



## Au/(PrBaCoO nanofiber)/n-Si Yapılarda Seri Direnç ve Arayüzey Durumlarının Frekans ve Gerilime Bağlı Dağılım Profillerinin Farklı Metotlarla Elde Edilmesi

Selçuk DEMİREZEN<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Amasya Üniversitesi, Tasarım Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, 05100, AMASYA

### Öz

Bu çalışmada PrBaCoO-nanofiber arayüzey tabakalı metal-yarıiletken (Au/n-Si) yapılarda arayüzey durumlarının yoğunluğunun ( $N_{SS}$ ) ve seri direncin ( $R_S$ ) etkisi hem frekans hem de voltaja bağlı olarak incelendi. Bu amaçla hem kapasitans-gerilim ( $C-V$ ) hem de iletkenlik-gerilim ( $G/\omega-V$ ) ölçümleri oda sıcaklığında, 1 kHz-1 MHz frekans ve ( $\pm 3$  V) gerilim aralığında gerçekleştirildi.  $N_{SS}$ 'in dağılımı hem Hill Coleman hem de yüksek-düşük kapasitans ( $C_{HF}-C_{LF}$ ) metotlarından,  $R_S$  ise Nicollian-Brews metodundan frekans ve gerilime bağlı olarak elde edildi.  $N_{SS}$  ve onların zaman sabiti ( $\tau$ ) değerleri ise Nicollian and Goetzberger tarafından geliştirilen admitans spektroskopisi metodundan elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar, empedans ölçümlerinde  $N_{SS}$ 'in özellikle tüketim ve terslenim bölgelerinde etkili iken  $R_S$ 'nin sadece yığılma bölgesinde ve yüksek frekanslarda etkin olduğunu göstermiştir. Ölçülen  $C-V$  ve  $G/\omega-V$  grafikleri üzerine  $R_S$  etkisini minimize etmek için, ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleri yüksek frekanslar için düzeltilmiştir.

### Obtaining of Frequency and Voltage Dependent Resistance and Interfacial States Distribution Profiles on Au / (PrBaCoO nanofiber) / n-Si Structures With Different Methods

#### Abstract

In this study, the density of interface states ( $N_{SS}$ ) and series resistance ( $R_S$ ) were examined for both frequency and voltage in PrBaCoO-nanofiber interface layered metal-semiconductor (Au/n-Si) structures. For this purpose, capacitance-voltage ( $C-V$ ) and conductivity-voltage ( $G/\omega-V$ ) measurements were performed at room temperature, 1 kHz-1 MHz frequency and ( $\pm 3$  V) voltage range. Frequency and voltage-dependent distributions of interface states were obtained from Hill Coleman and high-low capacitance ( $C_{HF}-C_{LF}$ ) methods, and  $R_S$  from Nicollian-Brews method. Interfacial states and their lifetime ( $\tau$ ) were obtained from the Admittance/Conductance method developed by Nicollian and Goetzberger. Experimental results show that  $N_{SS}$  states in impedance measurements are particularly effective in the regions of depletion and inversion while  $R_S$  is only effective in the accumulation region and at high frequencies. The measured capacitance and conductivity values are corrected for high frequencies to minimize the  $R_S$  effect on the measured  $C-V$  and  $G/\omega-V$  pilots.

#### Makale Bilgisi

Başvuru: 04/05/2017  
Düzeltilme: 17/07/2017  
Kabul: 17/07/2017

#### Anahtar Kelimeler

Au/PrBaCoO-nanofiber/n-Si yapılar/kapasitörler  
Admittans ölçümleri,  
Arayüzey durumları ve seri direnç  
Frekans ve voltaj bağımlılığı

#### Keywords

Au/PrBaCoO nanofiber/n-Si structures/capacitors  
Adittance measurements  
Interface states density and series resistance  
Frequency and voltage dependence

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Metal-yalıtkan/oksit-yarıiletken (MIS/MOS) yapılar, yarıiletken teknolojisinde önemli uygulamalarından dolayı elektronik endüstride artan bir öneme sahip olmuştur. Bu sebepten dolayı son zamanlarda bu yapılarla ilgili çok sayıda hem deneysel hem de teorik çalışmalar yoğunluk kazanmasına rağmen onların performansları üzerine  $N_{SS}$  ve  $R_S$ 'nin etkisi henüz net olarak aydınlatılamamıştır [1-15]. Özellikle istenilmeden oluşan arayüzey durumları, metal ile yarıiletken arasında kendiliğinde ya da istenilerek oluşturulan yalıtkan tabakanın varlığı, yapının seri direnci ve bunların frekans ve gerilime bağlı değişimlerini belirlemek aygıtın performansı açısından son derece hassas ve önemli bir konudur. Ayrıca  $N_{SS}$  ve  $R_S$ 'nin nelerden kaynaklandığı ve bunları azaltmanın yollarını belirlemek halen önemini korumaktadır. Literatürde yüksek dielektrikli bir arayüzey tabakası kullanılarak ya da tavlanarak  $N_{SS}$  ve

\*İletişim yazarı, e-mail: selcukdemirezen@gmail.com

$R_S$ 'nin önemli ölçüde azaltılabileceğine dair çalışmalar mevcuttur [1-5]. Ayrıca, bu aygıtların performansını arttırmak için, düşük dielektrikli geleneksel  $\text{SiO}_2$  veya  $\text{SnO}_2$  gibi yalıtkanlar yerine onlardan daha yüksek dielektrik sabitine sahip  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Bi}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (BTO) veya  $\text{SrTiO}_x$ (STO) ferro-elektrikler ile  $\text{PrBaCoO}_x$  gibi malzemeler kullanılmasının daha verimli olacağı iddia edilmektedir. Çünkü, metal/yarıiletken (MS) yapılarıdaki arayüzey tabakanın, engel yüksekliği ve diğer temel elektriksel parametreleri önemli derecede etkilediği hem yapılan deneysel hem de teorik çalışmalarca doğrulanmıştır [1-11]. Özellikle frekansa, voltaja,  $R_S$ 'ye,  $N_{SS}$ 'e, arayüzey tabakanın cinsine ve kalınlığına, metal ve yarıiletken arasındaki bariyer yüksekliğine ( $\Phi_B$ ) bağlı birçok çalışma olmasına rağmen performans veya kalitenin artırılması konusunda daha çok sayıda çalışmanın yapılması gerektiği tüm bilimsel çalışmalarda vurgulanmaktadır [12-19].

İdeal bir MS veya MIS tipi yapıda,  $C$  ve  $G/\omega$  değerleri frekanstan bağımsızdır [1,2,16,17]. Fakat metal-yarıiletken arasındaki arayüzey tabaka,  $N_{SS}$ ,  $R_S$ , polarizasyon ve tünelleme mekanizmalarından dolayı ideal durumdan sapmalar olur. Düşük frekanslarda  $C$  ve  $G/\omega$  değerlerine  $N_{SS}$ ,  $\tau$ , ac sinyalinin frekansı, arayüzey tabakanın kapasitansı ek bir katkı getirir [11, 12, 17]. Son yıllarda bazı araştırmacılar, özellikle yığılma bölgesinde doğru beslem  $C$ - $V$  değerlerinde anormal pik değerleri tespit etmişlerdir [10-12, 18-24]. Bunlar arasından Chattopadhyay ve RayChaudhuri oluşan bu pik değerlerini seri direnç etkisine atfetmiştir [18]. Diğer taraftan Ho ve arkadaşları bu pikin ( $C$  ve  $G/\omega$  değerlerindeki değişimin)  $N_{SS}$  den kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir [22]. Ayrıca, Werner ve ark. [23] ve Şahin ve ark. [12] gözlenen pikin  $R_S$  den kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Sonuç olarak ideal durumda frekanstan bağımsız görünen  $C$  ve  $G/\omega$  değerleri uygulamada değişiklik göstermektedir ve bu değişiklikler özellikle düşük frekanslarda  $N_{SS}$ ,  $R_S$ , arayüzey tabaka ve bariyer homojensizliğine atfedilmektedir [12, 25-28].

Bu çalışmanın amacı;  $N_{SS}$ ,  $R_S$  ve  $\text{PrBaCoO}$  nanofiber arayüzey tabakanın  $C$ - $V$  ve  $G/\omega$ - $V$  karakteristikleri üzerine olan etkisini hem frekans hem de voltaja bağlı olarak detaylı bir inceleme yapmaktır. Bu amaçla  $C$ - $V$  ve  $G/\omega$ - $V$  ölçümleri geniş bir frekans (1 kHz- 1 MHz) ve voltaj ( $\pm 3\text{V}$ ) aralığında gerçekleştirilmiş,  $R_S$  ve  $N_{SS}$  değerlerinin frekans, voltaj ve enerjiye bağlı dağılımları farklı hesaplama metotları kullanılarak elde edilmiş ve mevcut literatür ile kıyaslanmıştır.

## 2. DENEYSEL DETAYLAR (EXPERIMENTAL DETAILS)

Au/ $\text{PrBaCoO}$  nanofiber/n-Si yapıları oluşturmak için, (111) yüzey yönelimli,  $0.005 \Omega \cdot \text{cm}$  öz dirençli,  $280 \mu\text{m}$  kalınlıkta, ön yüzeyi parlatılmış fosfor katkılı (n-type) Si yarıiletkeni kullanıldı.  $\text{PrBaCoO}$  ince film büyütülmeden önce, Si yarıiletken yüzeyi, üzerindeki organik ve ağır metal kirlerini gidermek ve yüzeydeki pürüzleri ortadan kaldırmak için kimyasal olarak temizlendi. Yarıiletkenin yüzeyi temizlendikten hemen sonra  $\sim 1500 \text{ \AA}$  kalınlığında yüksek saflıkta (% 99.999) Au, metal buharlaştırma sisteminde  $\sim 2 \times 10^{-6}$  Torr' luk basınçta n-Si yaprağın arka mat yüzeyine (parlatılmamış) termal olarak buharlaştırıldı. Düşük dirençli omik kontak elde etmek için, n-Si/Au yapısı yaklaşık  $550 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 30 dakika süreyle kuru azot ortamında tavlandı.

Arayüzey tabakayı oluşturmak amacıyla önce PVA tozunun damıtılmış suda çözülmesi ile bir sulu PVA solüsyonu (10 pct) hazırlandı. 3 saat karıştırılarak  $353 \text{ }^\circ\text{K}$ 'de ( $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ısıtıldı ve daha sonra sıcaklık oda sıcaklığına düşürüldü. Bileşim için, bizmut (III) asetat, baryum asetat ve kobalt (II) asetatın uygun miktarları  $333 \text{ }^\circ\text{K}$ 'de ( $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 20 g sulu PVA'ya (ağırlıkça %10) ilave edildi. Polimer çözeltisi 1 saat manyetik bir karıştırma çubuğu kullanılarak karıştırıldı. Tablo 1 hazırlanan solüsyon bileşenleri değerlerini göstermektedir. Daha sonra çözelti elektrospin yöntemiyle nanofiber üretimi için kılcal boruya kondu. Kılcal boru ile metal kolektör arasındaki mesafe 15 cm, akış oranı 0.8 ml/saat ve gerilim kaynağı 18 kV olarak ayarlanarak elektrospin sisteminde yarıiletken üzerinde  $\text{PrBaCoO}$  nanofiberler oluşturuldu.

**Tablo 1.** Hazırlanan solüsyonda bulunan bileşenler

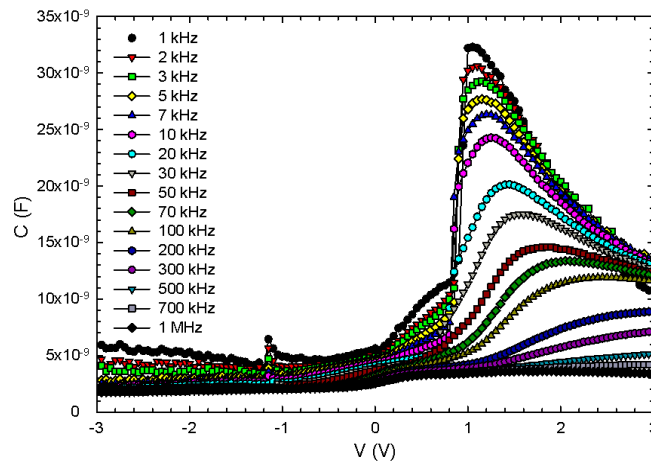
Kobalt asetat (g)	Baryum asetat (g)	Praseodymiyum asetat (g)
0.5	0.5127	0.8732

Yarıiletken üzerinde  $\text{PrBaCoO}$  nanofiberlerin oluşumundan hemen sonra, numuneler vakum atmosferinde yaklaşık 12 saat boyunca  $363 \text{ K}$ 'de ( $90 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ısıtılma tabi tutuldu. Son olarak, yine yüksek-vakum metal buharlaştırma sisteminde ( $\sim 2 \times 10^{-6}$  Torr),  $\sim 1000 \text{ \AA}$  kalınlıkta yüksek saflıkta (% 99.999),  $\sim 1.5 \text{ mm}$  çapa

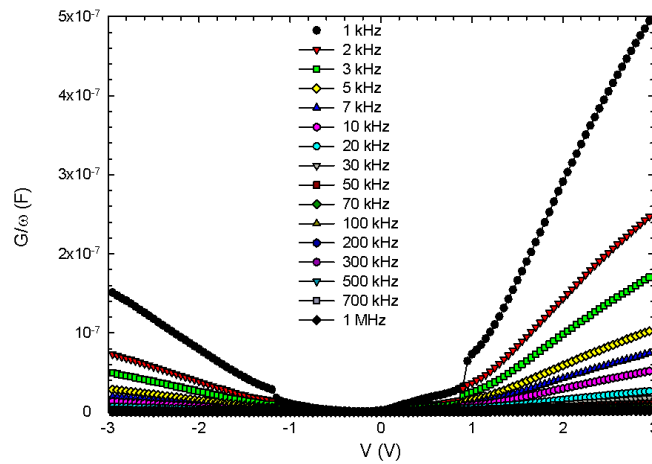
sahip dairesel doğrultucu Au kontaklar oluşturuldu. PrBaCoO nanofiberlerinin arayüzey tabakası kalınlıklarının profilometre kullanılarak yaklaşık 5200 Å olduğu tahmin edildi.  $C-V$  ve  $G/\omega-V$  ölçümleri, bir HP 4192 A LF empedans analizörü ve 40 mV<sub>rms</sub> ac sinyali kullanılarak 1 kHz- 1 MHz frekans ve  $\pm 3V$  aralığında gerçekleştirildi.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Au/PrBaCoO nanofiber/n-Si kapasitörlerde  $N_{SS}$ ,  $\tau$  ve  $R_S$ 'nin etkisini belirlemek için doğru ve ters beslem  $C-V$  ve  $G/\omega-V$  ölçümleri oda sıcaklığında HP 4192A LF empedans analizörünü kullanarak 1kHz - 1MHz geniş frekans aralığında gerçekleştirilmiş ve sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir.



**Şekil 1.** Au/PrBaCoO nanofiber/n-Si kapasitörünün oda sıcaklığında frekansa bağımlı  $C-V$  eğrileri (The frequency dependent  $C-V$  characteristics of Au/PrBaCoO nanofiber/n-Si capacitor at room temperature)



**Şekil 2.** Au/PrBaCoO nanofiber/n-Si kapasitörünün oda sıcaklığında frekansa bağımlı  $G/\omega-V$  eğrileri (The frequency dependence of  $G/\omega-V$  characteristics of Au/PrBaCoO nanofiber/n-Si capacitor at room temperature)

Şekil 1 ve 2'den görülebileceği gibi hem  $C$  hem de  $G/\omega$  değerleri uygulanan gerilim ve frekansa bağlıdır.  $C$ - $V$  eğrileri MIS ve MOS kapasitörlerde terslenim, birikim ve tüketim bölgelerine sahiptir.  $C$ - $V$  eğrilerinin yaklaşık 1.2 V'da belirgin bir pik değerine sahip olduğu ve artan frekanslarda bu pik değerinin azaldığı açıkça görülmektedir. Ayrıca pikin konumu, gerilimin artmasıyla yüzey durumlarının yeniden yapılanması ve düzenlenmesi nedeniyle yüksek voltajlara doğru kaymaktadır. Diğer önemli sonuç ise, numunelerin induktif davranışlıdır. Diğer bir deyişle, Şekil 2 ve 3 de  $C$  değerlerinin zirveden sonra azalmasına karşın  $G/\omega$  değerleri artar. Birikim bölgesindeki bu tür  $C$  ve  $G/\omega$  davranışı, arayüzey durumlarının ve seri direncin varlığına atfedilebilir [1, 4, 7, 9-13].

Düşük frekanslarda yüksek  $C$  ve  $G/\omega$  değerleri ara yüzey durumlarından (metal/yarı iletken arayüzeyde lokalize olmuş) kaynaklanır [1,2,12,18]. Eğer  $C$ - $V$  ölçümleri, yeterince düşük frekanslarda gerçekleştirilirse,  $N_{SS}$  ac sinyalini kolayca takip eder ve ölçüm değerlerine göre aşırı bir kapasitans ve iletkenlik kazandırır [10,12,18]. Diğer taraftan daha yüksek frekanslarda  $N_{SS}$  ac sinyalini takip edemez ve bu durumda, arayüzey durumlarının kapasitansının ( $C_{ss}$ ) ve iletkenliğinin ( $G_{ss}/\omega$ ) ölçülen kapasitans ( $C_m$ ) ve iletkenliğe ( $G_m/\omega$ ) katkısı ihmal edilebilecek kadar küçük olur [2, 3]. Bu sonuçlar,  $R_s$  değerinin yalnızca birikim bölgesinde etkili olduğunu teyit etmiştir, ancak ara yüzey durumları hem terslenim hem de tüketim bölgelerinde etkilidir. Bununla birlikte, yüksek frekanslarda, kapasitörün düşük empedansı nedeniyle  $R_s$  önemli hale gelir. Yüksek arayüzey tabaka kalınlığı da ( $d_i \geq 500 \text{ \AA}$ ) MIS tipi Schottky diyotlarda bir kapasitör gibi davranır ve cihaz özellikleri üzerinde  $N_{SS}$  kadar güçlü bir etkisi olabilir [1, 2, 11, 12]. Bu durumda, tuzaklardaki veya yüzeydeki yükler yarı iletkenle dengelidir ve bu kalın ara yüzey tabakası (5200 Å) nedeniyle metale yük iletimi olmaz [1, 11, 12].

$R_s$  değerlerini belirlemek için, Nicollian ve Brews [2, 3] tarafından geliştirilen admitans spektroskopi yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemle göre, MIS veya MOS yapılar için  $R_s$  değeri yeterince yüksek frekanslarda ( $f \geq 500 \text{ kHz}$ ) ölçülen  $C_m$  ve  $G_m$  değerlerinden aşağıdaki eşitlik ile elde edilebilir [2]:

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + (\omega C_m)^2} \quad (1)$$

burada,  $\omega (=2\pi f)$  açısal frekans,  $G_m$  ve  $C_m$  güçlü birikim bölgesinde ölçülen kapasitans ve iletkenlik. Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanan her bir frekanstaki gerilime bağlı direnç ( $R_i$ ) değerlerinin grafikleri Şekil 3 (a) ve (b) de verilmiştir.

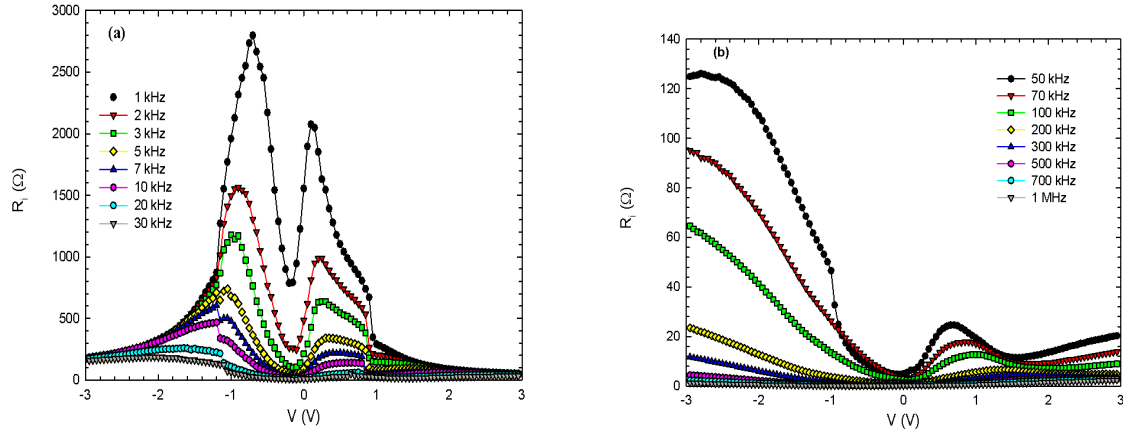
Şekil 3(a) da  $R_i$ - $V$  eğrilerinde frekansa bağımlı olarak (-1) - (1) V aralığında iki farklı pik görülmektedir ve bu pik yeterince yüksek frekanslarda kaybolmaktadır. Bu çeşit pik davranışı düşük frekanslarda arayüzey durum yoğunluklarının özel bir dağılımına, bu durumların yeniden yapılanması ve düzenlenmesine, yüzey ve dipol polarizasyonuna atfedilebilir [1, 2, 9]. Şekil 3 (b) 'de  $R_i$ - $V$  eğrileri birikim bölgesinde sadece bir pik vermektedir. Diğer bir deyişle, ara yüzey durumları yüksek frekanslarda ac sinyalini takip edemediği için, terslenim bölgesinde ikinci tepe kaybolur. Şekil 3'de görülebileceği gibi, yeterince yüksek doğru beslem voltajlarda  $R_i$  değeri  $R_s$ 'nin gerçek değerine karşılık gelir.

Seri direnç etkisi özellikle yüksek frekanslarda admitans ölçümleri üzerinde bir sapmaya sebep olur. Bu sebepten gerçek kapasitans ve iletkenlik değerlerini elde etmek amacıyla  $C_m$  ve  $G_m/\omega$  değerleri ters ve doğru gerilim bölgelerinde seri direnç etkisi göz önünde bulundurularak aşağıdaki eşitliklere göre düzeltilmiş ve düzeltilmiş kapasitans ( $C_c$ ) ve düzeltilmiş iletkenlik ( $G_c/\omega$ ) değerleri elde edildi.

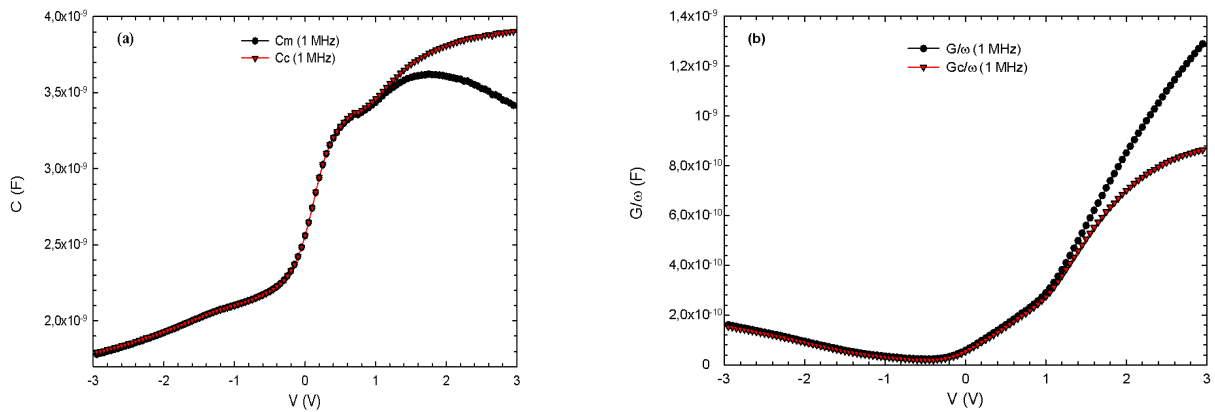
$$C_c = \frac{[G_m^2 + (\omega C_m)^2] C_m}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (2)$$

$$G_c = \frac{[G_m^2 + (\omega C_m)^2] a}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (3)$$

burada,  $a = G_m - (G_m^2 + (\omega C_m)^2) R_s$ . Düzeltme sonucunda elde edilen  $C_c$  ve  $G_s/\omega$  değerlerine ait eğriler Şekil 4(a) ve (b) de verilmiştir.

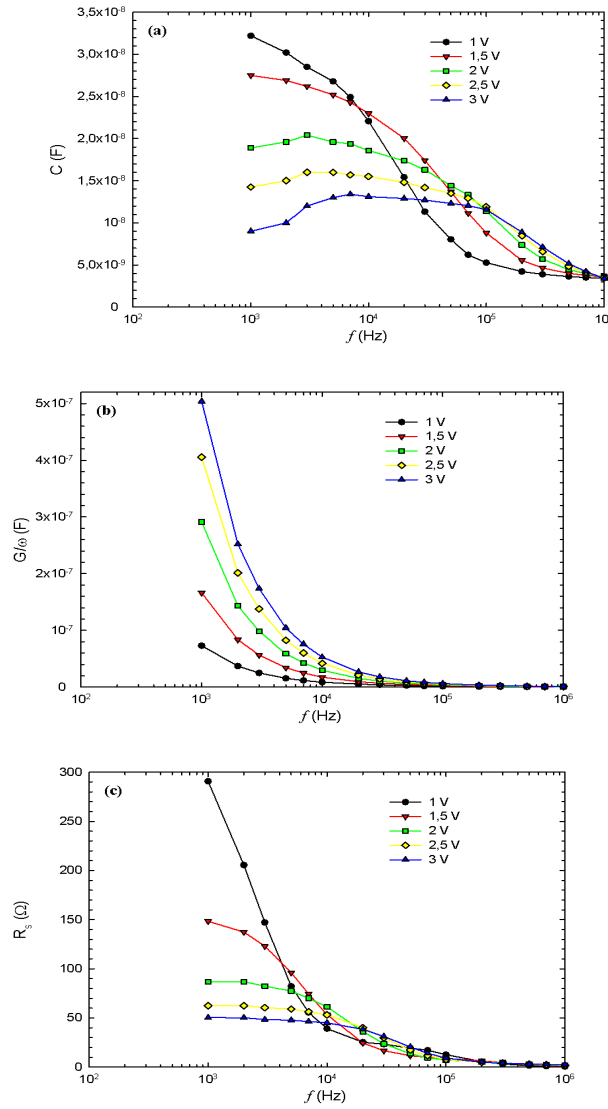


**Şekil 3.** Au/PrBaCoO nanofiber/n-Si kapasitörün (a) düşük frekanslarda (b) yüksek frekanslarda  $R_i$ -V eğrileri ( $R_i$ -V characteristics of Au/PrBaCoO nanofiber/n-Si capacitor a) at low frequencies b) at high frequencies)



**Şekil 4.** Au/PrBaCoO nanofiber/n-Si kapasitörün 1MHz frekans için düzeltilmiş (a)  $C_c$ -V ve (b)  $G_s/\omega$ -V eğrileri (The corrected values of Au/PrBaCoO nanofiber/n-Si capacitor, for 1 MHz)

Şekil 4 (a) ve (b) 'den görülebileceği gibi,  $R_s$  etkisi birikim bölgesinde oldukça yüksek olmasına rağmen terslenim ve tüketim bölgesinde oldukça düşüktür. Bu nedenle, düzeltilmiş  $C_c$  ve  $G_s/\omega$  değerleri, özellikle birikim bölgesinde değişir. Uygulanan gerilim de elektriksel özellikleri etkileyen önemli bir parametredir. Bu nedenle, Şekil 2, 3 ve 4'te ölçülen  $C_m$ ,  $G_m/\omega$  ve  $R_s$  değerleri beş farklı gerilimde frekansın bir fonksiyonu olarak elde edildi ve sırasıyla Şekil 5 (a), (b) ve (c) de verildi.



**Şekil 5.** Au/PrBaCoO nanofiber/n-Si kapasitörün oda sıcaklığında frekansa bağlı (a)  $C(V)$ - $f$ , (b)  $G/\omega(V)$ - $f$  ve (c)  $R_s(V)$ - $f$  eğrileri (The frequency dependent profiles of (a)  $C(V)$ - $f$ , (b)  $G/\omega(V)$ - $f$  and (c)  $R_s(V)$ - $f$  for each voltage at room temperature)

Şekil 5'de görülebileceği gibi,  $C_m$ ,  $G_m/\omega$  ve  $R_s$  değerleri 1 kHz - 1 MHz frekans aralığında artan frekans ile azalmaktadır.  $C_m$  ve  $G_m/\omega$  değerlerinin bu davranışı, M/S arayüzeyinde  $N_{SS}$ 'nin sürekli bir dağılımının varlığına atfedilir [14-16]. Bunun yanında düşük frekanslarda  $C$  ve  $G/\omega$  nin yüksek değerlere sahip olması, ac sinyali takip edebilen  $N_{SS}$ 'lerin ek bir kapasitans ( $C_{ex}$ ) ve iletkenliğe ( $G_{ex}/\omega$ ) neden olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, düşük frekanslarda, bu tuzaklardaki  $\tau$ , açısal frekansın tersinden ( $1/2\pi f$ ) çok daha düşüktür ve ac sinyali kolayca izleyebilir ve kapasitans ve iletkenliğin ölçülen değerlerinde ek bir kapasitans ve iletkenliğe neden olabilir [17, 18]. Öte yandan,  $R_s$  değerleri hem frekans hem de uygulanan gerilime bağlıdır ve M/S arayüzeyinde arayüzey durumlarının yoğunluk dağılımına bağlı olarak bölgeden bölgeye değişim gösterir.

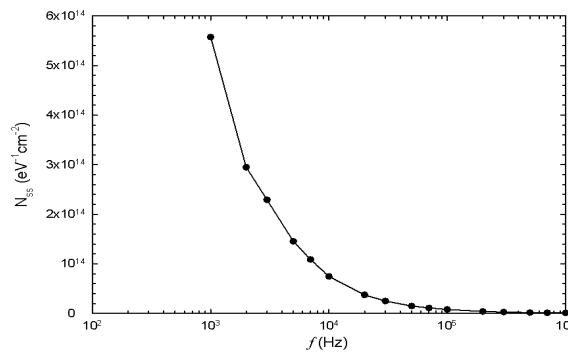
Bu çalışmada arayüzey durum yoğunlukları farklı metotlarla elde edildi. Bu metotlardan ilki Hill-Coleman metodudur [24]. Bu metoda göre  $N_{SS}$  değerleri:

$$N_{SS} = \frac{2}{qA} \left\{ \frac{G_m / \omega}{[G_m / \omega C_i]^2 + (1 - C_m / C_i)^2} \right\} \quad (4)$$

ile hesaplandı. Burada "A" kapasitörün alanı,  $\omega$  açısal frekans ( $=2\pi f$ ),  $C_m$  ve  $G_m$  güçlü akümülyasyon (birikim) bölgesinde ve yüksek frekansta (1MHz) pik değerine karşılık gelen maksimum kapasitans ve iletkenlik,  $C_i$  arayüzey tabaka kapasitansı.

$$C_i = C_m \left[ 1 + \frac{G_m^2}{(\omega C_m)^2} \right] = \frac{\epsilon_i \epsilon_o A}{d} \quad (5)$$

$N_{SS}$  değerleri, farklı frekanslarda denklem 4'ten elde edilmiş ve şekil 6'da gösterilmiştir. Bu şekilde açıkça görülebileceği gibi  $N_{SS}$ , frekansa bağlıdır ve artan frekansla azalır. Daha ayrıntılı bilgi edinebilmek amacıyla  $N_{SS}$  değerlerinin gerilimin ve enerjinin bir fonksiyonu olarak da hesaplanması gerekir.

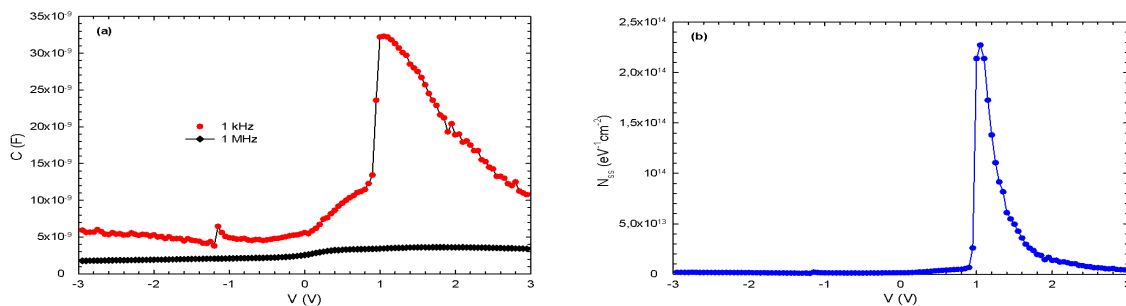


**Şekil 6.** Arayüzey durum yoğunluklarının oda sıcaklığında frekansa bağlı değişim eğrisi (The variation of the interface states density as a function of the frequency at room temperature)

$N_{SS}$ 'i gerilimin bir fonksiyonu olarak hesaplamak için düşük (1 kHz) - yüksek (1 MHz) frekans metodu (Şekil 7a) kullanıldı. Bu metoda göre gerilime bağlı  $N_{SS}$  değerleri denklem 6 kullanılarak hesaplandı ve şekil 7 (b) de verildi [2].

$$N_{SS} = \frac{C_{SS}}{qA} = \left[ \left( \frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} - \left( \frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} \right] \frac{1}{qA} \quad (6)$$

Şekil 7(b) den görüldüğü gibi arayüzeyde yüklerin dağılımından dolayı  $N_{SS}$ -V eğrisi 1,2 V civarında bir tepe noktası sergilemektedir.

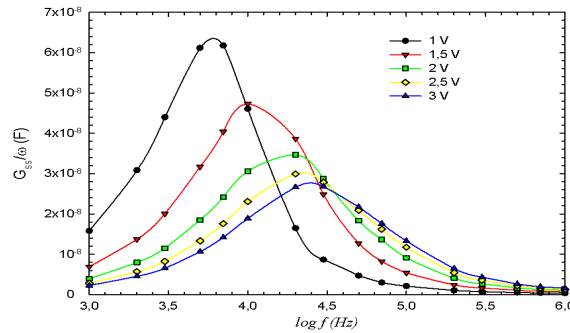


**Şekil 7.** (a) Ölçülen yüksek (1 MHz) ve düşük (1 kHz) frekans C-V eğrisi ve (b) oda sıcaklığında arayüzey durum yoğunluklarının gerilime bağlı dağılım eğrileri ((a) Measured high (1 MHz) and low (1 kHz) frequency C-V plots and (b) voltage dependent density distribution profiles of  $N_{SS}$  at room temperature)

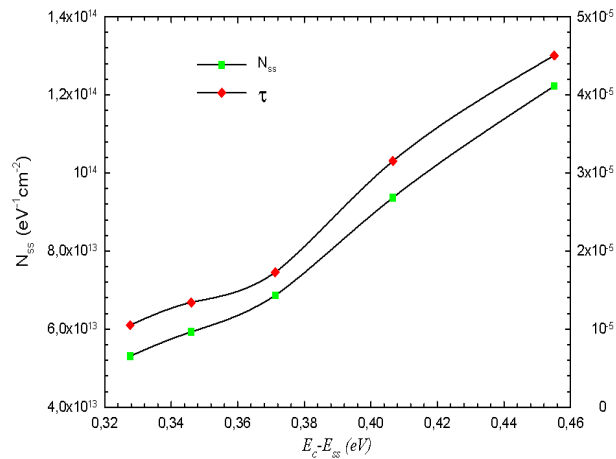
Ayrıca, arayüzey durumlarının enerji yoğunluk dağılımı ve zaman sabiti admitans spektroskopisi metodu kullanılarak da (denklem 7) elde edilmiştir [2].

$$G_{SS} = \frac{C_{ox}^2 G}{(C_{ox} - C)^2 + (G/\omega)^2} \quad (7)$$

burada,  $C$  ve  $G/\omega$  ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleridir. Şekil 8 beş farklı gerilim değeri için  $G_{SS}$ - $\log(f)$  eğrilerini içermektedir. Bu eğriler frekans arttıkça azalan pik değerleri  $(G_{SS})_{max}$  vermektedir. Şekil 8'deki tepe değerlerinde  $d(G_{SS}/\omega) / d(\omega\tau) = 0$  dir ve şekildeki eğriler  $\omega\tau = 1.98$  gibi bir maksimum değerine sahiptir.  $N_{SS}$ 'i veren ifade, maksimum durum değerleri olan  $(G_{SS})_{max}=0.402qAN_{SS}$  değerinden elde edilir.  $N_{SS}$  değerleri ve  $\tau$  Şekil 9'da verilmiştir.  $N_{SS}$  ve  $\tau$  değerlerinin artan enerji ile birlikte arttığı görülmektedir.



Şekil 8. Oda sıcaklığında frekansa bağlı  $G_{SS}$  eğrileri (The frequency dependence of  $G_{SS}$  characteristics at room temperature)



Şekil 9. Oda sıcaklığında arayüzey durumlarının enerji dağılımı ve zaman sabiti (The energy distribution of interface states and their time constant at room temperature)

#### 4. SONUÇ (CONSLCLUSION)

Au/PrBaCoO nanofiber/n-Si kapasitörlerin  $C$ - $V$  ve  $G/\omega$ - $V$  karakteristiklerine  $N_{SS}$  ve  $R_s$ 'nin etkisini görmek için empedans spektroskopisi ölçümleri oda sıcaklığında, 1 kHz - 1 MHz frekans ve (-3 V) - (+3 V) gerilim aralığında gerçekleştirildi. Deneysel sonuçlar hem  $C$  hem de  $G/\omega$  değerlerinin  $N_{SS}$  ve  $R_s$  etkisinden dolayı



terslenim ve birikim bölgelerinde frekansa ve uygulanan gerilime bağlı olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, yüksek frekansta  $C-V$  ve  $G/\omega-V$  karakteristikleri üzerindeki  $R_S$  etkisini ortadan kaldırmak için ölçülen  $C$  ve  $G/\omega$  değerleri düzeltilmiştir. Terslenim ve birikim bölgesine karşılık gelen düşük frekanslarda  $R_S-V$  grafiğinde gözlemlenen iki tepe  $N_{SS}$  ve  $R_S$ 'ye atfedilmiştir.  $N_{SS}$  in gerilim ve enerji bağımlı eğrileri, sırasıyla, düşük-yüksek frekans kapasitans metodu ve admitans metodu kullanılarak ayrı ayrı elde edilmiş ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır.  $G_{ss} - \log(f)$  eğrileri, çeşitli gerilim değerleri için elde edilmiştir. Gerilim tüketim bölgesinden birikim bölgesine doğru geçtikçe bu eğrilerin  $N_{SS}$  den dolayı bir pik sergilediği ve bu pik değerlerinin de düşük frekanstan yüksek frekansa doğru kaydığı gözlenmiştir. Hem  $N_{SS}$  hem de  $\tau$  değerlerinin, Si'nin yasak enerji aralığının ortasından iletim bandına doğru artan  $E_c-E_{ss}$  değeri ile üssel olarak arttığı gözlenmiştir. Deneysel sonuçlar, yüzey durumlarının, yüzey ve dipol polarizasyonlarının düşük frekanslarda daha etkili olduğunu, ancak  $R_S$  değerinin yalnızca yüksek frekanslarda birikim bölgesinde etkili olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, kapasitörlerde arayüzey tabaka olarak, geleneksel düşük dielektrikli  $SiO_2$  yerine PrBaCoO gibi yüksek dielektrikli malzemelerin kullanılması, kapasitörde çok daha fazla miktarda yük ve dolayısıyla enerji depolanabileceğini göstermiştir.

### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmada yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL'a teşekkürlerimi sunarım.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, Wiley and Sons, New York, 1981.
- [2] E.H. Nicollian, J.R. Brews, Metal Oxide Semiconductor (MOS) Physics and Technology, Wiley, New York, 1982.
- [3] E. H. Nicollian, A. Goetzberger, The Si-SiO<sub>2</sub> Interface - Electrical Properties as Determined by the Metal-Insulator-Silicon Conductance Technique. Bell Syst. Tech. J., 46 (1967) 1055-1133.
- [4] Y. Şafak Asar, T. Asar, Ş. Altındal, S. Özçelik, Investigation of dielectric relaxation and ac electrical conductivity using impedance spectroscopy method in (AuZn)/TiO<sub>2</sub>/p-GaAs(110) schottky barrier diodes. Journal of Alloys And Compounds, 628 (2015) 442-449.
- [5] M. Jayalakshmi, K. Balasubramanian, Simple Capacitors to Supercapacitors - An Overview. Int. J. Electrochem. Sci, 3 (2008) 1196-1217.
- [6] J. Ho, T. Richard Jow, S. Boggs, Historical introduction to capacitor technology. IEEE Electrical Insulation Magazine, 26 (2010) 20-25.
- [7] S. A. Yerişkin, H. İ. Ünal, B. Sarı, Electrical and dielectric characteristics of Al/polyindole Schottky barrier diodes. II. Frequency dependence. Journal of Applied Polymer Science 120 (2011) 390-396.
- [8] E.H. Rhoderick, Metal-Semiconductor Contacts, Oxford University, 1978.
- [9] S. Demirezen, Ş. Altındal, S. Özçelik, E. Özbay, On the profile of frequency and voltage dependent interface states and series resistance in (Ni/Au)/Al<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>N/AlN/GaN heterostructures by using current-voltage (I-V) and admittance spectroscopy methods. Microelectronics Reliability, 51 (2011) 2153-2162.
- [10] B. Kinaci, S. Özçelik, Temperature Dependent Capacitance-Voltage And Conductance-Voltage Characteristics Of Au/TiO<sub>2</sub>(Rutile)/n-Si MIS Structure At 1 Mhz. Journal of Electronics Materials, 42, (2013) 1108-1113.

- [11] S. Demirezen, E. Özavcı, Ş. Altındal, The effect of frequency and temperature on capacitance/conductance–voltage (C/G–V) characteristics of Au/n-GaAs Schottky barrier diodes (SBDs). *Materials Science in Semiconductor Processing*, 23 (2014) 1–6.
- [12] A. Tataroğlu, A. A. Al-Ghamdi, F. El-Tantawy, W. A. Farooq, F. Yakuphanoğlu, Analysis of interface states of FeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> spinel composite film/p-Si diode by conductance technique. *Appl. Phys. A*, 122:220 (2016) 1-6.
- [13] S. Demirezen, A. Kaya, Ş. Altındal, İ. Uslu, The energy density distribution profile of interface traps and their relaxation times and capture cross sections of Au/GO-doped PrBaCoO nanoceramic/n-Si capacitors at room temperature. *Polymer Bulletin*, (2017) doi:10.1007/s00289-017-1925-2.
- [14] M.M. Bulbul, S. Zeyrek, Frequency dependent capacitance and conductance–voltage characteristics of Al/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/p-Si(100) MIS diodes. *Microelectronic Engineering*, 83 (2006) 2522-2526.
- [15] I.M. Afandiyeva, S. Demirezen, Ş. Altındal, Temperature dependence of forward and reverse bias current–voltage characteristics in Al–TiW–PtSi/n-Si Schottky barrier diodes with the amorphous diffusion barrier. *Journal of Alloys and Compounds*, 552 (2013) 423-429.
- [16] H.C. Card, E.H. Rhoderick, Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *J. Phys. D:Appl Phys*, 4 (1971) 1589-1601.
- [17] E.H. Rhoderick, *Metal-Semiconductor Contacts*, Oxford University, 1978.
- [18] P. Chattopadhyay, B. Raychaudhuri, New technique for the determination of series resistance of Schottky barrier diodes. *Solid State Electron.* 35 (1992) 1023-1024.
- [19] S. Demirezen, A. Kaya, Ö. Vural, Ş. Altındal, The Effect of Mo-doped PVC+TCNQ Interfacial Layer on the Electrical Properties of Au/PVC+TCNQ/p-Si Structures at Room Temperature. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 33 (2015) 140–148.
- [20] S. Altındal, H. Uslu, The Origin of Anomalous Peak and Negative Capacitance in The Forward Bias C-V Characteristics of Au/PVA/n-Si structures. *J. Appl. Phys.* 109 (2011) 074503.
- [21] A. Tataroğlu, R. E. Uyar, Analysis of density and time constant of interface states of MIS device by conductance method. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 54:6 (2016) 374-378.
- [22] P. S. Ho, E. S. Yang, H. L. Evans, X. Wu, Electronic states at silicide-silicon interfaces. *Phys. Rev. Lett.* 56 (1986) 177-180.
- [23] J. Werner, A. F. J. Levi, R.T. Tung, M. Anslowar, M. Pinto, Origin of the Excess Capacitance at Intimate Schottky Contacts. *Phys. Rev. Lett.*, 60 (1988) 53-56.
- [24] W.A. Hill, C.C. Coleman, A single-frequency approximation for interface-state density determination. *Solid State Electron.* 23 (1980) 987-993.
- [25] Ş. Altındal, H. Kanbur, İ. Yücedağ, A. Tataroğlu, On the energy distribution of interface states and their relaxation time and capture cross section profiles in Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) Schottky diodes. *Microelectron. Engin.*, 85 (2008) 1495-1501.
- [26] M. Depas, R. L. Van Meirhaeghe, W. H. Laflere, F. Cardon, *Semicond. Sci. Technol.*, 7 (1992) 476-1483.
- [27] N. Konofaos, I. P. McClean, C. B. Thomas, Characterisation of the Interface States between Amorphous Diamond-Like Carbon Films and (100) Silicon. *Phys. Stat. Sol (a)*, 161 (1997) 111-123.
- [28] A. Singh, Characterization of interface states at Ni/nCdF<sub>2</sub> Schottky barrier type diodes and the effect of CdF<sub>2</sub> surface preparation. *Solid State Electronics*, Vol 28 (1985) 223-232.