Gazi University Journal of Science
GU J Sci Part C
4(2):65-70 (2016)

Metal-Oksit-Yarıiletken (MOS) Kapasitörün Dielektrik Parametrelerinin Frekans ve Sıcaklık Bağımlılığı

Adem TATAROĞLU[1, ♠]

[1]*Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Teknikokullar, Ankara*

Başvuru: 13/05/2016 Düzeltme:20/05/2016 Kabul: 21/05/2016

ÖZ

Bu çalışmada, Silisyum Nitrür (Si_3N_4) arayüzey oksit tabakalı metal-oksit-yarıiletken (MOS) kapasitörün dielektrik parametreleri araştırılmıştır. Admitans ölçümleri (kapasitans ve iletkenlik), 300-400 K sıcaklık aralığında üç farklı frekans için (100, 500 ve 1000 kHz) gerçekleştirildi. MOS kapasitörün dielektrik parametreleri bu ölçümler kullanılarak hesaplandı. Dielektrik sabiti (ε') ve dielektrik kayıp (ε") artan sıcaklıkla artarken artan frekansla azalmaktadır. Elde edilen ac iletkenlik(σ_{ac}) değerleri artan sıcaklık ve frekans ile artmaktadır. Ayrıca, elektriksel iletkenliğin Arrhenius eğrileri ($ln\sigma_{ac}$-1000/T), 300-320 K ve 340-400 K sıcaklık aralığında farklı eğimli iki lineer bölge gösterdi. Ayrıca, aktivasyon enerjileri (E_a), iki lineer bölgenin eğiminden hesaplandı.

Anahtar Kelimeler: *MOS kapasitör; admitans ölçümleri; dielektrik parametreler*

Frequency and Temperature Dependence of Dielectric Parameters of Metal-Oxide-Semiconductor (MOS) Capacitor

ABSTRACT

In this study, the dielectric parameters of metal-oxide-semiconductor (MOS) capacitor with silicon nitride (Si_3N_4) interfacial oxide layer have been investigated. The admittance measurements (capacitance and conductance) were performed in the temperature range of 300-400 K for three different frequencies (100, 500 and 1000 kHz). The dielectric parameters of the MOS capacitor were calculated using these measurements. The dielectric constant (ε') and loss (ε") increase with increasing temperature, while they decrease with increasing frequency. Also, ac conductivity (σ_{ac}) increases with increasing temperature and frequency. Arrhenius plots ($ln\sigma_{ac}$-1000/T) of ac conductivity show two linear regions with different slopes in the temperature range of 300-320 K and 340-400 K, respectively. Also, the activation energies (E_a) were calculated from slope of two linear regions.

Keywords: *MOS capacitor; admittance measurements; dielectric parameters*

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapı, yalıtkan oksit tabakasının dielektrik özelliğinden dolayı paralel levhalı bir kondansatöre benzemektedir. Bu yapının belirgin özellikleri paralel levhalı kondansatörde olduğu gibi oksit ve oksit-yarıiletken arayüzey özellikleri tarafından belirlenmektedir. Bu arayüzey yalıtkan oksit tabaka metal ile yarıiletkeni birbirinden izole eder ve metal ile yarıiletken arasındaki yük geçişlerini düzenler [1-3]. İdeal MOS yapı denge durumunda iken, metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin iş fonksiyonu arasındaki fark sıfır olmalıdır. Ayrıca, ideal MOS yapıda, yalıtkan oksit içinde ve oksit-yarıiletken arayüzeyinde arayüzey durumları ve yükleri, sabit ve hareketli iyonlar bulunmaz. Gerçek MOS yapılarda ise oksit-yarıiletken arayüzeyindeki arayüzey durumları olarak adlandırılan tuzaklanmış yükler ve oksidasyon sırasında yönteme bağlı olarak ortaya çıkan, hareketli iyonlar, tuzaklar, sabit oksit ve arayüzey yüklerinin bulunması, MOS

♠Corresponding author, *e-mail: ademt@gazi.edu.tr*

yapısının ideal özelliklerinden sapmasına sebep olmaktadır [1-5].

Dielektrikler yani elektriksel olarak yalıtkan maddeler uygulanan bir alternatif elektrik alandan etkilenirler. Bu alan etkisi ile dielektrik maddedeki pozitif ve negatif yükler oluşan elektrostatik kuvvet altında zıt yönlerde küçük yer değiştirirler. Bunun sonucunda, elektrik yük merkezleri kayar ve elektriksel kutuplanma meydana gelir. Dielektrik bütün olarak yük bakımından nötr olmakla beraber polarize olur. Kutuplanma sonucunda, dielektrik madde elektrik dipol momenti kazanır. Oluşan bu dipoller, dielektrik yüzeyinde elektriksel yük birikimi sağlar. Dielektrikler bu özelliğinden dolayı kondansatör yapımında kullanılırlar [6-8].

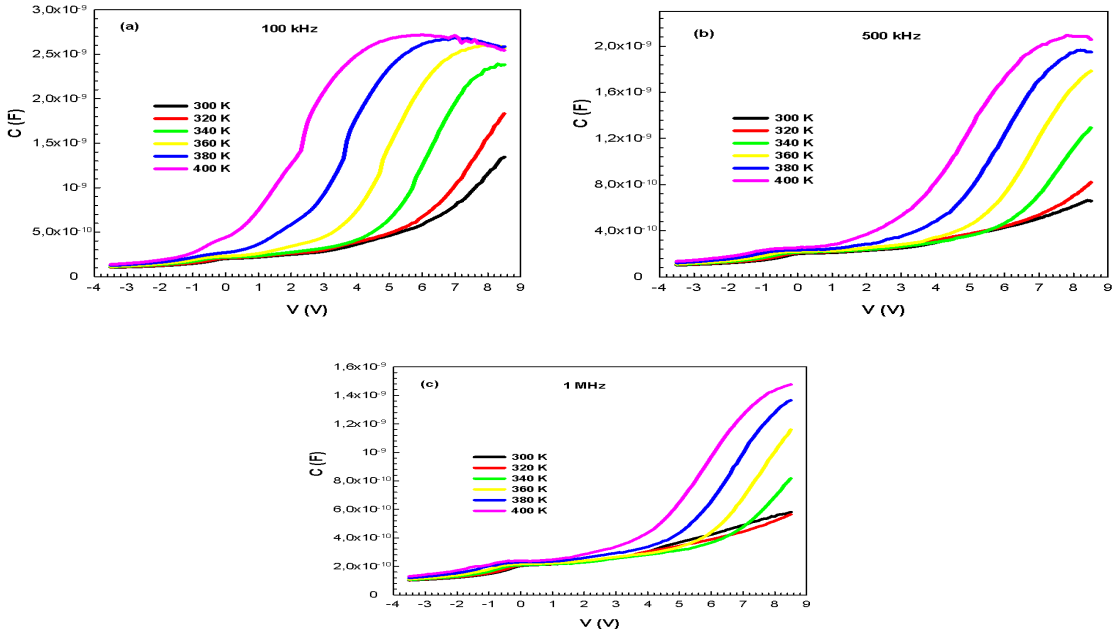
Sıcaklık ve frekanstaki değişim MOS yapıların elektrik ve dielektrik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu çalışmada, Au/Si_3N_4/n-Si (MOS) kapasitörün dielektrik parametrelerinin frekans ve sıcaklık bağımlılıkları incelenmiştir.

2. DENEYSEL AYRINTI (EXPERIMENTAL DETAIL)

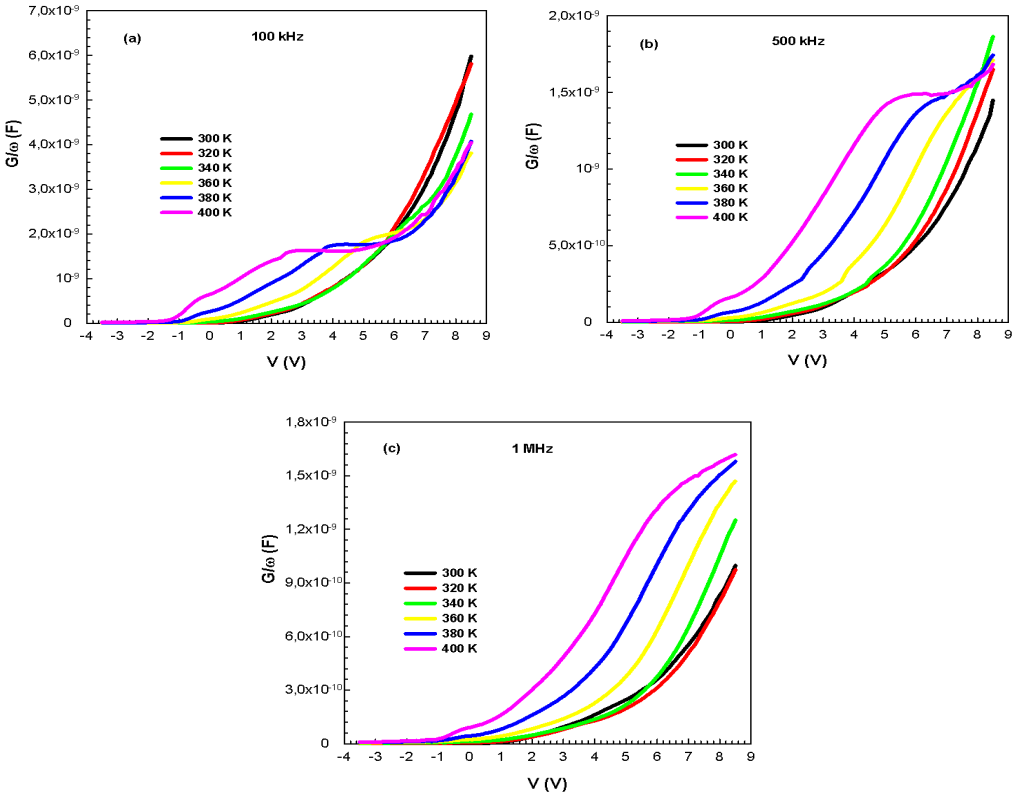
Au/Si_3N_4/n-Si (MOS) kapasitörü oluşturmak için, (100) yüzey yönelimli, 0,5 Ω .cm özdirençli ve 300 μ m kalınlıklı bir yüzeyi parlatılmış fosfor katkılı n-Si yarıiletkeni kullanıldı. Silisyum nitrür (Si_3N_4) ince film büyütülmeden önce, Si yarıiletken yüzeyi üzerindeki organik ve ağır metal kirlerini gidermek ve yüzeydeki pürüzleri ortadan kaldırmak için kimyasal olarak temizlendi. RF magnetron püskürtme yöntemi kullanılarak yarıiletken üzerine Si_3N_4 ince film büyütüldü. İnce film büyütme işleminden sonra, altın (Au) metal omik ve doğrultucu kontaklar oluşturmak için yüksek vakumlu metal buharlaştırma sistemi kullanıldı. Böylece, Au/Si_3N_4/n-Si (MOS) kapasitör hazırlandı. Daha sonar, doğrultucu kontaklar üzerine iletken teller gümüş pasta ile tutturularak hazırlanan MOS kapasitörün elektriksel ölçümleri gerçekleştirildi. Hewlett Packard 4192A Düşük Frekans (LF) Empedans Analizmetre, Janes vpf-475 kryostat ve Lake Shore model 321 Auto-tuning sıcaklık kontrol cihazı kullanılarak kapasitans-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G-V) ölçümleri, 300-400 K sıcaklık aralığında üç farklı frekans için (100, 500 ve 1000 kHz) gerçekleştirildi.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Hazırlanan MOS kapasitörün 300-400 K aralığında sıcaklığa bağlı kapasitans (C) ve iletkenlik (G/ω) ölçümleri 100 kHz, 500 kHz ve 1 MHz frekans değerlerinde gerçekleştirildi. Kapasitans ve iletkenliğin uygulanan gerilimin fonksiyonu olarak sıcaklık ile değişim eğrileri sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de verildi. Şekil 1 ve Şekil 2'den görüldüğü gibi, hem kapasitans hem de iletkenlik değerleri artan sıcaklık ile artmaktadır. Artan sıcaklık ile kapasitansdaki bu artış arayüzey yük oluşumlarından, iletkenlikteki artış ise termal yük taşıyıcı hareketliliğinden yani yüklerin termal aktivasyonundaki artıştan kaynaklanmaktadır [9-13]. Ayrıca, dipol yöneliminden kapasitansa gelen katkı artan sıcaklık ile artmaktadır. Bu şekillerden görüldüğü gibi, MOS kapasitörün kapasitans ve iletkenlik değerleri artan frekans ile azalmaktadır. Kapasitansın frekansa bağımlılığı, arayüzey durumların varlığına atfedilmektedir. Düşük frekanslarda, arayüzey durumları ac sinyalini takip edebilir ve kapasitansa katkıda bulunurlar. Yüksek frekanslarda ise, arayüzey durumları ac sinyali takip edemez ve kapasitansta katkıları ihmal edilebilecek kadar küçüktür [1,2,14,15].



Şekil 1. MOS kapasitörün farklı frekanslarda sıcaklığa bağlı C-V eğrileri (a) 100 kHz (b) 500 kHz (c) 1 MHz.



Şekil 2. MOS kapasitörün farklı frekanslarda sıcaklığa bağlı G/ω-V eğrileri (a) 100 kHz (b) 500 kHz (c) 1 MHz.

MOS kapasitörün dielektrik sabiti (ε'), dielektrik kayıp (ε"), dielektrik kayıp açı (tanδ) ve ac iletkenlik (σ_{ac}) gibi dielektrik parametreleri ölçülen kapasitans (C_m) ve iletkenlik (G_m/ω) verileri kullanılarak hesaplandı. Bu parametrelerin frekans ve sıcaklık bağımlılığı incelendi.

Kompleks dielektrik sabiti aşağıda verilen form ile ifade edilmektedir [6-8,16,17].

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (1)$$

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

$$\varepsilon' = \frac{C_{ox}}{C_o} \text{ ve } \varepsilon'' = \frac{G_m}{C_o\omega} = \frac{d_{ox}}{A\varepsilon_o}\frac{G_m}{\omega} \quad (2)$$

eşitlikleri ile verilir. Burada C_o plakaları arası boş kapasitörün kapasitansı ($C_o=\varepsilon_o(A/d_{ox})$), A MOS kapasitörün doğrultucu kontak alanı, d_{ox} oksit tabaka kalınlığı ve ε_o boşluğun dielektrik geçirgenlik sabitidir (ε_o= 8.85x10^{-14} F/cm). Oksit kapasitansı (C_{ox}),

$$C_{ox} = C_{ma}\left[1+\frac{G_{ma}^2}{\omega^2 C_{ma}^2}\right] \text{ veya } C_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox}A_{ox}}{d_{ox}} \quad (3)$$

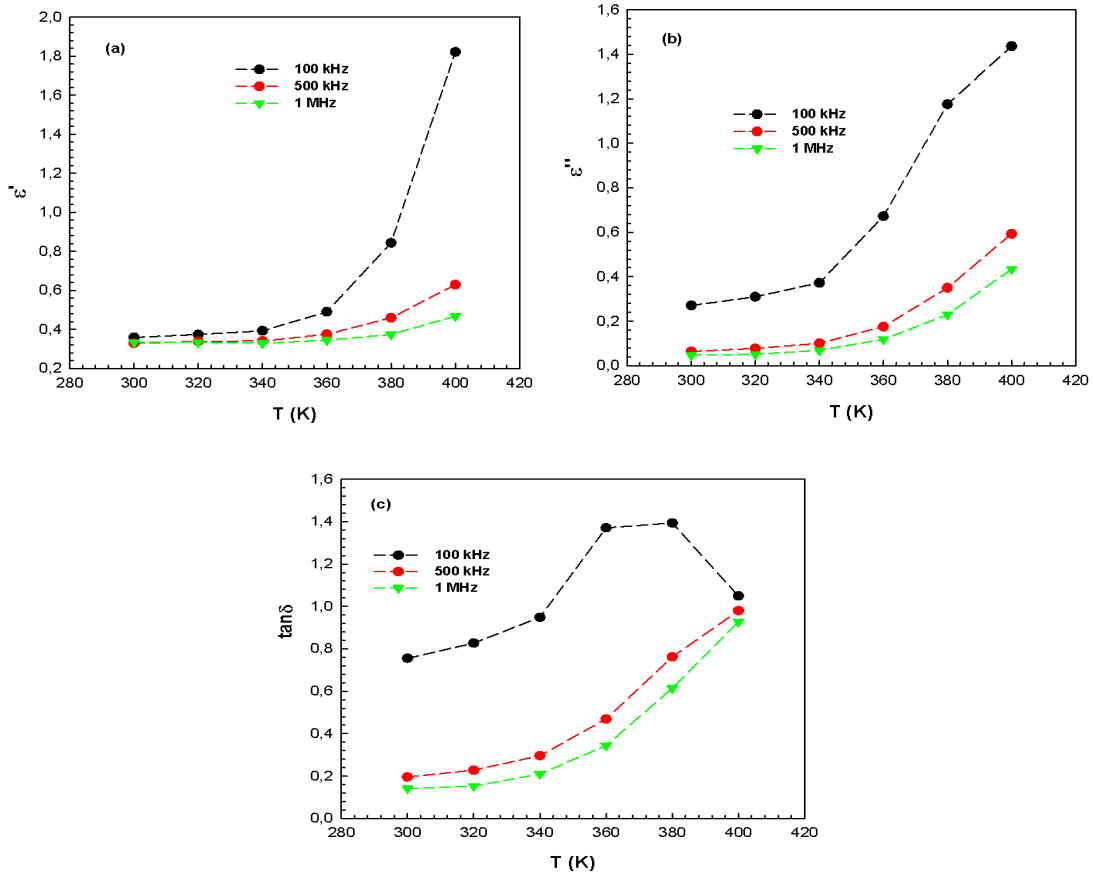
ile verilir [2,3]. Burada, ε_{ox} oksit tabakanın dielektrik sabiti olup 7,5ε_o (ε_{Si3N4}=7,5) değerine eşittir [2]. Dielektrik kayıp tanjantı veya açı (tanδ),

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

ve ac elektriksel iletkenlik (σ_{ac}) ise

$$\sigma_{ac} = \omega\varepsilon_0\varepsilon' \tan\delta = \varepsilon''\omega\varepsilon_o \quad (5)$$

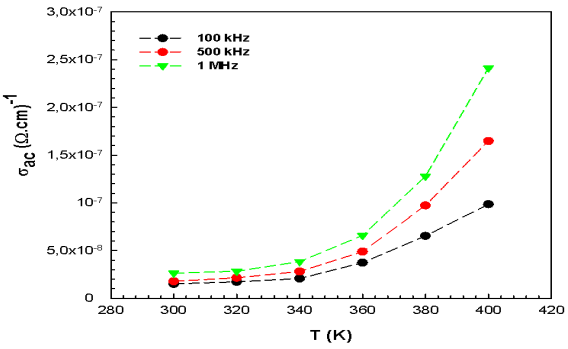
eşitlikleri ile verilir.



Şekil 3. MOS kapasitörün farklı frekanslarda a) dielektrik sabiti (ε') b) dielektrik kayıp (ε") ve c) dielektrik kayıp açı (tanδ)'nın sıcaklığa bağlı değişim eğrileri.

MOS kapasitörün dielektrik sabiti (ε'), dielektrik kayıp (ε") ve dielektrik kayıp açının (tanδ) farklı frekanslarda sıcaklık ile değişim eğrileri Şekil 3(a-c)'de verildi. Şekil 3 (a) ve (b)'de görüldüğü gibi, ε' ve ε" değerleri her frekans değerinde artan sıcaklık ile artmaktadır. Artan sıcaklık dielektrik sabitinin artması yük taşıyıcılarının yoğunluğunun artmasından, dielektrik kaybın artması ise iletim kayıplarından ve uzay-yük kutuplanmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, termal uyarma sonucunda dipollerin yönelimi ve yönelimli kutuplanmanın artması ile dielektrik sabiti artar. Sıcaklık arttıkça, kristal örgü içinde kusurlar/düzensizlikler oluşur ve çoğunluk yük taşıyıcıların hareketliliği artar. Uzay yük taşıyıcılarının artması ve kristal kusurlarının oluşması uzay-yük veya arayüzeysel kutuplanmanın artmasına neden olur [12,13,18-21]. Ayrıca, ε' ve ε" değerleri artan frekans ile azalmaktadır. Artan frekansla dielektrik sabitindeki bu azalma, artan frekansla polarizasyonun azalmasına atfedilmektedir. Şekil 3(c)'de görüldüğü gibi tan δ, artan sıcaklıkla artarken, artan frekansla azalmaktadır. Düşük frekanslarda etkili olan arayüzeysel kutuplanma nedeniyle, tan δ düşük frekanslarda yüksek değer alır.

MOS kapasitörün ac elektriksel iletkenliğin (σ_{ac}) farklı frekanslarda sıcaklığa bağlı değişim eğrileri Şekil 4'de verildi. Şekilden görüldüğü gibi, iletkenlik değeri artan sıcaklık ve artan frekans ile artmaktadır. Artan sıcaklık ile yük taşıyıcılarının hareketliliğinin artması, iletkenliğin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca, bu artış metal/oksit arayüzeyindeki kusurlar veya düzensizliklerden ve lokalize olmuş kusurlar içerisinde sıçrama ile yer değiştiren yük taşıyıcılarından dolayı olabilir [22-25].

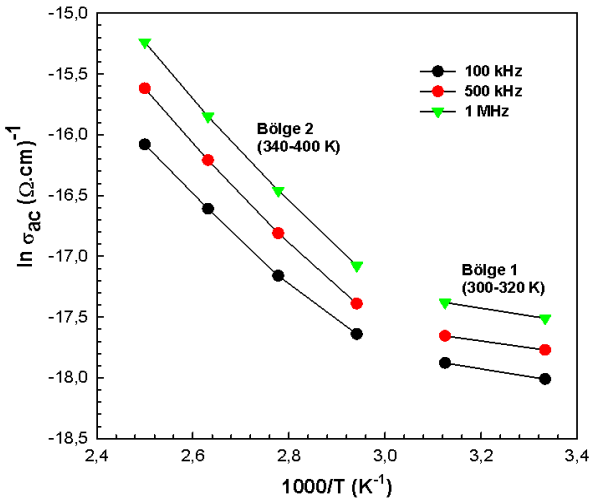


Şekil 4. Elektriksel iletkenliğin (σ_{ac}) farklı frekanslarda sıcaklığa bağlı değişim eğrileri

Elektriksel iletkenliğin (σ_{ac}) sıcaklık ile değişimi Arrhenius denklemi ile verilir.

$$\sigma = \sigma_o \exp(-E_a / kT) \quad (6)$$

Burada, σ_0 eksponansiyel faktör, k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık ve E_a termal aktivasyon enerjisidir. $\ln(\sigma_{ac})$-(1000/T) grafiğinden elde edilen doğrunun eğimi $-E_a/kT$'ye eşittir. Bu eşitlikten aktivasyon enerjisi hesaplanır. MOS kapasitörün Arrhenius eğrileri Şekil 5'de verildi. Şekilden görüldüğü gibi, 300-320 K ve 340-400 K sıcaklık aralığında iki lineer bölge görülmektedir. Bu lineer bölgelerin eğiminden hesaplanan E_a ve σ_0 değerleri Tablo 1'de verildi. Tablo 1'de görüldüğü gibi, düşük sıcaklık bölgesinde hesaplanan aktivasyon enerjisi yüksek sıcaklık bölgesinde hesaplanan aktivasyon enerjisinden düşüktür. Düşük aktivasyon enerjisi yeniden birleşme ve uzay yüklerinin varlığına, yüksek aktivasyon enerjisi ise yük taşıyıcılarının üretimine atfedilmektedir.



Şekil 5. Farklı frekanslarda çizilen Arrhenius eğrileri.

Tablo 1. 300-320 K ve 340-400 K sıcaklık aralıklarında elde edilen E_a ve σ_o değerleri

f (kHz)	E_a (eV) (300-320 K)	σ_o $(\Omega.cm)^{-1}$ (300-320 K)	E_a (eV) (340-400 K)	σ_o $(\Omega.cm)^{-1}$ (340-400 K)
100 kHz	0,055	$1,26x10^{-7}$	0,306	$7,08x10^{-4}$
500 kHz	0,048	$1,20x10^{-7}$	0,346	$3,63x10^{-3}$
1 MHz	0,054	$1,98x10^{-7}$	0,359	$7,66x10^{-3}$

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, Au/Si_3N_4/n-Si (MOS) kapasitörün dielektrik parametrelerinin frekans ve sıcaklık bağımlılıkları admitans ölçümleri kullanılarak araştırılmıştır. Kapasitans ve iletkenlik değerleri artan sıcaklıkla artarken artan frekansla azalmaktadır. Bu değerler kullanılarak hesaplanan dielektrik sabiti (ε') ve dielektrik kayıp (ε'') artan sıcaklıkla artarken artan frekansla azalmaktadır. Dielektrik sabiti arayüzeysel ve yönelimli kutuplanma, dielektrik kayıp ise iletim kaybı ile ilişkilidir. AC elektriksel iletkenlik (σ_{ac}) frekans ve sıcaklık arttıkça artmaktadır. MOS kapasitörün aktivasyon enerjileri Arrhenius eğrilerinin eğiminden hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, hazırlanan MOS kapasitörün elektrik ve dielektrik özelliklerinin hem frekans hem de sıcaklığa bağlı olduğunu göstermiştir.

KAYNAKLAR(REFERENCES)

[1] Nicollian E.H., Brews J.R., "MOS Physics and Technology", Wiley, New York, 1982.

[2] Sze S.M., Kwok K.N. "Physics of Semiconductor Devices", Wiley, New Jersey, 2007.

[3] Richman P., "MOS Field-Effect Transistors and Integrated Circuits", Wiley, New York, 1973.

[4] McNutt M.J., Sah C.T., "Determination of the MOS oxide capacitance" J. Appl. Phys. 46,3909-3913, 1975.

[5] Terman M., "An investigation of surface states at silicon-silicon oxide interface employing metal oxide silicon diodes", Solid State Electron. 5, 285-299, 1962.

[6] Popescu M., Bunget I., "Physics of Solid Dielectrics", Elsevier, Amsterdam, 1984.

[7] Kwa, C.K., "Dielectric Phenomena in Solids", Elsevier, Amsterdam, 2004.

[8] Chelkowski A., "Dielectric Physics", Elsevier, Amsterdam, 1980.

[9] Ertuğrul R., Tataroğlu A., "Influence of Temperature and Frequency on Dielectric Permittivity and ac Conductivity of Au/SnO2/n-Si (MOS) Structures" Chin. Phys. Lett. 29, 077304, 2012.

[10] Elkestawy M.A., Abdel Kader S., Amer M.A., "AC conductivity and dielectric properties of Ti-doped $CoCr_{1.2}Fe_{0.8}O_4$ spinel ferrite", Physica B 405, 619-624, 2010.

[11] Ali H.A.M., Soliman H.S., Saadeldin M., Sawaby K., "Frequency dependence of dielectric properties and conductivity of bulk copper sulphide", Mater. Sci. Semicon. Process. 18, 141-145, 2014.

[12] Tataroğlu A., Altındal Ş., Bülbül M.M., "Temperature and frequency dependent electrical and dielectric properties of $Al/SiO_2/p$-Si (MOS) structure", Microelectron. Eng. 81, 140-149, 2005.

[13] Ataseven T., Tataroğlu A., "Temperature-dependent dielectric properties of $Au/Si_3N_4/n$-Si (metal-insulator-semiconductor) structures", Chin. Phys. B 22, 117310, 2013.

[14] Card H.C., Rhoderick E.H., ''Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes'' J. Phys. D: Appl. Phys., 4, 1589-1601, 1971.

[15] Kar S., Dahlke W. E., "Interface states in MOS structures with 20-40 Å thick SiO_2 films on nondegenerate Si", Solid-State Electron. 15, 221-237, 1972.

[16] Tareev B., "Physics of Dielectric Materials", Mir Publishers, Moscow, 1979.

[17] Raju G.G., "Dielectrics in Electric Fields", Marcel Dekker, New York, 2003.

[18] Eroğlu A., Tataroğlu A., Altındal Ş., "On the temperature dependent dielectric properties, conductivity and resistivity of MIS structures at 1 MHz", Microelectron. Eng. 91, 154-158. 2012.

[19] Sattar A.A., Rahman S.A., "Dielectric Properties of Rare Earth Substituted Cu–Zn Ferrites", Phys. Status Solidi A 200, 415-422, 2003.

[20] Ram M., Chakrabarti S., "Dielectric and modulus behavior of LiFe1/2Ni1/2VO4 ceramics",J. Phys. Chem. Solids 69, 905-912, 2008.

[21] Prabakar K., Narayandass S.K., Mangalaraj D., "Dielectric properties of Cd0.6Zn0.4Te thin films", Phys. Status Solidi A 199, 507-514, 2003.

[22] Yakuphanoğlu, F., Zaitsev, D.D., Trusov, L.A., Kazin, P.E., "Electrical conductivity and electrical modulus properties of 13SrO-5.5Fe2O3-0.5Al2O3-8B2O3 magnetic glass ceramic", J. Mag. Mag. Mater. 312: 43-47, 2007.

[23] El-Nahass M.M., Atta A.A., El-Zaidia E.F.M., Farag A.A.M., Ammar A.H., "Electrical conductivity and dielectric measurements of CoMTPP", Mater. Chem. Phys. 143, 490-494. 2014.

[24] Sahay P. P., Mishra R. K., Pandey S. N., Jha S., Shamsuddin M. "AC transport properties of nanocrystalline SnO_2 semiconductor", Ceram. Int., 38, 1281-1286, 2012.

[25] Muthulakshmi S., Iyyapushpam S., Padiyan D.P. "Effect of temperature on the AC impedance of protein and carbohydrate biopolymers", Bulletin Mater. Sci. 37, 1575-1582, 2014.