

Arayüzey Doğal Oksit Tabakalı Al/p-Si/Al Yapıların Dielektrik Karakteristiklerine Ölçüm Frekansının Etkileri

Muhammed Can ÖZDEMİR¹, Ömer SEVGİLİ², İkram ORAK², Abdulmecit TURUT³

ÖZET: Deneysel olarak karakteristiklerini belirlemeye çalıştığımız arayüzey doğal oksit tabakalı Al/p-Si/Al metal/oksit tabaka/yarıiletken veya diğer bir adıyla metal/yalıtkan tabaka/yarıiletken (MIS) yapılar elde edilmiştir. Bu yapı için taban malzeme olarak 1-10 Ω -cm öz dirençli p-Si yarıiletkeni kullanılmıştır. Arka yüzeyi omik kontaklı olan bu p-Si dilim, laboratuvar ortamında ön parlak yüzeyi üzerinde doğal oksit SiO₂ tabakasının oluşması sağlanmıştır. Diyot parametrelerinin elde edilmesi için, yaygın olarak kullanılan, farklı frekanslarda kapasite-gerilim (C-V) kondüktans-gerilim (G-V) ölçümlerinden Al/p-Si MIS yapının deneysel frekans admittans karakteristikleri elde edilmiştir. Bu karakteristiklerinden, gerçek ϵ' ve sanal dielektrik ϵ'' sabiti, loss-tanjant (ϵ''/ϵ'), gerçek M' ve sanal elektriksel modülüs M'' ve ac iletkenliği σ_{ac} gibi parametreleri hesaplanmış ve gerekli grafikler çizimleri ve yorumları yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Metal/oksit tabaka/yarıiletken (MIS), Schottky diyotlar, Dielektrik Özellikler, kapasite-kondüktans, Dielektrik Spektroskopi

The Effect of Measurement Frequency on Dielectric Characteristics in Al/P-Si Structures with Interfacial Native Oxide Layer

ABSTRACT: Al/p-Si/Al metal/oxide layer/semiconductor or so-called metal/insulating layer/semiconductor (MIS) structures with interfacial native oxide layer are experimentally determined. For this structure, p-Si semiconductor with 1-10 Ω -cm resistivity was used as base material. The native oxide SiO₂ layer was formed on the front polished surface the p-Si wafer in the laboratory environment. In order to obtain diode parameters, it was determined the experimental frequency admittance characteristics of the Al/p-Si MIS structure from commonly used capacitance-voltage (C-V) conductance-voltage (G-V) measurements at different frequencies, and parameters such as the real ϵ' and imaginary dielectric ϵ'' constant, loss-tangent (ϵ''/ϵ'), real M' and imaginary electrical modulus M'' and ac conductivity σ_{ac} were calculated and interpreted.

Keywords: Metal/oxide layer/semiconductor (MIS), Schottky diodes, Dielectric Properties, Capacitance-conductance, Dielectric Spectroscopy

¹ Muhammed Can ÖZDEMİR (Orcid ID: 0000-0002-4002-7967), Institute of Graduate Education, Istanbul Medeniyet University, Nanoscience and Nanoengineering Department, 34700 Istanbul, Turkey

² Ömer SEVGİLİ (Orcid ID: 0000-0003-1740-1444), Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Bingöl Üniversitesi, 12000 Bingöl, Turkey,

² İkram ORAK (Orcid ID: 0000-0003-2318-9718), Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Bingöl Üniversitesi, 12000 Bingöl, Turkey,

³ Abdulmecit TÜRÜT (Orcid ID: 0000-0002-4664-4528), Fizik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Istanbul Medeniyet Üniversitesi, 34700 Istanbul, Turkey

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Abdulmecit TÜRÜT, e-mail: amecit2002@yahoo.com

GİRİŞ

Schottky diyotlar çoğunluk taşıyıcılara dayalı elektronik cihazlardır. Çoğunluk taşıyıcılara dayalı olması hız açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Radyo frekans uygulamalarında ve diğer güç elektroniği uygulamalarında Schottky diyotlar oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Schottky diyotlar *pn* eklem diyotlara göre, aynı potansiyel farkı altında, çok daha yüksek akım yoğunluğuna sahip olmasından ötürü ileri beslem durumunda, arınma bölgesi boyunca düşen gerilim oldukça düşüktür. Buna bağlı olarak Schottky diyotlar doğrultucu güç elektroniği devreleri için idealdirler. Ayrıca, imal etme kolaylığı ve elektronik özelliklerin genel olarak bilinmesi itibarıyla Schottky diyotlar opto-elektronik sanayisinde de önemini korumaktadır.

Metal-yarı iletken kontaklar, 1900'lü yıllara kadar radyo dedektörü, sonra radar dedektörü olarak kullanılmış olup mikro dalga diyotu olarak kullanılmaya başlanmaları 1970'lere rast gelmektedir. Bu yapıların teknolojik olarak kullanılmaya başlanmasından çok daha sonra teorik olarak anlaşılmaları gerçekleşmiştir. Schottky potansiyel engel yüksekliği (SPEY), metal-yarıiletken yapıdaki potansiyel engelin kimyasal bir tabakadan ziyade sadece yarıiletken içerisindeki kararlı uzay yüklerinden kaynaklandığı, Schottky engeli modeliyle 1938'de ortaya konulmuştur (Schottky, 1926). Bethe, 1942'de bu enerji engeli üzerinden taşıyıcıların SPEY teorisini termoyonik emisyon (TE) için geliştirmiştir. Daha sonra Crowel ve Sze, Schottky'nin difüzyon teorisi ile Bethe'nin TE teorisini tek bir TE-difüzyon modelinde birleştirmişlerdir (Cowley ve Sze, 1965).

Bir cihazın teknolojik uygulamalarda kullanılabilmesi için, onun elektriksel özellikleri çok iyi bilinmelidir. Bu durum metal-yarıiletken eklemeler için de geçerlidir ve bu özelliklerden biri, oluşan potansiyel engel yüksekliği (PEY) diğeri, metal-yarıiletken eklemesindeki akım geçiş mekanizmasıdır. Yukarıda ifade edildiği gibi, metal/yarıiletken (MS) ve metal/yalıtkan tabaka/yarıiletken (MIS) veya metal/oksit tabaka/yarıiletken (MOS) kontak yapıların alternatif akım (*ac*) frekans verilerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi, iki kutuplu eklem transistörler (*pnp* veya *nnp*), metal/yarıiletken/Alan etkili transistörler (MESFET) ve MOSFET gibi elektronik aygıtlar alanında ayrıcalıklı bir yere sahiptirler (Altındal, Karadeniz ve ark., 2003; Akın ve Yüksel 2018). Bundan dolayı, *ac* frekans bağımlı kondüktans-voltaj (*G-V*) ve kapasite-voltaj (*C-V*) ölçümlerinden karakteristik diyot parametrelerinin belirlenmesi elektronik sanayisine büyük bir katkı sağlar (Nicollian, Goetzberge, 1967; Nicollian ve Brews, 1982; Mönch, 2001; Şafak ve ark., 2015). Bu aygıtların kaliteli ve güvenilir olması, kullanılacak malzemelerle oluşturulacak omik ve doğrultucu kontak yapılarının kalitesine bağlıdır. Zira, teknolojide kullanılan opto-elektronik devre elemanları gibi ticari ürünlerin fabrikasyonunda imal edeceğimiz diyotların optimize edilmesi yadsınmayacak derecede bir boşluğu dolduracaktır (Aydın ve ark., 2004; Badalı ark., 2018; Çağlar ve ark., 2018).

Bunlardan başka, arayüzey doğal oksit tabakalı Al/p-Si MIS yapısının deneysel frekans bağımlı *C-V* ve *G-V* verilerinden admittans karakteristikleri, yani, gerçek ve sanal dielektrik sabiti, loss-tanjant, gerçek ve sanal elektriksel modülüs ve *ac* iletkenliği gibi parametrelerinin belirlenmesi ve bilinmesi de opto-elektronik sanayisinde büyük bir önem arz etmektedir. Frekansa bağlı olarak MIS yapının dielektrik sabiti veya dielektrik özelliklerinin değişimi, esas olarak, elektrik dipol kutuplanmasına, arayüzey kutuplanmasına ve arayüzey hallerinin yoğunluk dağılımına bağlıdır. Yapıdaki iletkenlik veya iletim ve hopping mekanizması hakkında detaylı bilgi edinmek için, voltaj ve frekans bağımlı admittans ölçümlerine ihtiyaç duyulur (Çetinkaya, ve ark., 2017; Polat, ve ark., 2019; karabulut ve ark. 2017; Koçyiğit ve ark. 2018). Bu çalışma içerik olarak, oda sıcaklığında *C-V-f*, *G-V-f* ölçümlerinden dielektrik özelliklerin belirlenmesi, grafik ve hesaplamalarını içine alan deneysel bulgular ve tartışma bölümlerinden oluşmaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

p-tipi Si Kristal Dilimlerinin Temizlenmesi ve Metal Kontakların Yapılması

Deneyisel olarak diyot karakteristiklerini belirlemeye çalıştığımız Al/p-Si MIS yapısını elde etmek için taban malzeme olarak 1-10 Ω -cm öz dirençli p-Si kullanılmıştır. Kimyasal temizleme işlemi için, p-Si kristal dilimleri, ilk olarak 30 derece asetonda ultrasonik banyoda üç dakika yıkandı. Hemen sonra, izopropanol alkol ile ultrasonik banyoda üç dakika yıkandı. Saf su ile aynı işlem tekrarlandı. Son olarak kuru azot ile numune kurutuldu. Omik ve doğrultucu kontak yapımında kullanılacak olan alüminyum parçacıkları da aynı şekilde kimyasal olarak temizlendi. Hazırlanan p-tipi Si dilim, omik kontak oluşturulması için, vakumlu kaplama ünitesi içindeki yerine konuldu ve birkaç alüminyum parçası tablaya yerleştirildi. 6×10^{-6} Torr, 48A altında Si taban malzemenin parlak olmayan arka yüzeyi üzerinde ince Al film tabakası oluşturuldu. Düşük dirençli iyi bir omik kontak elde etmek için, p-Si/Al sistem 570 °C'ye ayarlanmış fırın içinde, azot gazı akışı altında, 3 dakika kadar 570 °C'de ısıl olarak tavlandı. Tavlanmadan sonra Si/Al yapı, fırının ön tarafına alınarak oda sıcaklığında azot gazı akışı altında soğumaya bırakıldı. Arka yüzeyi omik kontaklı olan bu Si dilim laboratuvar ortamında tutularak ön parlak yüzeyi üzerinde doğal SiO₂ tabakasının oluşması sağlandı. Sonra, SiO₂/p-Si/Al dilim farklı büyüklükte parçalar halinde kesildi ve bu parçalardan bazıları kaplama ünitesi içine alındı. 6×10^{-6} Torr basınçlı vakumlu kaplama ünitesi içinde ve 1.75 mm çaplı deliklere sahip olan maskeler üzerine konulmuş olan SiO₂/p-Si/Al parçaların SiO₂ üstüne Al nokta Schottky kontaklar oluşturuldu.

Böylece, SiO₂ üzerinde 2.41×10^{-2} cm² yüzeyli Al nokta Schottky kontakların oluşturulmasıyla Al/SiO₂/Si/Al yapı imal edilmiş oldu. MIS: metal/yalıtkan tabaka/yarıiletken/metal olarak tanımlanır. AVO metreyle yapılan numune davranış testinde, bu yapının bir diyot davranışı gösterdiği görülmüştür. Bu numunelerin farklı frekanslarda admittans ölçümleri, HP model 4192A LF impedance analyzer cihazı kullanılarak, karanlıkta ve oda sıcaklığında yapılmıştır.

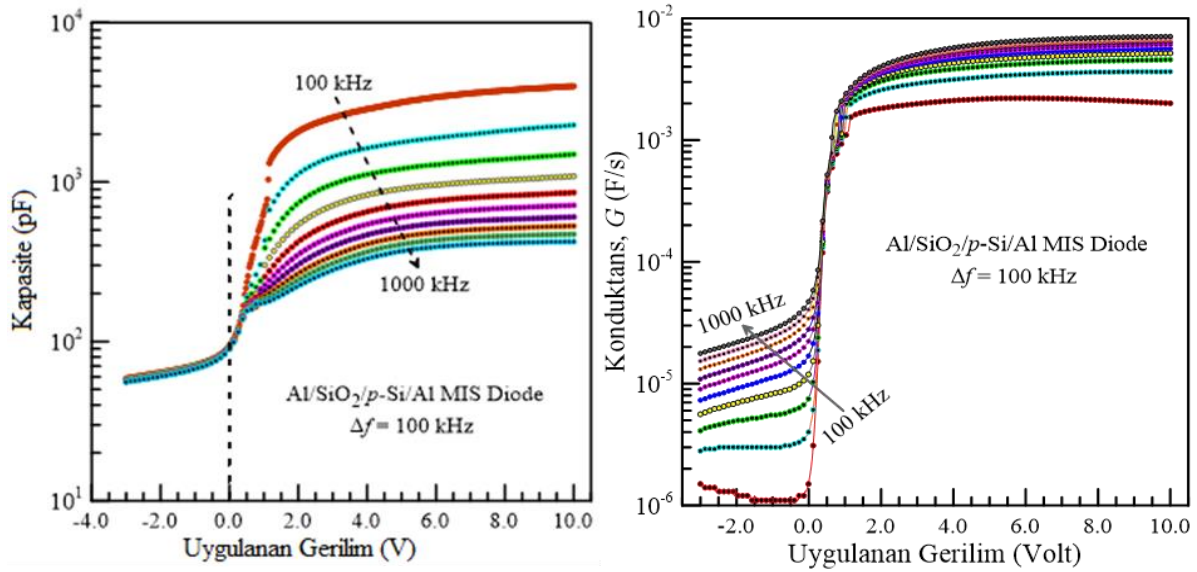
BULGULAR VE TARTIŞMA

Al/SiO₂/p-Si MIS Yapının Dielektrik Özellikleri

Bir dielektrik malzeme, bir elektrik alan altında polarize olabilen bir yalıtkandır. Bir dış elektrik alan altında elektrik yükleri bu dielektrik malzeme boyunca bir akım oluşturmazlar, fakat yüklerin denge durumundaki konumlarında bir değişim olur. Dolayısıyla, dielektrik malzeme polarize olur ve böylece içerisinde bir elektrik alan oluşur. Malzeme içerisinde oluşan bu elektrik alan kısmen, dışarıdan uygulanan elektrik alanı dengelemeye çalışır. Özellikle de metallerde bu iç elektrik alan uygulanan dış elektrik alanı sıfırlayınca kadar devam eder. Yaygın olarak kullanılan "yalıtkan" terimi düşük elektriksel iletimi ima etmesine rağmen, "dielektrik" tipik olarak yüksek polarize olma yeteneği olan malzemeleri tanımlamak için kullanılır. Bu da "dielektrik sabiti" denilen bir büyüklükle ifade edilir (Murarka ve ark., 2003).

Malzemelerin dielektrik özelliklerinin analizi, tipik olarak, malzemelerin kompleks permitivitesi ϵ^* 'nin kombinasyonu olan permitivite (geçirgenlik) ve iletkenlikliği belirler. Bu kompleks dielektrik sabiti ϵ^* niceliği, kompleks impedans Z^* kavramının bir benzeridir. Kompleks impedans Z^* ve kompleks dielektrik sabiti ϵ^* nicelikleri gerçek ve sanal kısımlardan oluşurlar. ϵ^* niceliği, gerçek permitiviti ϵ' (çoğu kez permitiviti veya dielektrik sabiti) ve sanal permitiviti ϵ'' (veya dielektrik loss, dielektrik kayıp) olarak, $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$, iki bileşene ayrılır (Nicollian ve Goetzberge, 1967; Nicollian ve Brews, 1982; Şafak ve ark. 2015). Dielektrik malzemelerde, enerji depolama bileşeni olan gerçek kısım ϵ' , dipollerin dizilmesini ve düzenlenmesini ve sanal kısım ϵ'' enerji kaybını temsil eder. Yani, kompleks dielektrik sabitinin sanal kısmı, ϵ'' , uygulanan elektrik alandan dolayı malzemede ne kadar enerjinin dağıldığının ve kaybolduğunun bir ölçüsüdür. Sanal kısmın ϵ'' değerinin düşüklüğü yani, enerji kaybının düşük

olması, malzemenin iyi bir dielektrik malzeme olduğunun bir göstergesidir (Güçlü ve ark., 2016; Coskun ve ark., 2018; Polat ve ark., 2018; Kumar ve ark., 2016; Cetinkaya ve ark. 2015).



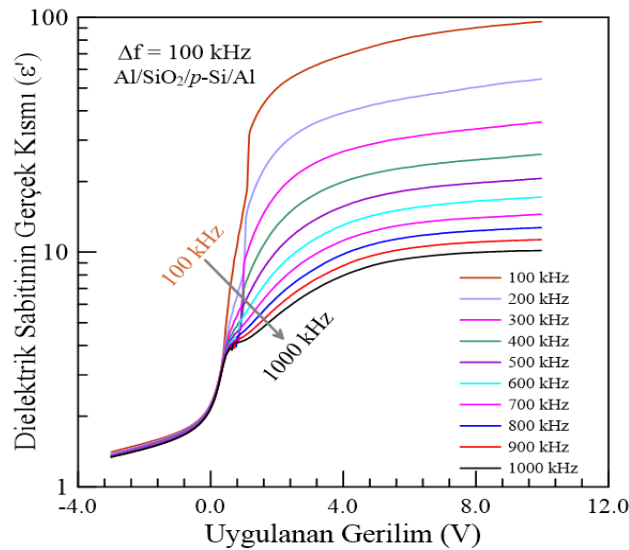
Şekil 1. Al/SiO₂/p-Si MIS yapısının kapasite ve kondüktans datalarının uygulanan potansiyel farkına bağlı farklı frekanslardaki grafikleri

Frekansa bağlı olan dielektrik sabitinin gerçek kısmı ϵ' , dielektrik sabitinin sanal kısmı veya dielektrik loss ϵ'' , tanjant loss $\tan(\delta)$, gerçek ve sanal elektrisel modulus M' , M'' ve ac öziletkenlik σ_{ac} parametreleri Al/SiO₂/p-Si MIS diyot için Şekil 1'de verilen 100-1000 kHz frekans aralığında deneysel kondüktans ve kapasitans değerleri dikkate alınarak aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanabilir. Kompleks dielektrik sabiti:

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (1)$$

Bu denklemde bulunan ϵ' ve ϵ'' nicelikleri, yukarıda işaret edildiği gibi, dielektrik sabitinin reel ve imajiner kısımlarıdır ve i imajiner $\sqrt{-1}$ 'dir. Kompleks dielektrik sabitin reel kısmı için aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$\epsilon' = \frac{C}{C_0} = \frac{C d_i}{\epsilon_0 A} \quad (2)$$



Şekil 2. Dielektrik sabitin gerçek kısmının gerilime bağlı farklı frekanslardaki grafiği

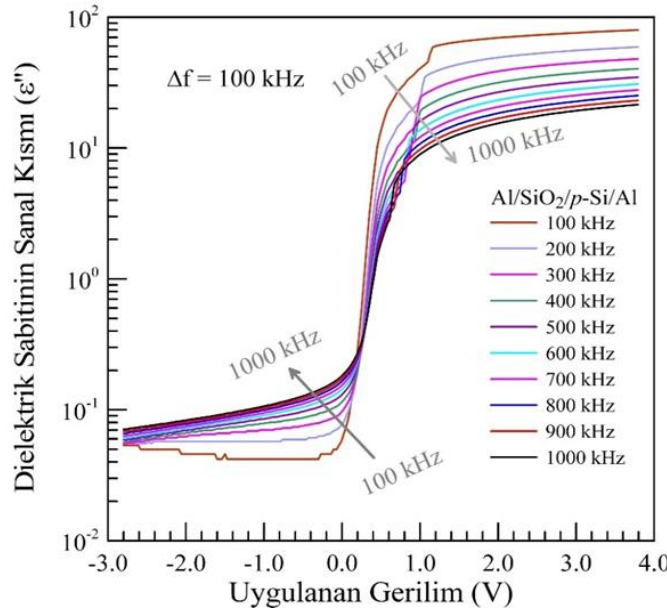
Eşitlikteki C_0 niceliği boş kapasitörün sığasını, A doğrultucu kontak alanını (cm^2), d_i arayüzey tabakası SiO₂ 'nin kalınlığını, ϵ_0 serbest uzay dielektrik sabitini ($\epsilon_0=8,85 \times 10^{-14}$ F/cm) ifade etmektedir. Doğru beslem (ileri beslem) mevcut yığılma bölgesindeki en yüksek kapasitans değeri arayüzey tabakası kapasitansına eşittir ($C_{ox} = C_i = \epsilon' \epsilon_0 A / d_i$). Herbir frekastaki $C-V$ ve $G-V$ grafiklerinin yığılma bölgesindeki C_{ox} ve G_{ox} değerleri kullanılarak arayüzey tabakası SiO₂ 'nin kalınlığı 8.06 nm olarak hesaplanmıştır. Kompleks dielektrik sabitinin imajiner kısmı,

$$\epsilon'' = \frac{G_{ox}}{\omega C_i} = \frac{G d_i}{\epsilon_0 \omega A} \quad (3)$$

Denklemlerle ifade edilebilir. Tanjan Loss, $\tan(\delta)$:

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

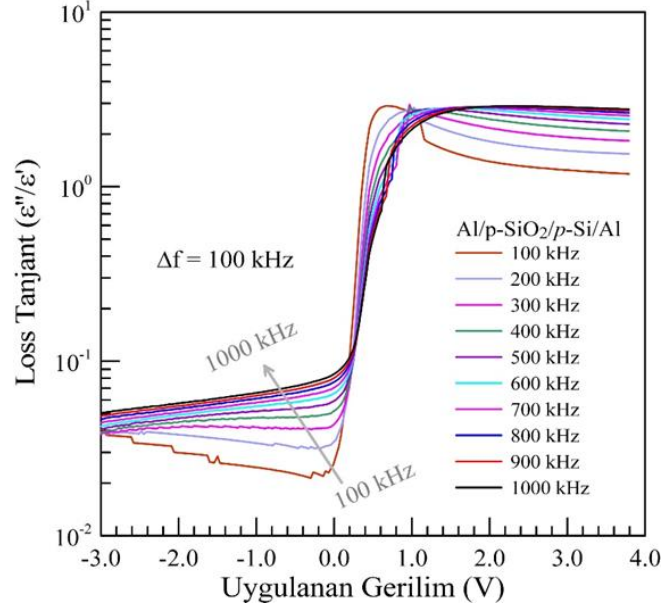
Şeklinde verilebilir. ϵ' , ϵ'' , ve $\tan(\delta)$ parametrelerinin farklı frekanslardaki gerilime bağlı grafikleri Şekil 2, 3 ve 4 'te verilmiştir. Bu parametrelerin her bir frekansta ki voltaj bağımlı değerleri, ölçülmüş olan kapasitans ve kondüktans değerleri kullanılarak hesaplanmış ve belli bir voltajda frekansa güçlü bir şekilde bağlı olduğu görülmektedir (Polat ve ark., 2018; Kumar ve ark., 2016; Cetinkaya ve ark., 2015; Turut ve ark., 2015; Koçyiğit ve ark., 2018).



Şekil 3. Dielektrik sabitinin sanal kısmının gerilime bağlı farklı frekanslardaki grafiği

Şekil 3 'den görülebildiği gibi, sıfır volta yakın bir voltajda, daha düşük frekanstaki dielektrik sabitinin sanal kısmı ϵ'' değerinin daha yüksek frekanstaki ϵ'' değerini geçtiği bir kesişim noktası göze çarpmaktadır. Bu kesişim noktasında yaklaşık olarak 0.3 'lük bir değer alan ϵ'' bu noktada frekanstan bağımsızdır. Denklem (3)'den görüldüğü gibi, ϵ'' niceliği, kondüktansla doğru orantılı olduğundan, genel olarak, verilen bir ileri beslem veya ters beslem voltajında, hem kondüktans hem de ϵ'' değeri artan frekansla artmalıdır. Fakat, ters beslem kısmında belli bir voltajda artan frekansla ϵ'' değeri artarken, ileri beslem kısmında belli bir voltajda artan frekansla, ϵ'' değeri azalmaktadır. Aynı olay, Şekil 1'de yer alan kondüktans karakteristikleri için de gözlenmektedir. Yukarıda ifade edildiği gibi, sanal kısım, ϵ'' , uygulanan elektrik alandan dolayı malzemede ne kadar enerjinin kaybolduğunun bir ölçüsüdür. Sanal kısmın ϵ'' değerinin veya enerji kaybının düşük olması, malzemenin iyi bir dielektrik malzeme olduğunu söyler. (Güçlü ve ark., 2016; Coskun ve ark., 2018; Polat ve ark., 2018; Kumar ve

ark., 2016; Cetinkaya ve ark., 2015). O halde, malzememiz, ters beslem durumunda azalan frekansla ve ileri beslem durumunda artan frekansla iyi bir dielektrik malzeme davranışı gösteriyor diyebiliriz. Bu tür bir olay, daha yüksek frekanslarda, uygulanan *ac* frekansına cevap veren arayüz yük yakalama durumlarının sayısının düşük olması nedeniyle kaybın daha küçük olduğu anlayışını verir.



Şekil 4. Uygulanan elektriksel potansiyel farkına bağlı farklı frekanslardaki Loss tanjant grafikleri

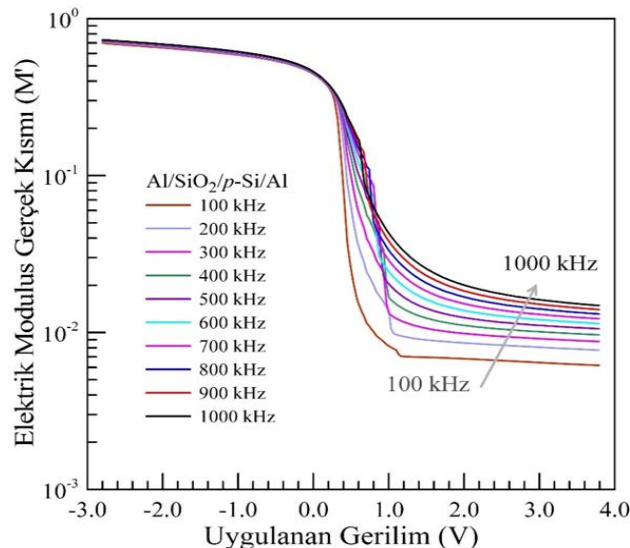
ac elektrik iletkenliği (σ_{ac})

$$\sigma_{ac} = \omega C \tan \delta \left(\frac{d}{A} \right) = \epsilon'' \omega \epsilon_0 \quad (5)$$

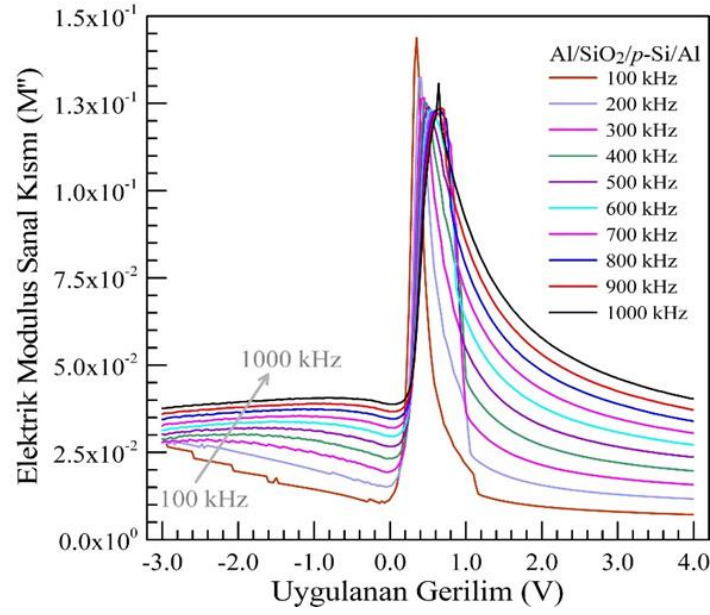
olarak verilebilir. Dielektrik özelliklerin hesaplanmasında yoğunluklu olarak tercih edildiği üzere, bu çalışmada da dielektrik özelliklerinin hesaplanmasında elektrik modulus ifadesi kullanılacaktır. Kompleks impedans veya kompleks dielektrik sabiti ($\epsilon^* = 1/M^*$) değeri aşağıdaki eşitlik modulus formalizmine dönüştürülebilir (Çetinkaya ve ark., 2017; Polat ve ark., 2019.)

$$M^* = i\omega C_0 Z^* \quad (6)$$

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



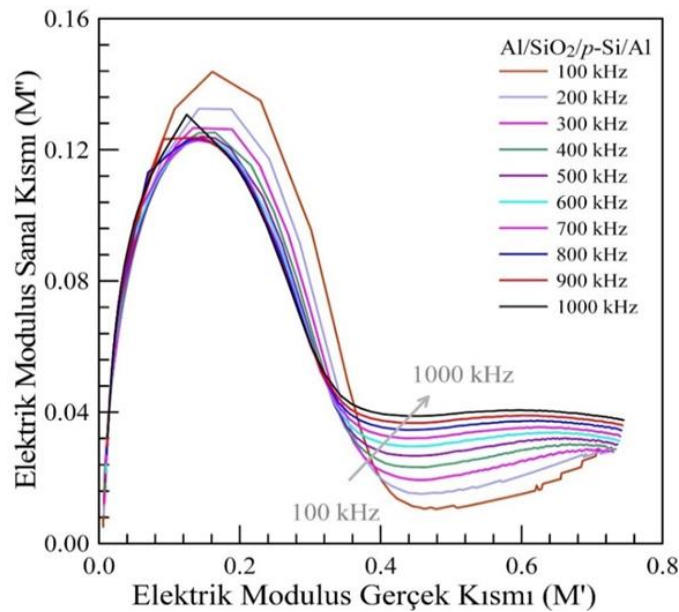
Şekil 5. Gerilime bağlı, 300K ve farklı frekanslarda elektriksel modulusun reel kısmının grafiği



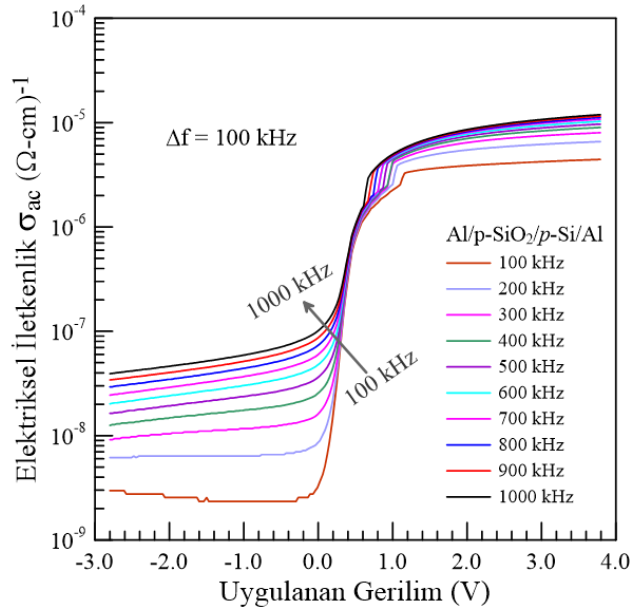
Şekil 6. Gerilime bağlı, 300K ve farklı frekanslarda elektriksel modülüs sanal kısmının grafiği

Reel kısım M' , ve imajiner kısım M'' gibi nicelikler ϵ' ve ϵ'' deneysel değerleri kullanılarak hesaplanır. Şekil 5 ve 6'da M' ve M'' parametrelerinin gerilime karşı farklı frekanslardaki grafikleri verilmiştir. Grafiklerden de görülebileceği üzere her iki parametre de gerilim ve frekans değişimlerinden özellikle ters ve ileri beslem bölgelerinde etkilenmektedir. Malzemelerin impedans davranışı, elektrik modülüsleri kullanılarak açıklanabilir.

Şekil 7 farklı frekanslarda M' 'ye karşı çizilen M'' eğrilerini gösterir. Şekil 8, 300 K'lık sıcaklıkta ve farklı frekanslarda ac elektriksel iletkenlik-voltaj grafiğini gösterir. ac öziletkenlik belli bir gerilimde artan frekansla artmıştır (Çetinkaya ve ark., 2017; Polat ve ark., 2019). Ters beslemde, yani 0.0 Volttan sola doğru ve ileri beslemde, yaklaşık 1.0 Volttan sağa doğru her bir frekansta öziletkenlik sabit davranmaktadır. Böylece, bu voltaj aralıklarında diyotun dielektrik sabitinin değişmeden sabit kaldığını ve istenilen bir davranış sergilediği söylenebilir.



Şekil 7. Farklı frekanslarda elektrik modülüs sanal kısmının gerçek kısma karşı grafiği



Şekil 8. 300K ve farklı frekanslarda *ac* elektriksel iletkenlik grafiği

Şekil 8 'den görüldüğü gibi, öziletkenlik 0.0 Volttan yaklaşık 1.0 Volta kadar farklı bir davranış sergilemektedir. Bu voltaj aralığında, her frekansta keskin bir artış yani üstsel (exponansiyel) göstermiştir. Al/SiO₂/p-Si diyodu için, malzemenin polarizasyonunun artan frekansla azaldığı dolayısıyla artan frekansla elektrik iletkenliğinin arttığı gözlenmiştir. Bu durum Al/SiO₂/p-Si MIS diyodun iletkenliğinin, bir atlama modeline (hopping mechanism) sahip olduğunu göstermektedir.

SONUÇ

DeneySEL olarak karakteristiklerini belirlemeye çalıştığımız Al/SiO₂/p-Si/Al MIS yapılar elde edilmiştir. Bu yapı için taban malzeme olarak 1-10 Ω-cm öz direçli p-Si kullanılmıştır. Diyot parametrelerinin elde edilmesi için, yaygın olarak kullanılan denklemler kullanılmıştır. DeneySEL sonuçlara göre, frekans ve potansiyel farkına bağlı olarak kompleks dielektrik sabitinin gerçek ϵ' ve sanal ϵ'' kısımları ve loss tanjant $\tan(\delta)$, parametrelerinin farklı frekanslarda gerilime bağlı grafikleri, Şekil 2, 3 ve 4'te verilmiştir. Bu parametrelerin değerleri, ölçülmüş olan kapasitans ve kondüktans değerleri kullanılarak hesaplanmış ve belli bir voltajda frekansa güçlü bir şekilde bağlı bir ilişki gözlenmiştir. Frekansa bağlı olarak MIS yapının dielektrik sabiti veya dielektrik özelliklerinin değişimi, esas olarak, elektrik dipol kutuplanmasına, arayüzey kutuplanmasına ve arayüzey hallerinin yoğunluk dağılımına bağlıdır. Yapıdaki iletkenlik veya iletim (conduction) ve hopping mekanizması hakkında detaylı bilgi edinmek için, voltaj ve frekans bağımlı admittans ölçümlerine ihtiyaç duyulur. Dielektrik sabitinin azalan frekansla artan bu değerleri, muhtemel bir arayüz polarizasyon mekanizmasının varlığına bağlanabilir, çünkü arayüz durumları *ac* sinyalini düşük frekanslarda izleyebilir ve hem kapasitans hem de dielektrik değerlere katkıda bulunabilir. ϵ' ve sanal ϵ'' 'deki frekansa bağlı bu dağılım Maxwell-Wagner'e ve uzay yük polarizasyonuna bağlanabilir. Şekil 2 'den görüldüğü gibi, dielektrik sabitinin gerçek kısmı, ters beslem durumunda, ileri beslem durumuna zıt olarak frekandan bağımsız bir davranış gösterir. Bu durum, ters beslemde, Al/SiO₂/p-Si MIS yapının kapasitif bir özelliğe sahip olduğunun bir göstergesidir denilebilir (Yıldız ve ark.2011; Dökme ve ark., 2007; Karataş ve ark., 2011; Attındal ve ark., 2012; Afandiyeva ve ark., 2008).

Şekil 5 ve 6 'da, M' ve sanal M'' parametrelerinin gerilime karşı farklı frekanslardaki grafikleri verilmiştir. Grafiklerden de görülebileceği üzere, her iki parametre de yaklaşık 0.0 V ile 1.0 V gerilim

aralığında her bir frekansta gerilime bağlı bir değişim gösterirken, diğer voltaj aralıklarında değişen voltaja rağmen hemen hemen sabit kalmaktadırlar. $M' \sim V$ ve $M'' \sim V$ grafikleri Eşitlik 6 ve 7 kullanılarak hesaplanmıştır. Özellikle 0.0 V ile 1.0 V gerilim aralığında, her bir frekansta, M'' bir pik göstermekte olup bu pik yüksekliği frekans arttıkça sabit kalmaktadır. Ayrıca, bu davranış dielektrik röleksasyon (durulma) mekanizmasının frekansa olan hassasiyetinden ziyade uygulanan öngerilim voltajı ile ilgilidir. M' 'ye karşı M'' eğrilerinde, ters beslem ve arınma bölgesindeki pik değerleri MIS yapıdaki arayüzey tuzakların parçacık yoğunluk dağılımı ve bunların durulma zamanı ile ilgilidir. Öte yandan M' değeri minimum değerinde iken M'' değeri maksimum değerine ulaşmaktadır, bu durum SiO₂ katmanına bağlı olarak oluşan indükleyici davranış ve durulma süreci nedeniyle, $M_{\infty} = 1/\epsilon_{\infty}$ değerinde maksimumuna ulaşır (Yıldız ve ark.2011; Dökme ve ark., 2007; Karataş ve ark., 2011; Altındal ve ark., 2012; Afandiyeva ve ark., 2008).

Malzemelerin empedans davranışı, elektrik modülüsleri kullanılarak çizilen $M' \sim M''$ eğrisi ile açıklanabilir. Şekil 7, farklı frekanslarda $M' \sim M''$ eğrilerini gösterir. Kompleks koordinat düzlemi üzerinde, tüm frekanslar için farklı yarıçaplı bombeli bir yarım daire gözlemlenmiştir. Özellikle düşük frekanslarda, elektrik modülüsünün $M' \sim M''$ diyagramını durulma işlemleri oluşturmaktadır. Arayüzey polarizasyonu, düşük frekansta aşırı hassastır ve mobil şarj taşıyıcıların, bariyerlerin taşınmasını sağlayan fiziksel bir bariyer tarafından kesilmesi durumunda oluşur. Ayrıca, grafikte gözlenen yarım daire biçimler, tane sınırlarının dirençliliğine karşılık gelmektedir. Özellikle düşük frekanslarda gözlenen yarım daire biçimleri, baskın yarıiletken ve arayüzey tabakasının etkilerinden ziyade arayüzey hallerinin ve yüklerinin katkısına karşılık gelir.

KAYNAKÇA

- Afandiyeva I. M, Dokme I, Altındal S, Bulbul M. M, Tataroğlu A, (2008). Frequency and voltage effects on the dielectric properties and electrical conductivity of Al-TiW-Pd2Si/n-Si structures, *Microelect. Engineer.* 85: 247-252.
- Akın Ü, Yüksel Ö, 2018. Frequency and voltage dependence of electrical modulus and dielectric studies of spin coated perylene-diimide (PDI) organic semiconductor films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(17): 15183-15190.
- Altındal Ş, Karadeniz S, Tuğluoğlu N, Tataroğlu A, 2003. The role of interface states and series resistance on the I-V and C-V characteristics in Al/SnO₂/p-Si Schottky diodes. *Solid-State Electronics*, 47(10): 1847-1854.
- Altındal Ş, Asar Y. Ş, Kaya A, Sönmez Z, 2012. Investigation of interface states in Al/SiO₂/p-Si (MIS) structures with 50 and 826 Å SiO₂ interfacial layer using admittance spectroscopy method. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*.14(1): 998-1004.
- Aydin M, Akkiliç K, Kiliçoğlu T, 2004. The importance of the neutral region resistance for the calculation of the interface state in Pb/p-Si Schottky contacts. *Physica B: Condensed Matter*, 352(1-4): 312-317.
- Badali Y, Altındal Ş, Uslu İ, 2018. Dielectric properties, electrical modulus and current transport mechanisms of Au/ZnO/n-Si structures. *Progress in Natural Science: Materials International*, 28(3): 325-331.
- Caglar Y, Caglar M, Ilıcan S, Yakuphanoglu F, 2009. Determination of the electronic parameters of nanostructure SnO₂/p-Si diode. *Microelectronic Engineering*, 86(10): 2072-2077.
- Card H, Rhoderick E, 1971. Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4(10): 319.
- Çetinkaya H, Yıldırım M, Durmuş P, Altındal, Ş, 2017. Correlation between barrier height and ideality factor in identically prepared diodes of Al/Bi₄Ti₃O₁₂/p-Si (MFS) structure with barrier inhomogeneity. *Journal of Alloys and Compounds*, 721: 750-756.

- Cetinkaya A. O, Kaya S, Aktag A, Erhan B, Ercan Yılmaz, 2015. Structural and electrical characterizations of BiFeO₃ capacitors deposited by sol-gel dip coating technique. *Thin Solid Films*, 590: 7–12.
- Cowley AM, Sze SM, 1965. Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems, *J. Appl. Phys.*, 36: 3212.
- Coskun M, Polat O, Coskun FM, Durmus Z, Caglar M, Turut A, 2018. The electrical modulus and other dielectric properties by the impedance spectroscopy of LaCrO₃ and LaCr_{0.90}Ir_{0.10}O₃ perovskites, *RSC Adv.*, 2018: 8, 4634–4648
- Güçlü Ç, Özdemir A, Kökce A, Altındal Ş, 2016. Frequency and Voltage-Dependent Dielectric Properties and AC Electrical Conductivity of (Au/Ti)/Al /n-GaAs with Thin Al₂O₃ Interfacial Layer at Room Temperature. *Acta Physica Polonica A*, 130(1): 325-330.
- Dökme İ, Altındal Ş, 2007. On the profile of frequency and voltage dependent interface states and series resistance in MIS structures. *Physica B*, 393: 328–335.
- Karabulut A, Efeoglu H, Turut A, 2017. Influence of Al₂O₃ barrier on the interfacial electronic structure of Au/Ti/n-GaAs structures. *Journal of Semiconductors*, 38(5): 054003.
- Karatas Ş, Kara Z, (2011). Temperature dependent electrical and dielectric properties of Sn/p-Si metal semiconductor (MS) structures, *Microelectron. Reliability*, 51: 2205–2209.
- Kocuyigit A, Orak İ, Turut A, 2018. Temperature dependent dielectric properties of Au/ZnO/n-Si Heterojunction. *Mater. Res. Express*, 5: 035906
- Kumar V, Kaminski A. S, Akhtar J, 2016. Capacitance roll-off and frequency dispersion capacitance – conductance phenomena in field plate and guard ring edge-terminated Ni/SiO₂/4H-nSiC Schottky barrier diodes. *Phys. Status Solidi A*, 213(1) 193–202.
- Mönch W, 2001. *Semiconductor Surfaces and Interfaces*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 553 p.
- Murarka S, Eizenberg M, Sinha A, 2003. *Interlayer dielectrics for semiconductor technologies*, 459 p.
- Nicollian E, Brews J, 1982. *MOS (metal oxide semiconductor) physics and technology*. Wiley, 917 p.
- Nicollian E, Goetzberger A, 1967. The Si-SiO₂ Interface - Electrical Properties as Determined by the Metal-Insulator-Silicon Conductance Technique. *Bell System Technical Journal*, 46(6): 1055-1133.
- Polat O, Coskun M, Coskun F, Zengin Kurt B, Durmus Z, Caglar Y, Turut A, 2019. Electrical characterization of Ir doped rare-earth orthoferrite YbFeO₃. *Journal of Alloys and Compounds*, 787: 1212-1224.
- Polat O, Coskun M, Coskun FM, Durmus Z, Caglar M, Turut A, 2018. Os doped YMnO₃ multiferroic: A study investigating the electrical properties through tuning the doping level, *J. Alloys Compd.* 752: 274-288.
- Şafak Asar Y, Asar T, Altındal Ş, Özçelik S, 2015. Dielectric spectroscopy studies and ac electrical conductivity on (AuZn)/TiO₂/p-GaAs(110) MIS structures. *Philosophical Magazine*, 95(26): 2885-2898.
- Schottky W, 1926. On the Origin of the Super-Heterodyne Method. *Proceedings of the IRE*, 14(5): 695-698.
- Turut A, Karabulut A, Ejderha K, Bıyıklı N, 2015. Capacitance–conductance characteristics of Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs structures with very thin Al₂O₃ interfacial layer. *Mater. Res. Express*, 2: 046301.
- Yıldız D. E, Dökme İ, (2011). Frequency and gate voltage effects on the dielectric properties and electrical conductivity of Al/SiO₂/p-Si metal-insulator-semiconductor Schottky diodes. *J. Appl. Phys.* 110: 014507.