2004.
- [19] CHELKOWSKI A., *Dielectric Physics*, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 1980.
- [20] RAJU G.G., *Dielectrics in Electric Fields*, Marcel Dekker Inc., New York, USA, 2003.
- [21] RICHMAN P., *MOS Field-Effect Transistors and Integrated Circuits*, Wiley Inc., New York, USA, 1973.
- [22] VON HIPPEL, A.R., *Dielectric Materials and Applications*, John Wiley and Sons Inc., New York, USA, 1954.
- [23] DANIEL, V.V., *Dielectric Relaxation*, Academic Press, London, UK, 1967.
- [24] K. RAJASEKAR, SUBBARAYAN, A., SATHYAMOORTHY, R., “AC and Dielectric Properties of Thermally Evaporated P-type (Sb₂Te₃)₇₀ (Bi₂Te₃)₃₀ Thin Films”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90, 2515-2522, 2006.
- [25] PISSIS, P., KYRITSIS, A., “Electrical Conductivity Studies in Hydrogels”, *Solid State Electronics*, 97, 105-113, 1997.
- [26] PRABAKAR, K., NARAYANDASS, S.K., MANGALARAJ, D., “Dielectric Properties of Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te Thin Films”, *Physical Status Solid*, 199, 507-514, 2003.
- [27] DÖKME, I., ALTINDAL, Ş., GÖKÇEN, M., “Frequency and Gate Voltage Effects on the Dielectric Properties of Au/SiO₂/n-Si Structures”, *Microelectronic Engineering*, 85, 1910-1914, 2008.