


## Au/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/p-GaAs (MIS) Yapısının Frekansa Bağlı Dielektrik Parametrelerinin Analizi

Raziye Ertuğrul Uyar \* 

Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 06500, Ankara, Türkiye

### Öne Çıkanlar

- Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılar günümüzde pekçok elektronik devre elemanları teknolojisi uygulamalarında sıkça karşılaşılan yapılardan biridir.
- MIS yapının dielektrik özellikleri, admittans spektroskopisi yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir.
- MIS yapının dielektrik parametrelerinin frekansa bağlılığı incelenmiş olup, ilgili parametrelerin frekansa oldukça duyarlı olduğu gözlenmiştir

### Makale Bilgileri

Geliş: 12/05/2024

Kabul: 04/08/2024

### Anahtar Kelimeler

Silisyum Nitrat (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>),  
MIS Yapı,  
Dielektrik Özellikleri,  
İletkenlik,  
Elektrik Modülüsü

### Öz

Bu çalışma, Au/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/p-GaAs (MIS) yapısının dielektrik özelliklerinin frekansa bağlılığını incelemeyi amaçlamaktadır. Deneysel C-V-f ve G/ω-V-f ölçümleri 10 kHz ila 1 MHz frekans aralığında ve 300 K'de yapılmıştır. Bu ölçümlerden MIS yapısının dielektrik sabiti (ε'), dielektrik kayıp (ε''), dielektrik kayıp tanjantı (tanδ), ac elektriksel iletkenlik (σac), elektrik modülüsü (M\*) ve empedans (Z\*) gibi parametreler hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçlarından elde edilen C ve G/ω değerlerinin frekans arttıkça azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca, hesaplanan ε' ve ε'' değerlerinin frekansın artmasıyla birlikte azaldığı belirlenmiştir. Ac iletkenliğinin frekansın artmasıyla birlikte yaklaşık 100 kHz'e kadar yavaşça arttığı, ancak bu değerden sonra hızla arttığı gözlenmiştir. Elektrik modülüsünün reel kısmı (M') değerlerinin, yaklaşık 30 kHz'e kadar frekans artışıyla arttığı, ancak bu noktadan sonra azaldığı, elektrik modülüsünün sanal kısmı (M'') değerlerinin ise yaklaşık 30 kHz'e kadar azaldığı ancak sonra arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, kompleks empedansın reel (Z') ve sanal (Z'') kısımlarının frekans artışıyla birlikte azaldığı gözlenmiştir. Sonuç olarak, MIS yapının dielektrik karakteristiklerinin frekansa oldukça duyarlı olduğu gözlenmiştir.

## Analysis of Frequency Dependent Dielectric Parameters of Au/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/p-GaAs (MIS) Device

### Highlights

- Metal-insulator-semiconductor (MIS) structures are one of the most frequently encountered components in many electronic circuit element technology applications today.
- The dielectric features of the MIS device were evaluated using the admittance spectroscopy method.
- Dielectric parameters of the MIS device were examined for frequency dependence, revealing their high sensitivity to varying frequencies.

### Article Info

Received: 12/05/2024

Accepted: 04/08/2024

### Keywords

Silicon nitride (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>),  
MIS structure,  
Dielectric properties,  
Conductivity,  
Electrical Modulus

### Abstract

This study aims to investigate the frequency dependency of the dielectric features of the Au/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/p-GaAs (MIS) device. Experimental C-V-f and G/ω-V-f measurements made in the frequency range from 10 kHz to 1 MHz and at 300 K. Dielectric parameters including dielectric constant (ε'), dielectric loss (ε''), loss angle tangent (tanδ), electrical conductivity (σac), electrical modulus (M\*), and impedance (Z\*) were derived from these measurements. Measured C and G/ω values decrease with rising frequency. Also, calculated ε' and ε'' values decrease with frequency. It was found that the ac conductivity increased slowly with rising frequency up to about 100 kHz, but then increased rapidly. The values of the real part of the electric modulus (M') were found to increase with rising frequency up to about 30 kHz but decreased after this point, while the values of the imaginary part of the electric modulus (M'') decreased up to about 30 kHz and then increased. However, it was observed that the real (Z') and imaginary (Z'') parts of the complex impedance decreased with rising frequency. Resulting in, it is seen that the dielectric features of the MIS device exhibit high frequency sensitivity.



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

\* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Raziye Ertuğrul Uyar, raziyeertugrul@hotmail.com



## 1. GİRİŞ

Arayüzey yalıtkan tabakasının dielektriksel davranışından dolayı metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılar, temelde bir paralel plakalı bir kapasitördür. Bu yapılar, yarıiletken bir alt tabaka ile bir metal plaka arasında biriktirilen bir dielektrik film tabakasından meydana gelir. MIS yapılarının işleyişi, yarıiletken malzemenin yüzeyinde oluşturulan bir yük taşıyıcı yoğunluğuyla ilişkilidir. Bu yapılar, metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapılarına benzemekle birlikte, oksit tabakası yerine ince yalıtkan bir tabaka kullanır. Bu yapılar, transistörler, kapasitörler ve diğer entegre devre bileşenlerinin üretiminde önemli bir rol oynarlar. Özellikle mikroelektronik endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ince film teknolojileriyle üretilen bu yapılar, yüksek performanslı ve düşük güç tüketimli cihazların geliştirilmesine olanak tanır [1-3].

MIS/MOS yapılarının elektrik ve dielektrik özelliklerini, oksit ve oksit-yarıiletken arayüzeylerinin nitelikleri belirlemektedir. Gerçek MIS yapısında, ideal bir MIS yapısından farklı olarak, yarıiletken-oksit arayüzeyinde çeşitli örgü kusuru, tuzaklar, saf olmayan bileşenler ile birlikte arayüzey durumları bulunur. Bir yarıiletkenin kristal yapısında yer alan yabancı bir atom veya bozunma, yarıiletken-oksit arayüzeyinde diğer bir ifadeyle yasak bant aralığında birçok izinli enerji seviyesinin oluşmasına sebep olur [3-5]. Seri direnç ( $R_s$ ) ve arayüzey durumları ( $N_{ss}$ ) yarıiletken cihazların elektriksel özelliklerini, dielektrik özelliklerini ve verim gücünü etkileyen kritik faktörlerdir.  $N_{ss}$  çoğunlukla yüzey yapısı, örgü kusurları, yüzey hazırlığı ve yarıiletken içerisindeki safsızlıklardan kaynaklanmakta iken,  $R_s$  ise ohmik ve arka kontakların, bağlantı kablolarının ve yarıiletkenin yığın (bulk) direncinden ileri gelmektedir [5-7].

Dielektrikler, yani elektriksel olarak yalıtkan malzemeler, atomik yapılarında serbest yük içermeyen malzemelerdir. Aynı zamanda bu malzemeler, harici bir elektrik alanı uygulandığında enerji kazanırlar. Ayrıca, dielektrik malzemelerde serbest elektronlar bulunmaz, bu da çok yüksek bir direnç ve 4 eV'nin üzerinde yasak enerji aralıkları oluşmasına neden olur [8]. Bu malzemeler aynı zamanda, elektrik devrelerinde yük transferini önlemek için izolatör olarak kapasitörlerin yapımında kullanılırlar. Alternatif bir elektrik alanının uygulanması, dielektrik malzeme içindeki pozitif ve negatif yüklerin zıt yönlerde hareket etmesine neden olur, bu da sonsuz küçük yer değiştirmelere yol açar. Bu hareketlenme elektrik yük merkezlerinde elektriksel polarizasyona ve bunun sonucunda elektrik dipol momentlerinin oluşmasına sebep olur. Tüm dielektrik malzemeler, bir elektrik alanına maruz kaldıklarında polarizasyon özelliği gösterirler. Bu özellik, dielektrik malzemelerin özellikle kapasitör yapımında kullanışlı hâle getirir. Elektrik dipollerinin alanla etkileşimi, dielektrik malzemeye elektrik enerjisi depolama kabiliyeti kazandırır. Ayrıca, bu malzemeler yalıtkan görevi görerek elektrik devrelerinde yük transferini önler [9,10].

MIS yapıların dielektrik özellikleri, admitans spektroskopisi yöntemi kullanılarak değerlendirilebilir. ac frekansı, sıcaklık, yalıtkan/oksit tabakasının oluşumu ve kalınlığı gibi faktörler, bu cihazların dielektrik özelliklerinde ve dolayısıyla elektronik devrelerin tasarımı ve performansı üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Dielektrikler, elektrik yalıtımı sağlayarak devrelerde enerji depolama ve iletimi kontrol ederler. Bu nedenle, cihazların dielektrik özelliklerinin doğru şekilde anlaşılması ve yönetilmesi, istikrarlı ve etkili bir elektronik sistem oluşturmak için kritik öneme sahiptir. MIS yapısının dielektrik karakteristikleri, dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ ), dielektrik kayıp ( $\epsilon''$ ), dielektrik kayıp tanjantı ( $\tan\delta$ ), elektriksel iletkenlik ( $\sigma$ ), elektrik modülü ( $M$ ) ve empedans ( $Z$ ) parametrelerini kapsamaktadır [9,10].

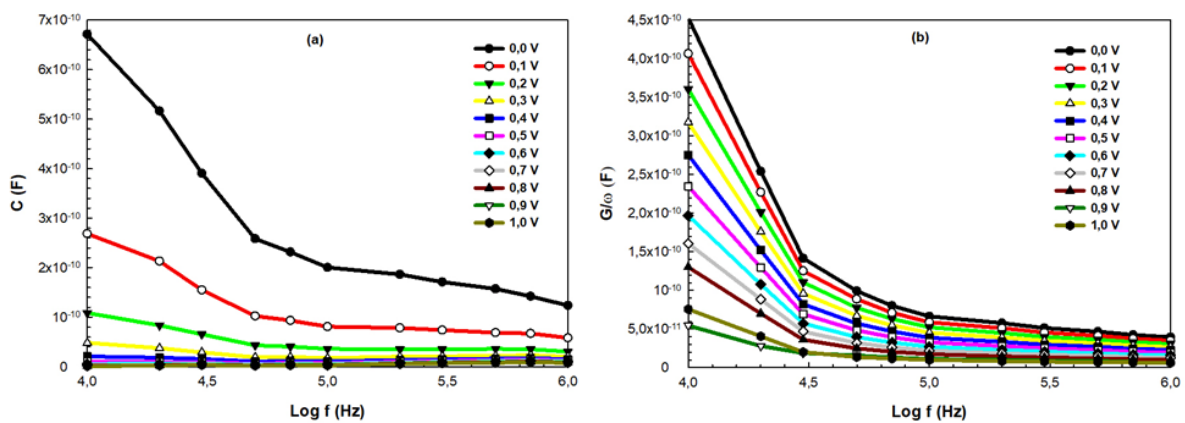
Bu çalışmada, Au/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/p-GaAs (MIS) yapısının 300 K sıcaklığında ve 10 kHz ile 1 MHz frekans aralığında frekansa bağlı dielektrik özellikleri incelenmiştir. MIS yapısının dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ ), dielektrik kayıp ( $\epsilon''$ ), kayıp tanjantı ( $\tan\delta$ ), elektriksel iletkenlik ( $\sigma$ ), elektrik modülü ( $M$ ) ve empedansın ( $Z$ ) reel ve sanal kısımları ( $Z'$  ve  $Z''$ ) değerleri, geniş bir frekans ve voltaj aralığında deneysel C-V-f ve G/ $\omega$ -V-f ölçüm sonuçlarından elde edilen değerler kullanılarak belirlenmiştir. Bu çalışma, MIS yapısının dielektrik özelliklerinin frekans ve voltaj bağımlılığını daha ayrıntılı bir şekilde inceleyerek, elde edilen verilerin deneysel olarak doğrulanmasını ve analiz edilmesini sağlamaktadır. Bu sonuçlar, bu tür yapıların elektriksel performansını iyileştirmek ve ilgili uygulamalarda kullanımını artırmak için önemli bir temel oluşturabilir.

## 1. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu araştırma çalışmasında, Au/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/p-GaAs (MIS) yapısının fabrikasyonunda yarıiletken alttaş olarak, 10<sup>17-18</sup> cm<sup>-3</sup> taşıyıcı konsantrasyonuna sahip, 500 µm kalınlığında ve (100) yüzey yönelimli çinko (Zn) katkılı p-tipi galyum arsenit (GaAs) kullanılmıştır. p-GaAs alttaş, biriktirme işleminden önce amonyum peroksit içinde kimyasal olarak temizlenmiştir. Yarıiletken kristal yapının yüzeyindeki organik ve ağır metal kirler, 5H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O asidik çözeltisinde bir dakika yıkanması ve ardından H<sub>2</sub>O:HCl çözeltisinde aşındırılmasıyla ortadan kaldırılmıştır. Bu ön işlemler, yapının kalitesini artırmak ve yüzeydeki istenmeyen pürüzleri ortadan kaldırmak için yapılmıştır. Yarıiletken kristal yapı 18 MΩ cm saf su ile yıkandıktan sonra saf nitrojen ile kuru temizlemeye tabi tutulmuştur. Temizleme ve aşındırma işlemlerinin ardından, yüksek saflıkta Au metali kullanılarak omik kontak oluşturulmuştur. 3×10<sup>-6</sup> Torr vakum altında 375 °C'de Au'nun termal buharlaştırılması yoluyla p-GaAs yarıiletken yapının üzerinde 2000 Å kalınlığında Au ile kaplandı. Ardından, yarıiletken yapı 475 °C'de nitrojen atmosferinde bir tavlama işleminden geçirilmiştir. Omik kontak hazırlığının ardından, yapı bir radyo frekansı (RF) Magnetron Püskürtme sisteminde 400 °C'ye ısıtılmıştır. Daha sonra, p-GaAs alttaş silisyum nitrat (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) film biriktirme için püskürtme odasına taşınmıştır. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ince filmi, her ikisi de kütle akış kontrolörleri tarafından düzenlenen belirli bir Ar/O<sub>2</sub> reaktif gaz karışımı ile birlikte biriktirme için kullanılmıştır. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ince filmin biriktirilmesi, 200 °C sıcaklıkta ve vakum basıncı 3×10<sup>-6</sup> mbar'da tutularak gerçekleştirilmiştir. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kaplamasını takiben, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/p-GaAs üzerine Au'nun termal olarak buharlaştırılmasıyla 2000 Å'luk bir doğrultucu kontak oluşturularak Au/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/p-GaAs (MIS) yapısının fabrikasyonu tamamlanmıştır. Üretilen MIS yapısını, 300 K sıcaklığında geniş bir frekans aralığını kapsayacak şekilde kapasitans (C) ve iletkenlik (G) ölçümleri için HP 4192A LF empedans analizörü kullanılmıştır.

## 3. BULGULAR

Hazırlanan Au/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/p-GaAs (MIS) yapısının admitans (Y= G+iωC) ölçümleri oda sıcaklığında geniş bir voltaj aralığında frekansa bağlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekil 1.a ve b, oda sıcaklığında farklı ön gerilimler altında C ve G/ω ölçümlerinin frekansla nasıl değiştiğini göstermektedir. Bu grafikler, farklı ön gerilim seviyelerinin dielektrik özellikler üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir. Şekil 1.a ve b'de görüldüğü gibi, frekans arttıkça C ve G/ω değerleri azalmaktadır. Bu davranış, orta ve düşük frekans değerlerinde arayüzey durumlarının (N<sub>ss</sub>) tükenim ve tersinim bölgelerinde etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca, seri direnç (R<sub>s</sub>) sadece yüksek frekans değerlerinde yani yığılım bölgesinde etkilidir [11-13].



Şekil 1. MIS yapısının oda sıcaklığında farklı uygulanan ön gerilimler için a. C-Log f, b. G/ω-Log f grafikleri

Dielektrik özellikler kompleks dielektrik sabiti ( $\epsilon^*$ ) formülasyonu kullanılarak tanımlanabilir. Admittans ölçümleri söz konusu olduğunda,  $\epsilon^*$  aşağıdaki gibi ifade edilir

$$\varepsilon^* = \frac{Y^*}{i\omega C_o} = \frac{C}{C_o} - i \frac{G}{\omega C_o}. \quad (1)$$

Eşitlik 1’de  $C_o$  ( $=\varepsilon_o A_{ox}/d_{ox}$ ) plakaları arası boş kapasitörün kapasitansını ve  $\omega$  açısal frekansı temsil etmektedir.  $C_o$  değeri,  $\varepsilon_o=8,85 \times 10^{-14}$  F/cm,  $A_{ox}=7,85 \times 10^{-3}$  cm<sup>2</sup> ve profilometre ile ölçülen arayüzey tabaka kalınlığı ( $d_{ox}=6$  nm) kullanılarak  $1,16 \times 10^{-9}$  F olarak hesaplanmıştır. Kompleks dielektrik sabiti tanımlamak için aşağıdaki formül kullanılmaktadır

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (2)$$

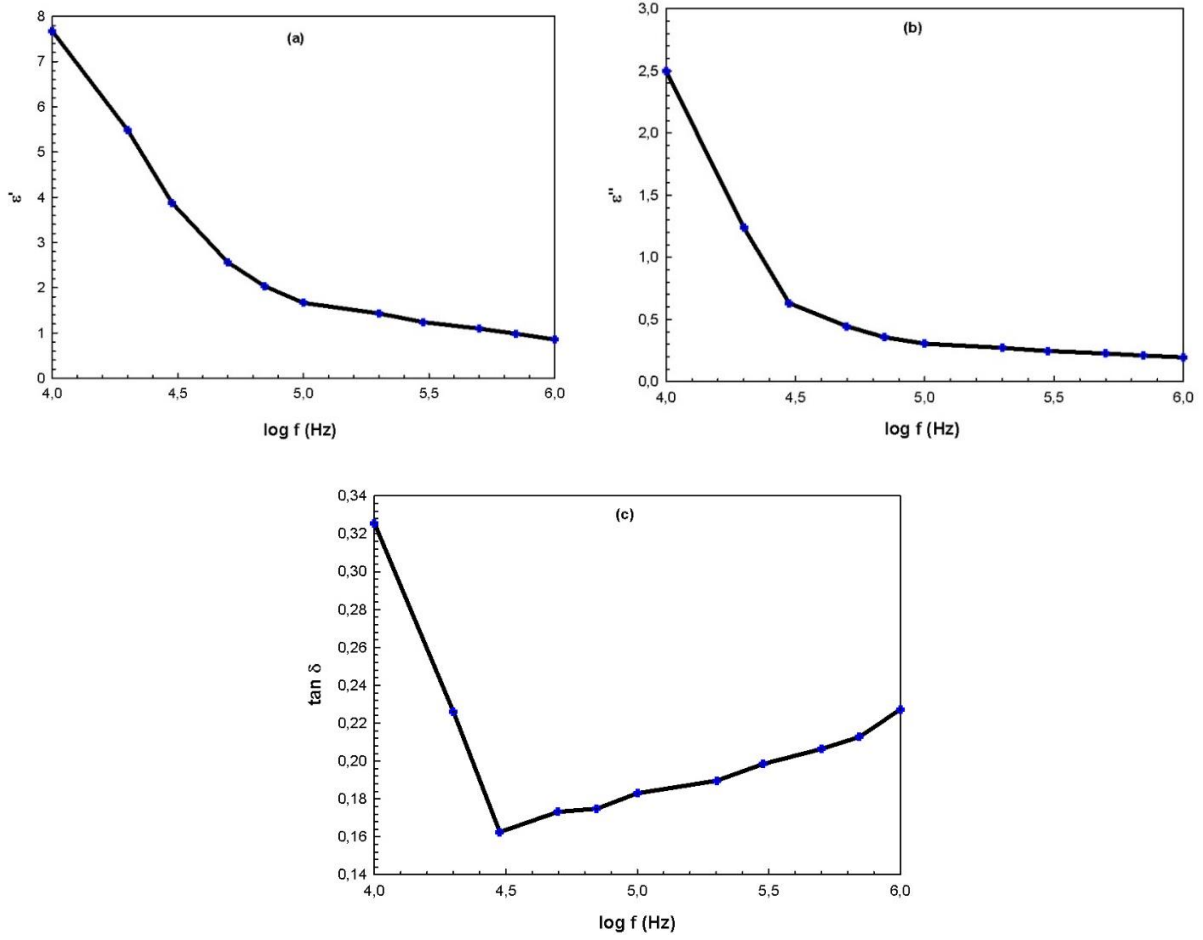
Burada  $\varepsilon'$  ve  $\varepsilon''$  dielektrik malzemelerdeki sırasıyla kompleks dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımlarını temsil eder. Bununla birlikte,  $\varepsilon'$  ‘ne dielektrik sabiti ve  $\varepsilon''$  ‘ne de dielektrik kayıp adları da kullanılır. Bu terimler, dielektrik malzemelerin dielektriksel davranışını karakterize etmek için kullanılır ve dielektrik özelliklerinin incelenmesinde önemli bir rol oynarlar.  $\varepsilon'$ ,  $\varepsilon''$  ve  $\tan\delta$  değerleri, aşağıdaki eşitliklerden elde edilir [8-10]

$$\varepsilon' = \frac{C_m}{C_o} \quad (3a)$$

$$\varepsilon'' = \frac{G_m}{\omega C_o} \quad (3b)$$

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (3c)$$

MIS yapının elde edilen dielektrik sabiti ( $\varepsilon'$ ), dielektrik kayıp ( $\varepsilon''$ ) ve kayıp tanjantı ( $\tan\delta$ ) değerlerinin 300 K sıcaklığında frekansa bağımlı değişim grafikleri Şekil 2.a, b ve c 'de sunulmuştur. Şekil 2.a ve b 'de gösterildiği üzere  $\varepsilon'$  ve  $\varepsilon''$  değeri artan frekans ile birlikte azalmaktadır.  $\varepsilon'$  ve  $\varepsilon''$  parametrelerinin frekans bağımlılığı literatürde rapor edilen sonuçlarla uyumludur [9-15]. Düşük frekans değerlerinde  $\varepsilon'$  ve  $\varepsilon''$  değerlerinin yüksek değer olması, numunedeki uzay yüklerinin görüntü yüklerini etkilemesinden kaynaklanan uzay yük veya arayüzey polarizasyon mekanizmasına atfedilmektedir [9-15]. Bununla birlikte, bir elektron alternatif bir alanın etkisi altında iki merkez arasında sıçramaya uğrar ve bu değişim de elektrik dipolünün tekrar yönlendirilmesine sebebiyet verir. Bu süreç, dielektrik sabitinde bir değişikliğe yol açar. Elektronun bu hareketi, dielektrik malzemenin iç yapısındaki polarizasyonun ve dolayısıyla dielektrik sabitinin frekansa bağlı değişimine katkıda bulunur. Bundan dolayı, dielektrik sabitinin azalan frekans değerleriyle birlikte artması, dipollerin etkisine bağlanabilir. Yüksek frekans değerlerinde, elektrik dipolü alternatif alanın hızına ayak uyduramaz ve sonuç olarak hem dielektrik sabiti ( $\varepsilon'$ ) hem de dielektrik kayıp ( $\varepsilon''$ ) sabit bir değere doğru ilerler. Bu durum, dielektrik malzemenin davranışının frekansa bağlı olarak değiştiğini gösterir. Şekil 2.c 'de gösterildiği gibi, kayıp tanjantı ( $\tan\delta$ ), frekansın artmasıyla başlangıçta yaklaşık 30 kHz'e kadar azalmakta, daha sonra artmaya başlamaktadır. Bu süreç, arayüzey polarizasyonun düşük frekanslarda baskın olduğunu ve yüksek frekanslarda ise diğer polarizasyon mekanizmalarının etkili olduğunu göstermektedir [9-13].



**Şekil 2.** MIS yapısının oda sıcaklığında frekansa bağımlı **a.**  $\epsilon'$ -log f, **b.**  $\epsilon''$ -log f, ve **c.**  $\tan \delta$ -log f grafikleri

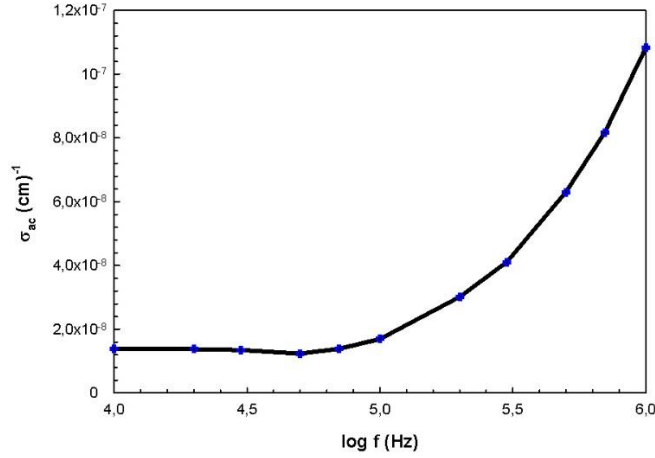
Dielektrik bir malzemeye alternatif bir voltaj uygulanırsa kompleks elektrik iletkenliği aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$$\sigma^* = i\epsilon_0\omega\epsilon^* = i\epsilon_0\omega(\epsilon' - i\epsilon'') = \epsilon_0\omega\epsilon'' + i\epsilon_0\omega\epsilon' \quad (4)$$

Eşitlik 4'e göre, dielektrik malzemenin ac elektrik iletkenliği aşağıdaki eşitlikle verilir.

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

Eşitlik 5 kullanılarak hesaplanan ac iletkenliğinin frekansa bağımlı değişimini gösteren grafik Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3'te gösterildiği gibi, ac iletkenliği yaklaşık 100 kHz'e kadar olan frekans artışıyla yavaşça arttığı, ancak bu noktadan sonra hızlı bir şekilde artmaya başladığı gözlemlenmiştir. İletkenliğin bu frekansa bağımlılığı, yük taşıyıcılarının hareketinden meydana gelen durulma olayına atfedilebilir. Bu durum, yük taşıyıcılarının frekansın artmasıyla daha hızlı bir şekilde hareket ettiğini ve dolayısıyla malzemenin iletkenliğinin de arttığını göstermektedir [9-11]. Ayrıca, hareketli iyonların yoğunluğunun artması nedeniyle frekans arttıkça iletkenlik artar.



Şekil 3. MIS yapısının oda sıcaklığında frekansa bağımlı  $\sigma_{ac}$ -logf grafiği

Frekansın düşük değerlerinde dielektrik sabitinin yüksek olduğu ve polarizasyon etkilerinin göz ardı edilebilir olduğu durumlarda, dielektrik durulmayı incelemek için elektrik modülüsünün ( $M$ ) tanımı kullanılır. Elektrik modülüs ayrıca, elektrik yer değiştirmesi sabit kaldığında malzemedeki elektrik alanının durulmasına karşılık gelir. Bu nedenle, dielektrik durulmayı analiz etmek için  $M$  'nin değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Kompleks elektrik modülüs ( $M^*$ ), kompleks dielektrik geçirgenlik ( $\epsilon^*$ ) cinsinden aşağıda verilen eşitlik ile ifade edilir [16,17]

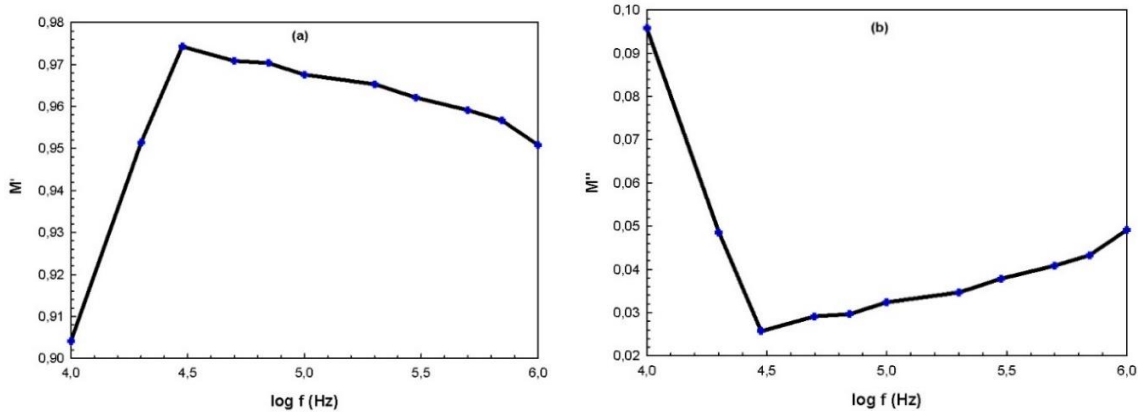
$$M^* = \frac{1}{\epsilon^*} = M' + iM'' \quad (6)$$

Eşitlik 6'daki  $M'$  kompleks elektrik modülüsün reel ve  $M''$  kompleks elektrik modülüsün sanal kısımlarını göstermektedir. Elektrik modülüsün reel ve sanal kısımlar aşağıda verilen eşitliklerle belirlenir

$$M' = \frac{\epsilon'}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} \quad (7a)$$

$$M'' = \frac{\epsilon''}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} \quad (7b)$$

Eşitlik 7a ve 7b kullanılarak elde edilen  $M'$  ve  $M''$  değerlerinin frekansa bağımlı değişim grafikleri Şekil 4.a ve b'de gösterilmiştir. Şekil 4.a 'da gösterildiği gibi,  $M'$  değerleri yaklaşık 30 kHz'e kadar frekansın artmasıyla artarken, bu değerden sonra ise azalmaktadır. Şekil 4.b 'de görüldüğü gibi  $M''$  değerleri ise yaklaşık 30 kHz'e kadar azalırken, bu değerden sonra ise artmaktadır.

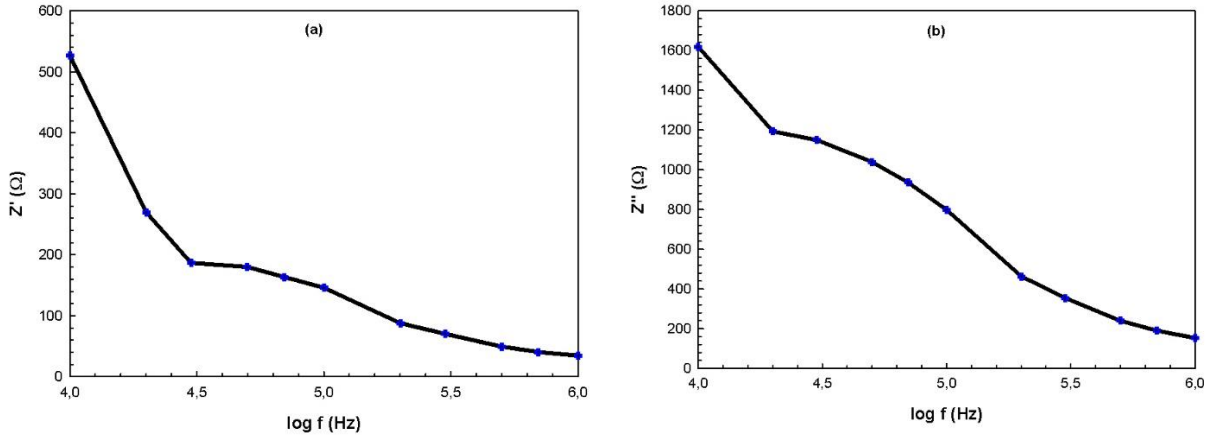


Şekil 4. Kompleks modülüsün reel ve sanal kısımlarının frekansa bağımlı a)  $M'$ -log f b)  $M''$ -log f grafiği

Kompleks empedans spektrometrisi, malzemenin dielektrik davranışlarını detaylı bir şekilde incelemek amacıyla kullanılan bir tekniktir. Bu teknik, malzemenin frekansa bağlı olarak değişen dielektrik özelliklerini analiz etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompleks empedans ( $Z^*$ ) aşağıda verilen eşitlikle tanımlanır [11]

$$Z^* = Z' - jZ'' = \frac{1}{i\omega C_0 \epsilon^*} \quad (8)$$

Burada  $Z'$  kompleks empedansın reel ve  $Z''$  kompleks empedansın sanal kısımlarıdır.  $Z'$  ve  $Z''$  değerlerinin frekansa bağlı değişimleri Şekil 5.a ve b 'de verilmektedir. Şekil 5.a ve b'de görülebileceği üzere,  $Z'$  ve  $Z''$  değerleri frekans değeri artışı ile birlikte düşüş eğilimi göstermektedir. Bu durum yüksek frekanslarda elektron sıçramalarının artış göstermesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca düşük frekanslarda,  $Z'$  ve  $Z''$  değerlerinin yüksek olmasının nedenlerinden biri uzay yük kutuplanmasıdır [11].



Şekil 5. Kompleks empedansın reel ve sanal kısımlarının frekansa bağımlı a)  $Z'$ -log f b)  $Z''$ -log f grafiği

#### 4. TARTIŞMA

Bu çalışma, Au/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/p-GaAs (MIS) yapısının dielektrik özelliklerinin frekansa bağlılığını analiz etmek amacıyla yapılmıştır. Yapılan deneysel C-V-f ve G/ω-V-f ölçümleri 300 K'de ve 10 kHz ile 1 MHz arasındaki bir frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler sonucunda, MIS yapısının, dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ ), dielektrik kayıp ( $\epsilon''$ ), kayıp tanjantı ( $\tan\delta$ ), ac elektriksel iletkenlik ( $\sigma_{ac}$ ), elektrik modülüs (M) ve empedans (Z) gibi dielektrik parametreleri hesaplanmıştır. Elde edilen C ve G/ω değerlerinin frekans arttıkça azaldığı gözlenmiştir. Bu davranış, orta ve düşük frekans değerlerinde arayüzey durumlarının tükenim ve tersinim bölgelerinde etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca, elde edilen  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  değerlerinin, frekans artışıyla birlikte azaldığı gözlenmiştir. Bununla beraber, ac iletkenliğin yaklaşık 100 kHz'e kadar frekans arttıkça yavaş yavaş artarken, bu değerden sonra değerinin hızlı bir şekilde arttığı görülmüştür. İletkenlik düşük frekanslarda neredeyse frekanstan bağımsız bir davranış sergiledi. Düşük frekanslarda, yük taşıyıcılarının atlama (hopping) yoluyla rastgele difüzyonu, frekanstan bağımsız bir iletkenliğe yol açar. Ayrıca,  $Z'$  ve sanal  $Z''$  değerleri frekans değeri artışı ile birlikte azalma eğilimi göstermiştir. Bu durum yüksek frekanslarda elektron sıçramalarının artış göstermesinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, MIS yapının dielektrik parametrelerinin frekansa oldukça duyarlı olduğu gözlenmiştir.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI/ÇAKIŞMASI BİLDİRİMİ

Yazarlar arasında çıkar çatışması/çakışması bulunmamaktadır.

#### YAZAR KATKI ORANI

**Raziye Ertuğrul Uyar:** Kavramlaştırma, Metodoloji, Araştırma, Makalenin yazımı-Orijinal taslak, İçerik analizi, Makalenin yazımı- İnceleme ve Düzenleme, Makalelin doğruluğunun kontrolü.

## KAYNAKLAR

- [1] Sze, S.M. (1981). *Physics of Semiconductor Devices: Second edition*. Newyork: Wiley.
- [2] Asar, Y.Ş., Selvili, Ö., and Altındal, Ş. (2023). Investigation of dielectric relaxation and ac conductivity in Au/(carbon nanosheet-PVP composite)/n-Si capacitors using impedance measurements. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34, 893.
- [3] Nicollian E.H., and Goetzberger, A. (1967). The Si-SiO<sub>2</sub> Interface — Electrical Properties as Determined by the Metal-Insulator-Silicon Conductance Technique. *The Bell System Technical Journal*, 46, 1055–1133.
- [4] Güler, G., Güllü, Ö., Karataş, Ş., and Bakkaloğlu, F. (2009). Analysis of the series resistance and interface state densities in metal semiconductor structures. *Journal of Physics: Conference Series*, 153, 012054.
- [5] Ertugrul-Uyar, R., Buyukbas-Ulusan, A., and Tataroglu, A. (2020). Ionizing radiation effects on Au/TiO<sub>2</sub>/n-Si metal-insulator-semiconductor (MIS) structure. *Journal of Materials Science-Materials In Electronics*, 27(6), 1-6.
- [6] Özerli, H., Karteri, İ., Karataş, Ş., and Altındal, Ş. (2014). The current–voltage and capacitance–voltage characteristics at high temperatures of Au Schottky contact to n-type GaAs. *Materials Research Bulletin*, 53, 211-217.
- [7] Tataroğlu, A., and Uyar, R.E. (2016). Analysis of density and time constant of interface states of MIS device by conductance method. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 54(6), 374-378.
- [8] Tareev, B. (1979). *Physics of Dielectric Materials*, Moscow: Mir Publishers, 67-156.
- [9] Türkay, S., and Tataroğlu, A. (2021). Complex dielectric permittivity, electric modulus and electrical conductivity analysis of Au/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/p-GaAs (MOS) capacitor. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 11418–11425.
- [10] Acar, F. Z., Uyar, R.E., and Tataroğlu A. (2023). Dielectric, Conductivity and Modulus Properties of Au/ZnO/p-InP (MOS) Capacitor. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 12, 033009.
- [11] Akbaş, A.M., Tataroğlu, A., Altındal, Ş., and 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(6), 7657-7670.
- [12] Tataroğlu, A., and Altındal, Ş. (2008). Study on the frequency dependence of electrical and dielectric characteristics of Au/SnO<sub>2</sub>/n-Si (MIS) structures. *Microelectronic Engineering*, 85, 1866–1871.
- [13] Karataş, Ş. (2019). Frequency and voltage dependent electrical and dielectric properties of Ag/nGO doped PVA/p-Si sandwich structure at room temperature. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 23, 3.
- [14] Yıldız, D.E., and Tataroglu, A. (2023) Analysis of dielectric, impedance and electrical properties of interfacial layer: AlN. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34, 1057.
- [15] Güllü, O., and Tataroglu, A. (2024). Optical and dielectric behavior of Al/CrO<sub>3</sub>/p-Si device. *Optical Materials*, 148, 114881.
- [16] Bashal, A.H., Ahmad, T., Farooq, U., Habeeb, T., AL-Refai, F., and Khalafalla, A. (2023). Enhanced dielectric properties of zinc doped bentonite composites: an effect of cobalt doping concentrations and tight binding calculation. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 3180-3190.
- [17] Delen, N., Altındal Yerişkin, S., Özbay, A., and Taşcıoğlu, İ. (2023). Origin of frequency and voltage dependent negative dielectric properties in the Al/p-Si Schottky diodes with (Cd<sub>0.3</sub>Zn<sub>0.7</sub>O) interfacial layer in the wide range of frequency and voltage. *Physica B: Condensed Matter*, 665, 415031.