



**Au/(CeO<sub>2</sub>:ZnO-KATKILI PVP)/n-Si (MPS) SCHOTTKY YAPILARIN  
HAZIRLANMASI VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN GENİŞ BİR  
FREKANS ARALIĞINDA İNCELENMESİ**

**Uğur ÖZÇELİK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2024**

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
  - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
  - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
  - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
  - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Uğur ÖZÇELİK

04/06/2024

Au/(CeO<sub>2</sub>:ZnO-KATKILI PVP)/n-Si (MPS) SCHOTTKY YAPILARIN  
HAZIRLANMASI VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN GENİŞ BİR FREKANS  
ARALIĞINDA İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Uğur ÖZÇELİK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2024

ÖZET

Bu çalışmada, üretilen Au/(CeO<sub>2</sub>:ZnO-katkılı PVP)/n-Si (MPS) tipi Schottky yapıların önemli temel elektriksel parametreleri 2kHz-1MHz frekans ve  $\pm 4.5V$  aralıklarında empedans-voltaj (Z-V) ölçümlerinden elde edilmiştir. Katkı donör atomları ( $N_d$ ) ve seri direnç ( $R_s$ ) artan frekans ile üstel düşerken, bariyer yüksekliği ve tükenim bölgesi genişliği ( $W_d$ ) lineer artar. Arayüzey durumlarının ( $N_{ss}$ ) enerjiye bağlı profili ve onların yaşam/gevşeme süreleri ( $\tau$ ), Nicollian-Goetzberger tarafından geliştirilen diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında en güvenilir ve doğru yöntem olan paralel-kondüktans yöntemi kullanılarak elde edildi. Bu parametreler ayrıca ileri beslem akım-voltaj (I-V) verilerinden Card-Rhoderick yöntemi kullanılarak elde edildi ve diğer yöntemle elde edilen sonuçla karşılaştırıldı. İki farklı yöntemle elde edilen sonuçlar uyuşmakta ve neredeyse aynı büyüklüktedir. Ölçülen yüksek frekans kapasitans/kondüktans-voltage (C/G-V) eğrileri ayrıca  $R_s$  etkisi göz önüne alınarak düzeltildi ve düzeltilen eğriler  $R_s$ 'nin kuvvetli yığılma bölgesinde daha etkili olduğunu göstermektedir. Deneysel sonuçlar, tüm temel elektriksel parametrelerin frekans ve voltajın güçlü birer fonksiyonu olduğunu ve (CeO<sub>2</sub>:ZnO-katkılı PVP) organik arayüzey tabakanın geleneksel yöntemlerle büyütülen geleneksel yalıtkanlar yerine başarılı olarak kullanılabilir.

Bilim Kodu : 20217  
Anahtar Kelimeler : Paralel kondüktans metodu, frekansa bağlı sığa ve iletkenlik, arayüzey durumlarının enerjiye bağlı dağılım profili, organik arayüzey tabaka  
Sayfa Adedi : 43  
Danışman : Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

THE FABRICATION OF Au/(CeO<sub>2</sub>:ZnO-DOPED PVP)/n-Si (MPS) SCHOTTKY  
SCTRUCTURES AND INVESTIGATION OF THEIR ELECTRICAL  
CHARACTERISTICS IN A WIDE FREQUENCY RANGE

(M. Sc. Thesis)

Uğur ÖZÇELİK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2024

ABSTRACT

In this study, some important main physical parameters of the manufactured Au/(CeO<sub>2</sub>:ZnO-doped PVP)/n-Si (MPS) type Schottky diodes (SDs) were extracted from the impedance-voltage (Z-V) measurements in the wide frequency range of 2 kHz - 1MHz and voltage range of  $\pm 4.5V$ . While the doping donor atoms ( $N_d$ ) and series resistance ( $R_s$ ) values decrease with increasing frequency as almost exponentially, barrier height ( $\Phi_B$ ) and depletion layer width ( $W_d$ ) increase as almost linearly. The energy dependent profile of surface-states ( $N_{ss}$ ), their life-times ( $\tau$ ) were extracted from parallel conductance method developed by Nicollian-Goetzberger which is the most reliable and accurate method when compared to others. They were also extracted from the forward-bias current-voltage (I-V) graph by using Card-Rhoderick method and compared with each other. The obtained results from two different methods agree and are almost at the same order of magnitude. The measured high frequency capacitance/conductance-voltage (C/G-V) plots were also corrected by considering  $R_s$  effect and they showed that  $R_s$  is more effective at strong accumulation zone. All experimental results implied that all basic electrical parameters are strong functions of frequency and voltage and the (CeO<sub>2</sub>:ZnO-doped PVP) organic interlayer can be successfully used instead of conventional insulator layers grown by traditional methods.

Science Code : 20217

Key Words : Parallel conductance method, frequency dependent capacitance and conductance, energy dependent profile of surface states, organic interfacial layer.

Page Number : 43

Supervisor : Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

## TEŐEKKÖR

Çalıőmalarım boyunca bilimsel katkı ve yardımlarıyla beni yönlendirerek çalıőmalarım için desteğini ve emeğini esirgemeyen değerli danıőmanım Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL hocama sonsuz teőekkör eder saygılarımı sunarım. Çalıőmalarım boyunca deneyim ve tecrübelerini paylaőan, ilgi, hoőęörü ve yardımları için değerli hocalarım Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK, Prof. Dr. Yashar AZİZİAN KALANDARAGH ve Arő. Gör. Murat ULUSOY'a teőekkürlerimi sunarım.



**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	iix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİLER .....	5
2.1. Metal-Yarıiletken Kontakların/Diyotların Teorisi .....	5
2.2. İdeal Metal-Yarıiletken (MS) Doğrultucu Kontaklar veya Schottky Diyotlar ...	5
2.3. Düz ve Ters Beslem .....	7
2.4. Termiyonik Emisyon (TE) Mekanizması.....	9
2.5. MS ve MIS Tipi Yarıiletken Ayıgıtlarda İdeal Durumdan Sapmalara Neden Olan Faktörler.....	10
3. DENEYSEL YÖNTEM.....	17
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....	21
5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	37
KAYNAKLAR .....	39
ÖZGEÇMİŞ .....	43

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. MPS yapının 10-1000 kHz aralığında ters beslem $C^{-2}$ -V eğrileri kullanılarak hesaplanan temel elektrik parametreleri .....	27
Çizelge 4.2. Kondüktans yöntemi ile elde edilen $N_{ss}$ ve onların $\tau$ değerleri.....	33



## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. MS yapının, metal ve n-tipi yarıiletkenin kontak yapılmadan önce, $\Phi_M > \Phi_S$ durumdaki enerji bant diyagramının şematik gösterimi.....	6
Şekil 2.2. MS yapının metal ve n-tipi yarıiletken kontak yapıldıktan sonraki enerji bant diyagramının şematik gösterimi. ....	7
Şekil 2.3. Doğrultucu M/n-tipi S kontağın düz beslem ve ters beslem altında enerji bant diyagramlarının şematik gösterimi .....	8
Şekil 2.4. Termiyonik emisyon modeline göre oluşturulmuş ideal I-V karakteristiği. Ekli küçük resim I-V eğrisini yarılogaritmik ölçüde gösterir .....	10
Şekil 2.5. Bir MIS veya MOS aygıt için elektrik eşdeğer devre (a) Tek enerji düzeyi için, (b) birbirinden farklı enerji düzeyleri için.....	12
Şekil 2.6. MPS veya MIS yapılarda (a) $N_{ss}$ ve $R_s$ etkilerini içeren eşdeğer devre, (b) $C_p$ ve $G_p$ içeren eşdeğer devre .....	12
Şekil 3.1. Üretilen Au/(ZnO:CeO <sub>2</sub> :PVP)/n-Si Schottky diyotların enerji bant diyagramı (a), kullanılan empedans ölçüm sisteminin eşdeğer elektrik devresinin şematiği (b), ve ölçüm sisteminin şematiği (c).....	19
Şekil 4.1. MPS yapının belirli frekanslardaki C-V eğrileri .....	21
Şekil 4.2. MPS yapının belirli frekanslardaki G/ $\omega$ -V eğrileri .....	22
Şekil 4.3. MPS yapının belirli frekanslardaki $R_i$ -V eğrileri .....	23
Şekil 4.4. MPS yapının 1 MHz'de $C_m$ -V ve $C_c$ -V eğrileri .....	24
Şekil 4.5. MPS yapının 1 MHz'de $G_m/\omega$ -V ve $G_c/\omega$ -V eğrileri .....	25
Şekil 4.6. MPS yapının belirli frekanslarda $C^{-2}$ -V eğrileri.....	26
Şekil 4.7. MPS yapının $\Phi_B$ -ln(f) ve $N_d$ -ln(f) eğrileri.....	28
Şekil 4.8. MPS yapının $W_d$ -ln(f) ve $R_s$ -ln(f) eğrileri.....	28
Şekil 4.9. MPS yapının belirli frekanslarda $N_{ss}$ -V eğrisi.....	30
Şekil 4.10. MPS yapının belirli beslem voltajlarında C-ln(f) eğrileri.....	31
Şekil 4.11. MPS yapının belirli beslem voltajlarında G/ $\omega$ -ln(f) eğrileri.....	31
Şekil 4.12. MPS yapının belirli beslem voltajlarında $G_p/\omega$ -ln(f) eğrileri .....	32

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.13. MPS yapının $N_{ss}-(E_c-E_{ss})$ ve $\tau-(E_c-E_{ss})$ eğrileri .....	33
Şekil 4.14. MPS yapının yarılogaritmik I-V eğrisi ve $N_{ss}-(E_c-E_{ss})$ profili.....	35



## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
$\epsilon_s$	Yarıiletkenin elektriksel geçirgenliği
$\epsilon_0$	Boş uzayın elektriksel geçirgenliği
$\chi_s$	Elektron afinitesi
$A^{**}$	Richardson sabiti
$C$	Kapasitans
$C_c$	Düzeltilmiş kapasitans değeri
$C_D$	Yarıiletken tükenim tabakasının kapasitansı
$C_{hf}$	Yüksek frekansta kapasitans
$C_i$	Arayüzey tabakanın kapasitansı
$C_{lf}$	Düşük frekansta kapasitans
$C_m$	Ölçülen kapasitans değeri
$C_p$	Paralel kapasitans
$Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$	Seryum Nitrat Hekzahidrat
$CeO_2$	Seryum dioksit
$C-V$	Kapasitans-Gerilim
$C_{ss}$	Arayüzey Kapasitansı
$d_i$	Arayüzey tabaka kalınlığı
$E$	Elektrik alan
$E_C$	Yarıiletkenin iletkenlik bantı
$E_F$	Fermi enerjisi
$E_g$	Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
$E_{ss}$	Arayüzey durumu enerjisi
$E_v$	Yarıiletkenin valans bantı
$F$	Sığa birimi-Farad
$G$	İletkenlik
$G_c$	Düzeltilmiş iletkenlik değeri
$G_m$	Ölçülen iletkenlik değeri

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b><math>G_p</math></b>	Paralel iletkenlik
<b>Hz</b>	Frekans birimi-Hertz
<b><math>I_0</math></b>	Ters beslem doyum akımı
<b><math>I_F</math></b>	Düz-beslem akımı
<b><math>I_R</math></b>	Ters-beslem akımı
<b>I-V</b>	Akım-Gerilim
<b>I</b>	Toplam Akım
<b><math>I_{ms}</math></b>	Metalden yarıiletkene olan akım akışı
<b><math>I_{sm}</math></b>	Yarıiletkenden Metale olan akım akışı
<b>J</b>	Akım yoğunluğu
<b><math>m^*</math></b>	Elektronun etkin kütlesi
<b><math>m_0</math></b>	Serbest elektron kütlesi
<b>n</b>	İdealite faktörü
<b>NaOH</b>	Sodyum Hidroksit
<b><math>N_A</math></b>	Katkı atomlarının (alıcı) yoğunluğu
<b><math>N_D</math></b>	Katkı atomlarının (verici) yoğunluğu
<b><math>N_{ss}</math></b>	Arayüzey durumları
<b><math>R_i</math></b>	Direnç
<b><math>R_s</math></b>	Seri direnç
<b><math>R_{sh}</math></b>	Kısa devre direnci
<b>T</b>	Periyot
<b><math>V_0</math></b>	Kesme potansiyeli
<b><math>V_i</math></b>	Uygulanan voltaj
<b><math>V_{bi}</math></b>	Kurulma potansiyel
<b><math>V_D</math></b>	Difüzyon potansiyeli
<b><math>V_F</math></b>	Düz-beslem voltajı
<b><math>V_R</math></b>	Ters-beslem voltajı
<b><math>W_d</math></b>	Tükenme bölgesi genişliği
<b>Y</b>	Admitans
<b>Z</b>	Empedans
<b><math>Zn(CH_3CO_2)_2 \cdot 2H_2O</math></b>	Çinko asetat dihidrat
<b>ZnO</b>	Çinko oksit

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
$Q_{ss}$	Arayüzey yük yoğunluğu
$\Phi_B$	Bariyer yüksekliği
$\Phi_{B(C-V)}$	Bariyer yüksekliği (C-V' den ölçülen)
$\Phi_{B(I-V)}$	Bariyer yüksekliği (I-V' den ölçülen)
$\Phi_{B0}$	Sıfır beslem bariyer yüksekliği
$\Phi_e$	Etkin bariyer yüksekliği
$\Phi_M$	Metalin iş fonksiyonu
$\Phi_S$	Yarıiletken iş fonksiyonu
$\tau$	Arayüzey durumu ömrü/gevşeme süresi

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>AC</b>	Alternatif akım
<b>C-V</b>	Kapasitans-Voltaj
<b>C-V-f</b>	Kapasitans-Voltaj-Frekans
<b>FTIR</b>	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
<b>G-V</b>	İletkenlik-Voltaj
<b>G-V-f</b>	İletkenlik-Voltaj-Frekans
<b>I-V</b>	Akım-Voltaj
<b>MFS</b>	Metal-Ferroelektrik-Yarıiletken
<b>MIS</b>	Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (Metal-Insulator-Semiconductor)
<b>MOS</b>	Metal-Oksit-Yarıiletken (Metal-Oxide-Semiconductor)
<b>MPS</b>	Metal-Polimer-Yarıiletken (Metal-Polymer-Semiconductor)
<b>MS</b>	Metal-Yarıiletken (Metal-Semiconductor)
<b>PVP</b>	Polivinilpirolidon
<b>SD</b>	Schottky Diyot
<b>TE</b>	Termiyonik emisyon
<b>UV-VİS</b>	Ultraviyole-Görünür Işık Spektroskopisi
<b>XRD</b>	X-Işımları Kırınımı

## 1. GİRİŞ

Oksit/yalıtkan, polimer, ferroelektrik gibi bir ince film termal, püskürtme, sol-jel ya da elektrospinning gibi yöntemlerle yarıiletken yüzeyi üzerinde büyütüldüğünde, arayüzey filmin kalınlığına bağlı olarak, metal/yarıiletken (MS) tipi Schottky yapı metal/arayüzey/yarıiletken (MIS, MPS, MFS) tipi Schottky yapı ya da kapasitöre dönüşür. Genelde, arayüzey ince filmin kalınlığı 3 nm'den büyük ise, arayüzey tabaka ile yarıiletken arasına fabrikasyon sırasında veya kristaldeki bir örgü bozukluğundan dolayı oluşan arayüzey durumları ( $N_{ss}$ ) yarıiletken ile yük alış-verişinde, daha küçük ise metal ile yük alış-verişinde bulunurlar. Yani, ince film kalınlığına göre, arayüzey durumları ile yarıiletken ya da metal arasında elektron geçişleri veya alış-verişi olur [1-5]. Çünkü bu arayüzey durumları veya tuzakları yeniden birleşme merkezleri gibi davranırlar. Örneğin boş iken elektronları yakalayabilir ve dolu ise bir dış etki altında elektron salabilir. Bunun yanı sıra, M/S arayüzeyinde oluşan doğal veya yapay yollarla oluşan ince filmin homojenliği, onun dielektrik değeri ve kalınlığı, hem kapasitans-voltaj-frekans (C-V-f) hem de iletkenlik-voltaj-frekans ( $G/\omega$ -V-f) ölçümlerini özellikle düşük frekanslarda, zayıf terslenme ve tükenme bölgelerinde önemli ölçüde etkilemektedir [6-9]. Bu karakteristikler üzerinde çok etkili olan diğer önemli bir parametre ise diyotun seri direncidir ( $R_s$ ). Ancak,  $R_s$  ve arayüzey tabaka sadece yığılma bölgesinde ve yüksek frekanslarda çok etkin iken  $N_{ss}$  değerleri hem tersinim hem de tükenim bölgesinde özellikle düşük ve orta frekanslarda etkindirler.

Seri direnç ( $R_s$ ) genelde ohmik ve doğrultucu kontaklar, yarıiletkenin gövde direnci, elektrik ölçümlerin alınmasında kullanılan metal teller ve laboratuvar ortamında yapıya bulaşan bazı kirliliklerden kaynaklanmaktadır. Arayüzey durumları ( $N_{ss}$ ) ise örgü bozuklukları, yarıiletkenin yüzeyinin temizlenmesi, üretim aşamasında yarıiletken yüzeyine bulaşan bazı organik kirlilikler, yarıiletkene n ve p tipi yarıiletken oluşturmak için katkılanan alıcı/verici atomların yoğunluğu ( $N_A$ ,  $N_D$ ), ve oksijen boşluklarından kaynaklanmaktadır [1, 6, 10-12].

Mevcut literatürde hem  $N_{ss}$  hem de  $R_s$ 'nin voltaja bağlı profilini elde etmek için kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır [6, 13-17]. Örneğin,  $N_{ss}$ -V eğrisi Castagne-Vapaille tarafından geliştirilen düşük-yüksek frekans yöntemi [15], Hill-Coleman yöntemi ki bu yöntem sadece C-V veya  $G/\omega$ -V verileri bir tepeye sahip ise uygulanabilir [16, 17], Nicollian-Goetzberger tarafından geliştirilen admitans ya da paralel-kondüktans yöntemi [14] gibi birçok yöntemle

elde edilebilir. Bu yöntemler arasında en doğru, hassas ve güvenilir olanı Nicollian-Goetzberger tarafında sunulan kondüktans metodu olup, geniş bir frekans ve voltaj aralığında çok sayıda C-V-f ve G-V-f eğrileri gerektirmektedir ve üstelik bu method yardımıyla arayüzey durumlarının ( $N_{ss}$ ) yaşam/gevşeme süreleri ( $\tau$ ) de hesaplanabilir. Buraya kadar bahsedilen tüm yöntemler C ve G değerlerinden elde edilir. Diğer taraftan, Card-Rhoderick yöntemi ile,  $N_{ss}$ 'nin enerji ya da voltaja bağlı profili, düz-beslem akım-voltaj ( $I_F-V_F$ ) verisinden engel yüksekliğinin ( $\Phi_B$ ) ve idealite faktörünün voltaja bağlılığını kullanılarak elde edilebilir [18].  $R_s$ 'nin voltaja bağlı profili, Ohm kanunu ( $R_i= V_i/I_i$ ), Cheung-Cheung fonksiyonları [12], ve Norde fonksiyonu [19] kullanılarak yine düz-beslem  $I_F-V_F$  verisinden elde edilebilir. Ancak, en doğru ve güvenilir yöntem, zayıf terslenim ve tükenim bölgelerindeki C-V ve G-V verilerini kullanan Nicollian-Brews yöntemi olup kuvvetli yığılım bölgesinde ölçülen C ve G değerlerinden hesaplanır [6]. Bu tez çalışmasında, elektriksel parametrelerin voltaja ve kullanılan metoda bağlı değişimini belirlemek için bu yöntemlerin çoğu kullanıldı.

Bir önceki çalışmamızda [20], hazırlanan ( $CeO_2:ZnO$ -katkılı PVP) arayüzey tabakalı ve tabakasız Au/n-Si tipi yapıların elektrik karakteristikleri hem karanlık hem de  $100 \text{ mW/cm}^2$  ışık şiddeti altındaki I-V ölçümleri kullanılarak incelendi. Hazırlanan ZnO ve  $CeO_2$  nanoyapılarının yapısal/morfolojik incelemesi ise X-ışını-kırınımı (XRD) analizi, morötesi-görünür-ışık (UV-Vis) spektroskopisi ve Fourier-dönüşümü-kızıl-ötesi (FTIR) spektroskopisi kullanılarak yapıldı. Üstelik ( $CeO_2:ZnO$ -katkılı PVP) arayüzey tabakanın, MS yapının performansı üzerine etkisini araştırmak için, hem Au/n-Si (MS) hem de Au/( $CeO_2:ZnO$ -katkılı PVP)/n-Si (MPS) tipi Schottky yapıları aynı n-Si alttaş üzerine aynı şartlar altında hazırlandı. Ardından, hem karanlık hem de ışık altında I-V ölçümlerinden elde edilen sonuçlar kıyaslandığında; Au ile n-Si arasında bir ( $CeO_2:ZnO$ -katkılı PVP) polimer arayüzey tabakanın kullanılması ile MS yapının performansı oldukça artmaktadır. Örneğin, bu arayüzey tabakanın küçük kaçak akım,  $R_s$ ,  $N_{ss}$  değerlere ve yüksek engel yüksekliği, doğrultma oranı (RR), kısa devre direnci ( $R_{sh}$ ) değerlerine yol açmaktadır.

Bundan dolayı, bu tez çalışmasında ise, MPS tipi Schottky yapının temel elektriksel parametreleri, geniş bir voltaj aralığında ölçülen akım-voltaj (I-V) ve geniş bir frekans (2 kHz-1 MHz) ve voltaj ( $\pm 4,5 \text{ V}$ ) aralığında ölçülen C-V-f ve G-V-f ölçümleri kullanılarak elde edildi.  $N_{ss}$  ve onların  $\tau$ 'ları, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında en doğru ve güvenilir yöntem olan admitans/paralel-kondüktans yöntemi ile elde edildi. Ayrıca,  $N_{ss}$ -V profili

düşük-yüksek frekans kapasitans yöntemi ile elde edildi. Deneysel sonuçlar incelendiğinde tüm elektriksel parametrelerin frekans ve voltajın fonksiyonları olduğu görüldü.

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde MS, MIS ve MPS yapıların önemi ve onları performansını etkileyen temel nedenler hakkında gerekli açıklamalar yapıldı. İkinci bölümde ise bu yapıların temel özellikleri, enerji bant diyagramlarının oluşumu, termal denge durumu, doğru ve ters beslem altındaki enerji bant diyagramlarının davranışları ve akım-iletim mekanizmaları hakkında gerekli teorik alt bilgi verildi. Üçüncü bölümde ise, numunelerin her türlü temizleme ve fabrikasyon aşamaları ve kullanılan elektriksel ölçüm sistemi hakkında gerekli açıklamalar verildi. Dördüncü bölümde de, elde edilen tüm elektriksel ölçümlerle ilgili gerekli grafik ve tablolar oluşturularak mevcut literatür ile kıyaslamalı olarak yorumlandı. Tezin son bölümünde ise, elde edilen sonuçların genel bir değerlendirmesi ve bu ve benzeri konularda ileride çalışacak araştırmacılar için kısa bazı önerilerde bulunuldu.



## 2. TEORİK BİLGİLER

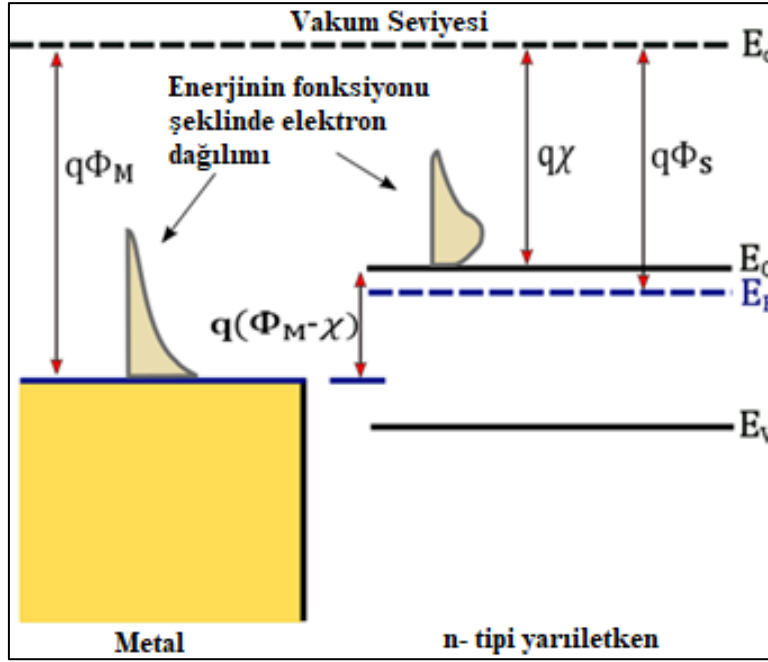
### 2.1. Metal-Yarıiletken Kontakların/Diyotların Teorisi

Metal-yarıiletken (MS) kontaklar, cazip özellikleri ve elektronik, optoelektronik ve elektrokimyasal cihazlarda kullanımları nedeniyle oldukça fazla bilimsel ve teknik ilgi çeker. MS kontaklar doğrultucu kontak (ya da Schottky kontak) veya doğrultucu olmayan (ya da ohmik kontak) olarak davranabilir. Doğrultucu kontak uygulanan beslem voltajının polaritesi değiştirildiğinde lineer olmayan akım-voltaj (I-V) karakteristiği gösterir. Düz beslem uygulandığında akım geçirirken ters beslem uygulandığında geçirmez, ters beslemde yüksek akım direnci vardır. Ohmik kontak uygulanan voltajın polaritesinden bağımsız olarak lineer I-V karakteristiği gösterir. Bu davranış akımın iki beslem yönünde de eşit ve kolayca geçişine izin verecek bir düşük kontak direnci gerektirir [21]. İki tip kontakın da elektronik cihazların performansında önemli bir rolü vardır [22]. Bu bölümde bariyer oluşum mekanizması, akım iletim mekanizmaları ve kontakın I-V karakteristiklerini değiştirebilen, arayüzey durumları ve hayali kuvvetlerden dolayı M/S arasında oluşan potansiyel engel yüksekliğindeki düşüş gibi önemli olguları içeren MS kontakların arka plan fiziki ele alınmaktadır.

### 2.2. İdeal Metal-Yarıiletken (MS) Doğrultucu Kontaklar veya Schottky Diyotlar

Schottky-Mott modeline göre, n-tipi bir yarıiletken ile  $\Phi_M > \Phi_S$  durumda olan bir MS yapının kontak öncesi enerji bant diyagramı Şekil 2.1'de verilmiştir. Burada,  $\Phi_M$  ve  $\Phi_S$ , sırasıyla, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarıdır. Metal veya yarı iletkenin iş fonksiyonları, metal ve yarıiletkenin Fermi enerji seviyesindeki ( $E_F$ ) bir elektronu koparıp vakum seviyesine ( $E_0$ ) çıkarmak için gereken enerji olarak tanımlanır. İletkenlik bandının ( $E_c$ ) alt kenarı ve vakum seviyesi arasındaki enerji farkı yarıiletkenin elektron afinitesi (yakınlığı) ( $\chi_s$ ) olarak bilinir. Metal ve yarıiletkenin elektron yoğunluk dağılımı da Şekil 2.1'de verilmiştir. Fermi enerji seviyelerindeki farktan dolayı, yarıiletkenin elektronlarının enerjilerinin metalin elektronlarının enerjilerinden yüksek olduğu açıkça görülmektedir [23-25]. Metal ve yarıiletken kontak yaptığında, termal denge sağlanana ve metal ve yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleri hizalanana kadar, yarıiletkenden metale ve metalden de yarıiletkene yük transferi olur. Bu yük akışı, Şekil 2.2'de görüldüğü üzere, yarıiletkende bir tükenim bölgesi

oluşumuna neden olur. Bu bölge literatürde bu konulardaki önemli çalışma ve katkılarında dolayı W. Schottky tabakası olarak bilinir ve bu tabaka hareketli yüklerden arındırılmış yüksek dielektrik sabitli bir tabakadır. Metalini elektron yoğunluğu yarıiletkenin elektron yoğunluğundan yüksek olduğu için, metaldeki negatif yüklü bölgenin genişliği, bu ölçüde, ihmal edilebilecek kadar küçüktür.



Şekil 2.1. MS yapının, metal ve n-tipi yarıiletkenin kontak yapılmadan önce,  $\Phi_M > \Phi_S$  durumundaki enerji bant diyagramının şematik gösterimi [26]

Termal dengede, metal tarafındaki elektron ‘potansiyel engeli’ aşağıdaki eşitlik ile verilir:

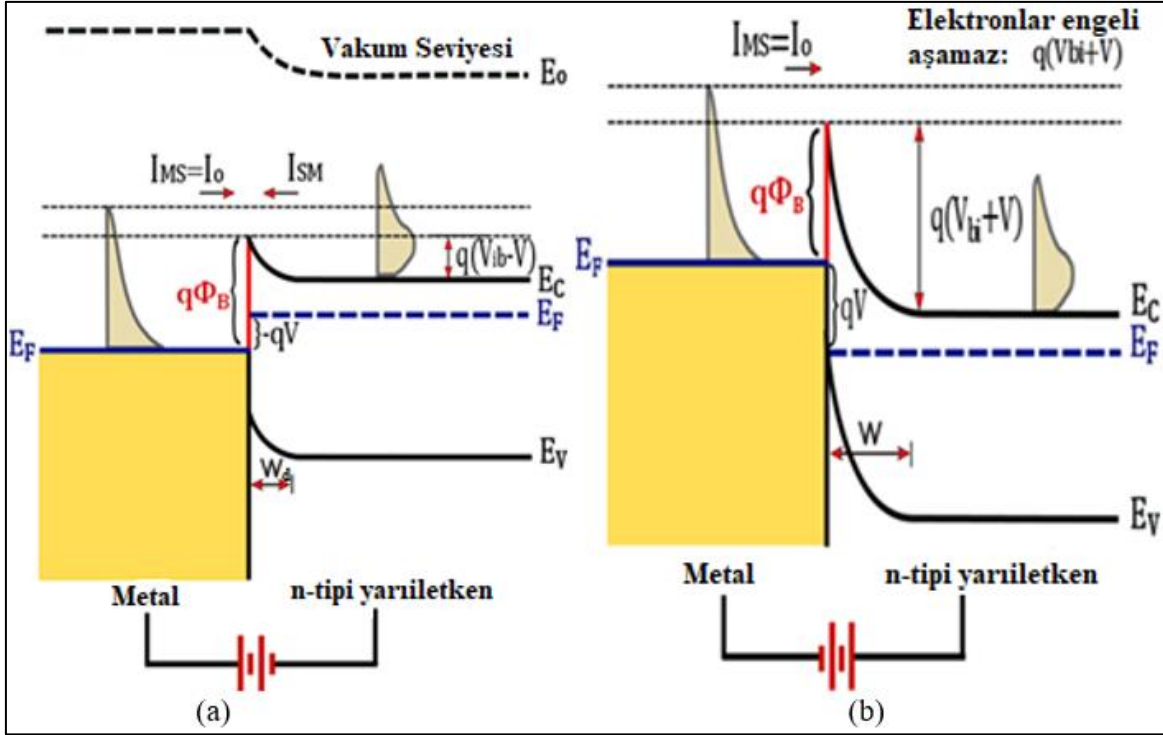
$$\Phi_B = \Phi_M - \chi_s \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte  $\Phi_B$  Schottky bariyer yüksekliğidir. Ancak, yarıiletkenden metale akan elektronlar da benzer bir bariyer ile karşılaşır, bu bariyer kurulma voltajı ya da yerleşik potansiyeldir (kontak potansiyel farkı) ( $V_{bi}$ ). Kurulma voltajı, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farktan aşağıdaki eşitlikte olduğu gibi saptanır:

$$V_{bi} = \Phi_M - \Phi_S \quad (2.2)$$

Bariyer oluşumu, Şekil 2.2’deki enerji bant şematik diyagramında görülebilir. Yarıiletkenin iş fonksiyonu ( $\Phi_S$ ) metalin iş fonksiyonu ile aynı ifadededir, ama Fermi seviyesinin katkı





Şekil 2.3. Doğrultucu M/n-tipi S kontağın düz beslem ve ters beslem altında enerji bant diyagramlarının şematik gösterimi [26]

Bariyerin küçülmesi nedeniyle, daha fazla elektron kolaylıkla yarıiletkenden metala geçebilir.  $I_{SM}$  akımı,  $I_{SM} = I_0 \exp(V/V_T)$  eşitliğindeki gibi, üstel artarak termal dengedeki değerinin ( $I_0$ ) üzerine çıkar.  $V_T$  parametresi termal enerjiyi ( $=kT/q$ ) ifade eder. Burada  $k$  Boltzmann sabiti,  $K$  Kelvin cinsinde sıcaklık,  $q$  elektron yüküdür. Schottky bariyer yüksekliği beslem ile değişmez ve  $I_{MS}$  termal dengedeki değerinde ( $I_0$ ) sabit kalır. Dolayısıyla düz beslemde kontakta geçen net akım aşağıdaki eşitlikteki gibidir.

$$I = I_{SM} - I_{MS} = I_0 \exp\left(\frac{V}{V_T}\right) - I_0 = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

Şekil 2.3'te görülebileceği gibi n-tipi yarı iletkene metale göre pozitif bir voltaj ( $V$ ) uygulandığında MS kontak ters kutuplu duruma gelir. Bu öngerilim koşulu altında, tükenim bölgesinin büyür ve kurulma potansiyelin değeri termal dengedeki değerinden ( $qV_{bi}$ ),  $q(V_{bi}+V)$  değerine yükselir. Böylece yarıiletkenden metale geçmeye çalışan elektronların gördüğü engel artar. Bu durumda kurulma voltajındaki artış yarıiletkenden metale elektron akışı olmasını engeller. Şekil 2.3'te görülebileceği gibi, elektron yoğunluğu dağılımı bariyerden ( $qV_{bi} + V$ ) düşük olduğu için, birkaç yüz milivolt değerinde beslem yarıiletkenden metale elektron geçişini engellemek için yeterlidir. Bu yüzden, yarıiletkenden metale

elektron akışından kaynaklanan  $I_{SM}$  akımı sıfır olur. Ancak, Schottky bariyer yüksekliği ( $\Phi_B$ ) sabit kaldığı için metalden yarıiletkenine geçen  $I_{MS}$  akımı  $I_0$  değerinde sabit kalır. Yani, pozitif bariyer yüksekliği olan MS kontak düz-beslem altında yüksek bir akım geçirerek ve ters-beslem altında akımı neredeyse tamamen durdurarak belirgin bir doğrultucu davranış sergiler.

#### 2.4. Termiyonik Emisyon (TE) Mekanizması

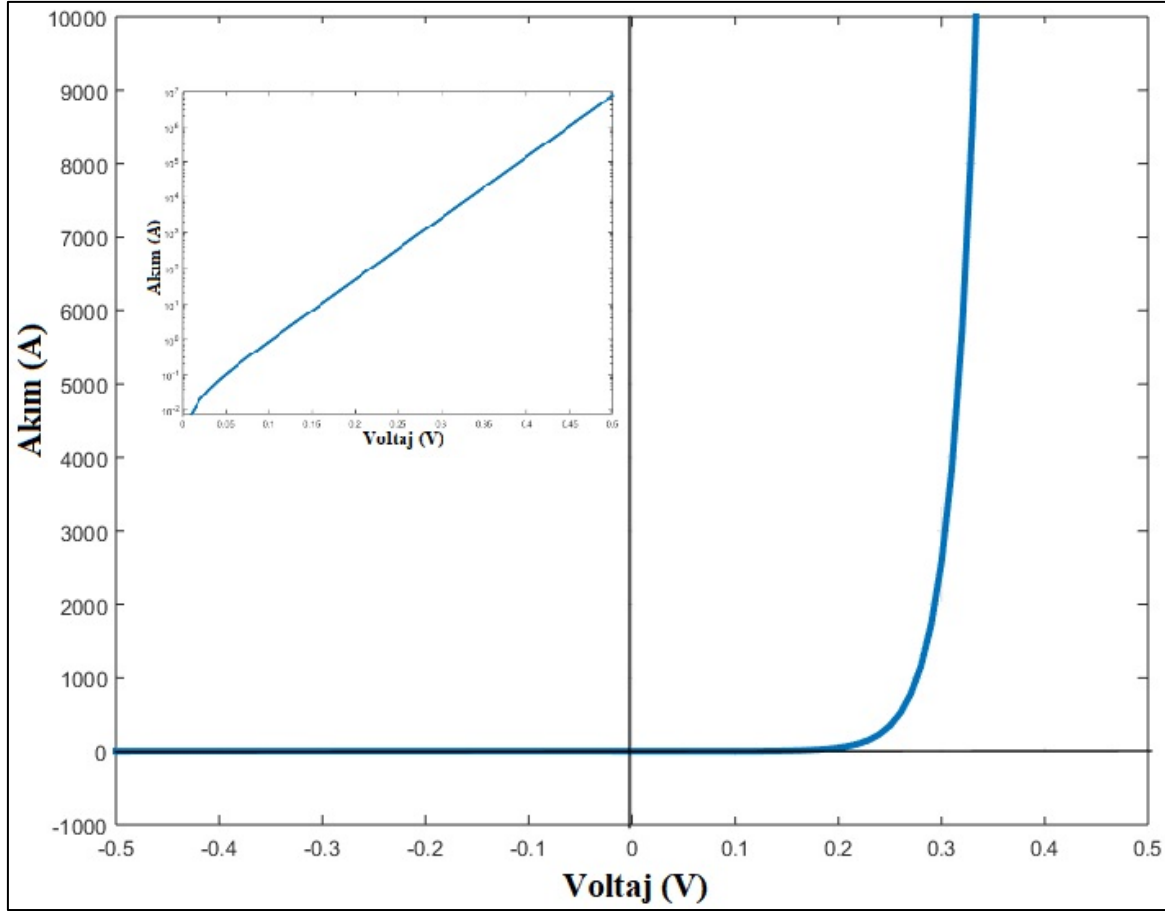
Orta oranda katkılı yarıiletkenlerde termiyonik emisyonun Schottky kontaklardaki baskın akım akış mekanizması olması beklenir. TE teorisine göre, sadece enerjisi potansiyel bariyerini geçmeye yetecek kadar yüksek olan yük taşıyıcıları diyot akımı oluşabilir. Schottky diyotun ideal karakteristikleri Eş. 2.4 ve Eş. 2.5 ile tanımlanabilir.

$$I = I_0 \left( \exp\left(\frac{q}{kT}\right) - 1 \right) = AA^{**}T^2 \exp\left(\frac{-\Phi_B}{kT}\right) \left( \exp\left(\frac{q}{kT}\right) - 1 \right) \quad (2.4)$$

Burada  $I_0$  doyum akımıdır.  $A^{**}$  ile ifade edilen parametre ise Richardson sabitidir ve Eş. 2.5 ile tanımlanır.

$$A^{**} = \frac{4\pi m^* k^2}{h^3} \quad (2.5)$$

Etkin Richardson sabiti yarıiletkenin n-tipi veya p-tipi olmasına bağlı olarak elektronun ve deşğin etkin kütlelerinin ( $m^*$ ) vakumdaki hareketsiz elektron kütlelerine ( $m_0$ ) oranına dayanan bir yarıiletken malzeme sabitidir. TE modeline göre ideal I-V eğrisi Şekil 2.4’de görülebilir. Diyot akımının düz/doğru-beslem bölgesinde üstel artarken ters-beslem bölgesinde,  $V_R$  termal enerjinin yaklaşık dört katından fazlayken ( $V > 4q/kT$ ),  $I_0$  değerinde doyuma uğrar. İdeal bir diyot için, yarı-logaritmik I-V eğrisi, Şekil 2.4’e ek küçük egride görüldüğü üzere, eğimi bir olan düz bir çizgi olmalıdır.



Şekil 2.4. Termiyonik emisyon modeline göre oluşturulmuş ideal I-V karakteristiği. Ekli küçük resim I-V eğrisini yarı-logaritmik ölçüde gösterir [26]

## 2.5. MS ve MIS Tipi Yarıiletken Aygıtlarda İdeal Durumdan Sapmalara Neden Olan Faktörler

Arayüzey tabakalı ve tabakasız metal-yarıiletken (MS) yapılar da ideal durumdan sapmalara neden olan etkenlerin başında; Arayüzey yükleri, hareketli iyonik yükler, tuzak veya tuzak yükleri, oksit yükleri, bu yapıların seri direnci ve metal ile yarıiletken arasında (M/S arasında) oluşan engelin biçimi gelir [1]. Hareketli iyonların mevcudiyeti genelde MS ve MIS tipi yapılarının hazırlanması sırasında kullanılan malzemelerdeki safsızlıklardan, kimyasal maddelerin bu iyonları ihtiva etmesinden kaynaklanır ve bir dış elektrik alan etkisi altında kolayca hareket ederek bu aygıtların kararlılıklarını oldukça etkilerler [1, 28-30].

Tuzak veya arayüzey yükleri ise genelde arayüzey tabaka ve yarıiletken arayüzeyinde mevcut olan kimyasal yapı bozuklukları, katkılanan alıcı/verici katkı atomları, periyodik örgüdeki kusurlardan meydana gelir. Bu sebeple, arayüzey tabakada oluşan elektron-hol/deşik çiftlerinin bir kısmı oksit veya arayüzey tabakada tuzaklanabilir ve sonuç olarak

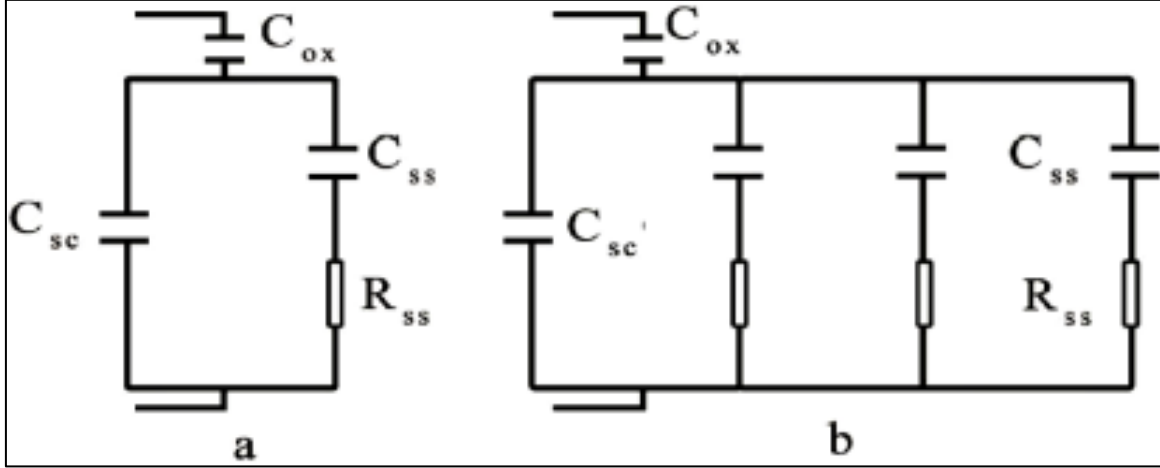
hem I-V hem de Z-V ölçümlerini oldukça etkileyebilir. Oksit veya arayüzey tabakada tuzaklanan yükler, arayüzeye homojen olarak dağıldığından dolayı genellikle arayüzey tabaka ile yarıiletken arayüzeyine yerleşmezler. Terslenim bölgesinden yığılma bölgesine doğru gidiş ve dönüş sırasında C-V eğrilerinde dipollerin geçici polarizasyonu nedeniyle kapasitans değerleri arasında farklılıklar gözlenebilir. Tuzaklanmış sabit oksit yükleri genellikle pozitifdir ve oksidasyon hızına, tavlama şartları ile sıcaklığına ve yarıiletkenin yönelimine bağlıdır. Arayüzey durumları veya tuzakları, çok kısa sürelerde yarıiletkenle yük alış-verişinde bulunarak eklemde yasak enerji bandındaki izinli durumlara geçebilirler [1, 28, 29]. Arayüzey durumlarından bazıları, alıcı (acceptor) veya verici (donor) tip veya III-V tipte olabilirler. İdeal bir MIS veya MOS tipi diyot/kapasitör için, C-V eğrileri genelde frekanstan bağımsız olup voltajla değişmektedir. Ancak uygulamalarda durum yukarıda açıklanan nedenlerden dolayı oldukça farklılıklar gösterebilir. Bir dış AC sinyal altında bu tuzaklardaki yükler tetiklenerek C-V eğrilerini frekansa bağlı kılar. Arayüzey tuzaklarında tuzaklanmış yüklerin yoğunluğu ( $Q_{ss}$ ), yarıiletkene katılan katkı atomlarının konsantrasyonlarından fazla etkilenmez. Bu arayüzey durumları/tuzakları uzay yükü kapasitesinin gerçek değerine ( $C_{sc}$ ) ilave bir kapasite ve direnç etkisi sağlarlar. Birim-enerji başına arayüzey-yükü olarak tanımlanan  $N_{ss}$  değerleri aşağıdaki eşitlikle gösterilebilir [1].

$$N_{ss} = \frac{dQ_{ss}}{dE} \quad (2.6)$$

Arayüzey kapasitansı ise aşağıdaki eşitlik ile verilir.

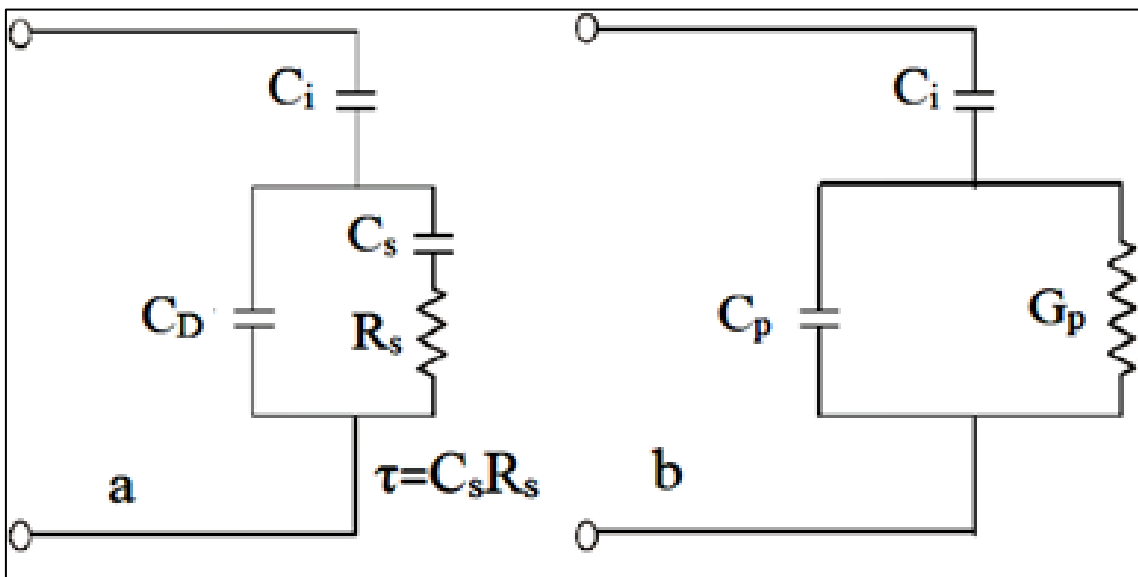
$$C_{ss} = \frac{dQ_{ss}}{dE} A_{0x} \quad (2.7)$$

Burada  $A_{0x}$  diyot alanıdır. Uzay-yükü kapasitansı,  $N_{ss}$  ve  $R_s$  etkisini içeren eşdeğer paralel-kondüktans devresi aşağıdaki şekilde gösterilebilir [1].



Şekil 2.5. Bir MIS veya MOS aygıt için elektrik eşdeğer devre (a) Tek enerji düzeyi için, (b) birbirinden farklı enerji düzeyleri için

Yukarıda açıklandığı gibi, arayüzey düzeyleri/tuzakları ve oksit yüklerinin mevcudiyetinden dolayı MIS veya MOS yapının empedans ölçümleri olan Kapasitans/Kondüktans-Voltaj eğrileri ( $C/G-V$ ) ideal durumdan oldukça saparlar. Çünkü bir kristal örgüdeki bozukluklar, katkılanan yabancı katkı atomları, kristal yüzeyinin temizlenmesi ve fabrikasyon, metal ile yarıiletken arayüzeyinde ve yasak enerji aralığına lokalize olmuş çok sayıda izinli-enerji düzeyleri veya tuzakları oluşturur ve bunlar genelde bir elektronik aygıtın performansını olumsuz yönde etkiler [1, 28-30]. Bu arayüzey durumlarının etkisini içeren bir eşdeğer devre aşağıdaki şekilde temsil edilebilir.



Şekil 2.6. MPS veya MIS yapılarında (a)  $N_{ss}$  ve  $R_s$  etkilerini içeren eşdeğer devre, (b)  $C_p$  ve  $G_p$  içeren eşdeğer devre

Burada  $C_i$  ve  $C_D$  sırası ile arayüzey tabakanın ve yarıiletkenin tüketim tabakasının kapasitanslarıdır. Bazı durumlarda arayüzey tabakanın kapasitansı  $C_i$  yerine  $C_{ox}$  ile de temsil edilir. Burada  $C_s R_s$  çarpanı da arayüzey tuzaklarındaki yüklerin  $\tau$ 'larını temsil eder.  $N_{ss}$ 'lerin  $\tau$ 'ları da C-V ve G-V ölçümleri üzerinde oldukça etkilidir. Çünkü tuzaktaki yüklerin ömrü  $10^{-6}$  sn mertebesinde iken ölçülen C-V ve G-V ölçümlerinin periyotları ( $T=(2\pi f)^{-1}$ ) artan frekansla hızla azalır. Eğer  $N_{ss}$ 'lerin  $\tau$  değerleri T ile kıyaslandığında daha küçük iseler (düşük frekanslardaki durum) tuzaktaki yükler rahatlıkla AC sinyali takip edebilir ve dolayısıyla hem C hem de G değerine önemli bir ek katkı sağlarlar. Ancak artan frekanslar ile bu katkı azalır ve yeterince yüksek frekanslarda ihmal edilebilecek ölçüde küçüktür.

Şekil 2.6 (a)'nın paralel kolu, Şekil 2.6 (b)'deki gibi frekans ile değişen paralel kapasitans ( $C_p$ ) ve ona bağlı paralel iletkenlik ( $G_p$ ) olarak temsil edilebilir. Paralel koldaki admitans ( $Y=1/Z$ ) aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$Y = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = j\omega C_D + \frac{1}{R_s + (j\omega C_s)^{-1}} = G_p + j\omega C_p \quad (2.8)$$

Burada  $G_p$  ve  $C_p$  gösterilen ifadeler ise aşağıdaki eşitlikler ile ifade edildiği gibidir.

$$G_p = \frac{1}{R_p} = \frac{C_s \omega^2 \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.9)$$

$$C_p = C_D + \frac{C_s}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.10)$$

Devrenin toplam empedans ( $Z$ ) değeri ise aşağıda verilen eşitlikle temsil edilir.

$$Z = \frac{1}{j\omega C_i} + \frac{1}{G_p + j\omega C_p} = -j \left( \frac{1}{\omega C_i} + \frac{\omega C_p}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2} \right) + \frac{G_p}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2} \quad (2.11)$$

Diğer taraftan MIS veya MOS yapı bir  $R_s$ 'ye sahipse, ölçülen iletkenlik ( $G_m$ ) ve kapasitans ( $C_m$ ) değerleri bu aygıtların gerçek değerlerinden farklılık gösterir. Bu durumda aygıtların gerçek G ve C değerlerini elde etmek amacıyla  $Z$ ,  $Z_1$  ve  $Z_2$  empedans ifadeleri aşağıdaki gibi temsil edilebilir.

$$Z = \frac{1}{j\omega C_m + G_m} \quad (2.12)$$

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_c + G_c} \quad (2.13)$$

$$Z_2 = \frac{1}{j\omega C_T + G_T} \quad (2.14)$$

Bu durumlarda MIS veya MOS yapıların gerçek  $C_m/G_m$ -V eğrileri  $R_s$ 'nin etkisi göz önünde bulundurularak özellikle yüksek frekanslardaki ölçümler için düzeltilmelidir. Çünkü  $R_s$  değeri genelde yüksek frekanslarda ve yığılma bölgesinde baskın iken  $N_{ss}$  düşük ve orta frekanslarda zayıf terslenim ve tükenim bölgelerinde baskındır. Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak  $C_c$  ve  $G_c$  değerleri aşağıda verilen eşitlikler ile elde edilebilir [14]. Empedans değerleri ( $Z$ ,  $Z_1$ ,  $Z_2$ ) için Eş. 2.12, Eş. 2.13 ve Eş. 2.14 düzenlenebilir ve sırasıyla Eş. 2.15, Eş. 2.16 ve Eş. 2.17'de temsil edildiği gibi yeniden yazılabilir.

$$\frac{1}{Z_1} = j\omega C_c + G_c = \left( \frac{1}{j\omega C_m + G_m} - \frac{1}{j\omega C_T + G_T} \right)^{-1} \quad (2.15)$$

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{(G_m G_T - \omega^2 C_m C_T) + j\omega(G_T C_m - C_T G_m)}{(G_T - G_m) + j(C_T - C_m)} \quad (2.16)$$

$$Z = \frac{1}{j\omega C_m + G_m} = \frac{G_m - j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} - \frac{j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.17)$$

Bu denklemlerin paydaları eşitlenip düzenlendiğinde  $G_T (=R_s^{-1})$  ve  $C_T$  değeri ihmal edildiğinde düzeltilmiş  $C_c$  ve  $G_c$  değerleri için aşağıda verilen ifadeler elde edilir.

$$C_c = \frac{C_m}{(1 - G_m R_s)^2 + \omega^2 C_m^2 R_s^2} \quad (2.18)$$

$$G_c = \frac{(G_m - G_m^2 R_s) - \omega^2 C_m^2 R_s}{(1 - G_m R_s)^2 + \omega^2 C_m^2 R_s^2} \quad (2.19)$$

Eş. 2.18 ve Eş. 2.19 sadeleştirilerek ifade edildiğinde;  $C_c$  ve  $G_c$  aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$G_c = \frac{(G_m^2 - \omega^2 C_m^2)a}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.20)$$

$$C_c = \frac{(G_m^2 - \omega^2 C_m^2)C_m}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.21)$$

$$a = G_m - (G_m^2 - \omega^2 C_m^2)R_s \quad (2.22)$$

Burada aygıtın gerçel  $R_s$  değeri, Eş. 2.17'deki  $Z$  empedansının gerçel kısmı olup, yüksek frekansta ve kuvvetli yığılma bölgesinde ölçülen  $C_{ma}$  ve  $G_{ma}$  değerleri kullanılarak hesaplanabilir. Ancak voltaja bağlı değerlerde ölçülen tüm voltaj aralığında ölçülen  $C_{mi}$  ve  $G_{mi}$  değerleri kullanılarak da hesaplanabilir.

$$R_s = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + \omega^2 C_{ma}^2} \quad (2.23)$$

$C_{ma}$  ve  $G_{ma}$  ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleridir.  $R_s=0$  durumunda  $C_c=C_m$  ve  $G_c=G_m$  olur.



### 3. DENEYSEL YÖNTEM

Bu çalışmada, Au/(CeO<sub>2</sub>:ZnO-katkılı PVP)/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotlar direnci 1-10 Ω.cm, oryantasyonu <100>, kalınlığı 3x10<sup>-2</sup> cm, çapı ~5 cm ve bir yüzü parlatılmış fosfor katkılı Si (n-Si) alttaş üzerinden üretilmiştir. (CeO<sub>2</sub>:ZnO-katkılı PVP) ince organik alaşım, Au ve n-Si alttaş arasında, geleneksel yalıtkanlar yerine ince film olarak kullanılmak üzere, spin-coating yöntemi ile büyütülmüştür.

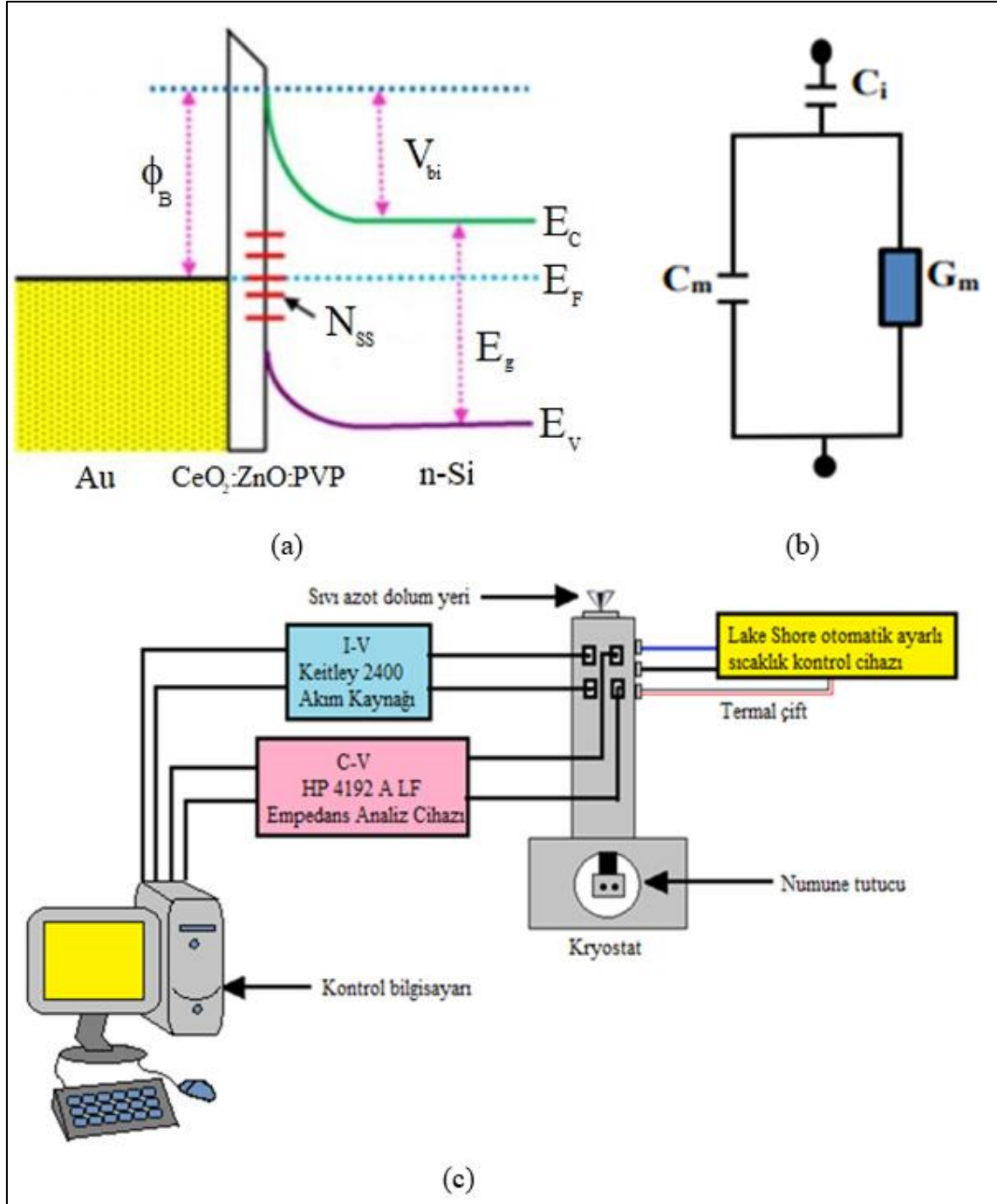
Üretim aşamasından önce, n-Si alttaş (1:1:5) oranında H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O çözeltisi ile ultrasonik banyoda bir dakika süresince temizlendikten sonra 18 MΩ dirençli saf su ile durulanmıştır ve ardından nitrojen (N<sub>2</sub>) gazı kurutulmuştur. Hemen sonra, n-Si alttaş vakum çemberine alınarak yüksek saflıkta (%99,995) Al metali, 1 µTorr basınç altında, 150 nm kalınlıkta, n-Si alttaşın arka yüzüne termal olarak büyütülmüştür. Düşük direnç sağlanması ve iyi ohmik kontak oluşturulması için, n-Si/Al yapı 500 °C'de, N<sub>2</sub> ortamında tavlansmıştır.

Seryum dioksit (CeO<sub>2</sub>) nanoyapıların hazırlanma işlemlerinde yüksek saflıkta (≥%99) seryum nitrat heksahidrat (Ce(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O), yüksek saflıkta (≥%99) sodium hidroksit (NaOH) ve saf su kullanılmıştır. 4,3 g Ce(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O 20 ml saf su le karıştırılarak molaritesi 0,5 M olan çözeltisi hazırlandı ve aynı işlem 0,4 g NaOH için de 20 ml saf su kullanılarak tekrarlandı ve bu iki çözelti karıştırılarak 15 dk ultrasonik banyoda bırakıldı. Daha sonra, hazırlanan karışım 10 dk bekletilerek çökmesi sağlandı. Çökmeden sonra fazlalık sıvı pipet yardımıyla ayrıştırılarak kalan karışıma 20 ml saf su eklendi. Bu karışım ultrasonik banyoda 30 sn tutuldu ve oda sıcaklığında 15 dk çökelmeye bırakıldı. Çökme işlemleri 5 kere tekrarlandı ve karışım oda sıcaklığında bekletilerek kurutuldu. Sonuç olarak elde edilen toz halinde Ce(OH)<sub>2</sub> 1 saat süresince 450 °C de tavlandı.

Çinko oksit (ZnO) nanoyapıların hazırlanma işlemlerinde yüksek saflıkta (≥%99) çinko asetat dihidrat heksahidrat (Zn(CH<sub>3</sub>CO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O), yüksek saflıkta (≥%99) sodium hidroksit (NaOH) ve saf su kullanılmıştır. 2,2 g Zn(CH<sub>3</sub>CO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O 20 ml saf su le karıştırılarak molaritesi 0,5 M olan çözeltisi hazırlandı ve aynı işlem 0,4 g NaOH için de 20 ml saf su kullanılarak tekrarlandı ve bu iki çözelti karıştırılarak 15 dk ultrasonik banyoda bırakıldı. Daha sonra, hazırlanan karışım 10 dk bekletilerek çökmesi sağlandı. Çökmeden sonra fazlalık sıvı pipet yardımıyla ayrıştırılarak kalan karışıma 20 ml saf su eklendi. Bu karışım

ultrasonik banyoda 30 sn tutuldu ve oda sıcaklığında 15 dk çökelmeye bırakıldı. Çökelme işlemleri 5 kere tekrarlandı ve karışım vakumlu fırında 90°C’de 1 saat bekletilerek kurutuldu. Sonuç olarak elde edilen toz halinde Zn(OH)<sub>2</sub> 1 saat süresince 220 °C de tavlandı.

Ohmik kontak oluşturulduktan sonra, hazırlanan (CeO<sub>2</sub>:ZnO-katkılı PVP) organik çözelti n-Si altaşın ön yüzünde büyütülmüştür. (CeO<sub>2</sub>:ZnO-katkılı PVP) arayüzey tabakanın kalınlığı ( $d_i$ ), arayüzey tabakanın kapasitansı kullanılarak ( $C_i = \epsilon' \epsilon_0 A / d_i$ ), yaklaşık 100 nm olarak hesaplanmıştır. Son olarak, yüksek saflıkta (%99,995) Au metali 150 nm kalınlıkta ve  $7.85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$  alanında doğrultucu kontaklar oluşturmak için (CeO<sub>2</sub>:ZnO-katkılı PVP) arayüzey tabakana üzerine termal buharlaştırma ile kaplanarak Au/(CeO<sub>2</sub>:ZnO-katkılı PVP) /n-Si (MPS) tipi Schottky diyotların üretim aşaması tamamlanmıştır. Üretilen Au/(CeO<sub>2</sub>:ZnO-katkılı PVP)/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotların, empedans ölçüm sisteminin ve empedans ölçüm sisteminin elektrik devresinin şematikleri Şekil 3.1’de verilmiştir. Üretim işlemleri, CeO<sub>2</sub> Ve ZnO nanoyapıların yapısal/morfolojik özellikleri, X-ışını-kırınımı (XRD) analizi, morötesi-görünür-ışık (UV-Vis) spektroskopisi ve Fourier-dönüşümü-kızıl-ötesi (FTIR) spektroskopisi incelemeleri daha önceki bir çalışmada yayınlanmıştır. Tüm empedans ölçümleri dış etkenlerin sonuçları etkilemesini önlemek amacıyla VPF-475 kriyostat içerisinde  $5 \times 10^{-4}$  Torr basınç altında alınmıştır.

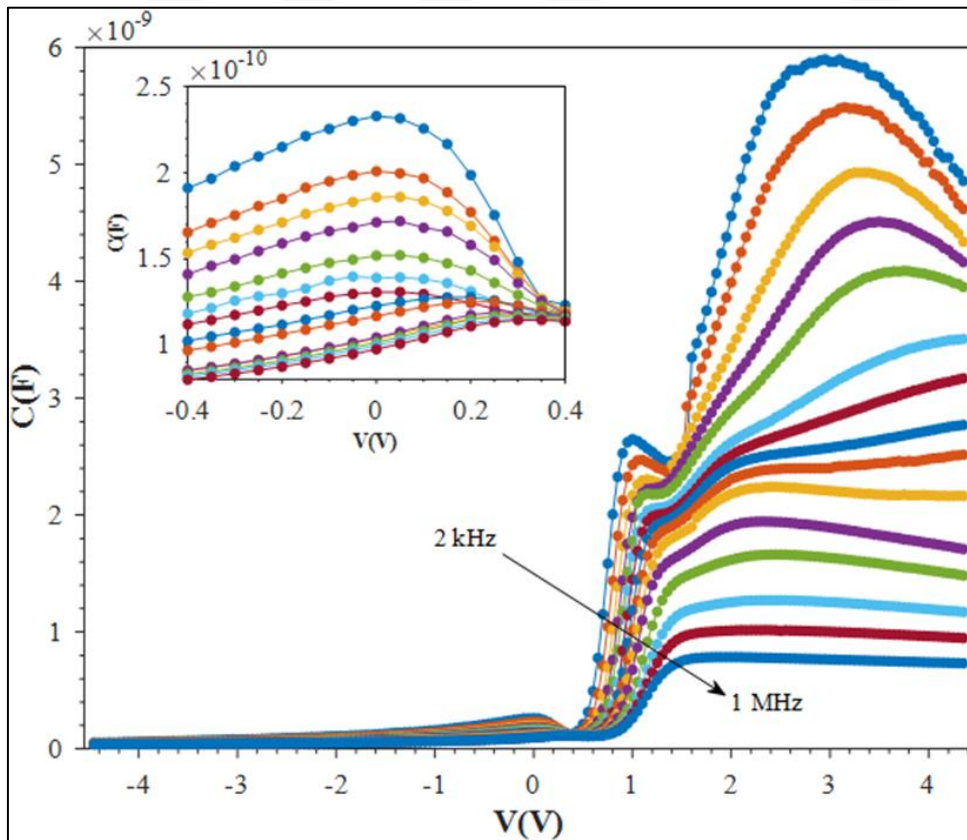


Şekil 3.1. Üretilen Au/( $\text{CeO}_2\text{:ZnO}$ -katkılı PVP)/n-Si Schottky diyotların enerji bant diyagramı (a), kullanılan empedans ölçüm sisteminin eşdeğer elektrik devresinin şematığı (b), ve ölçüm sisteminin şematığı (c)



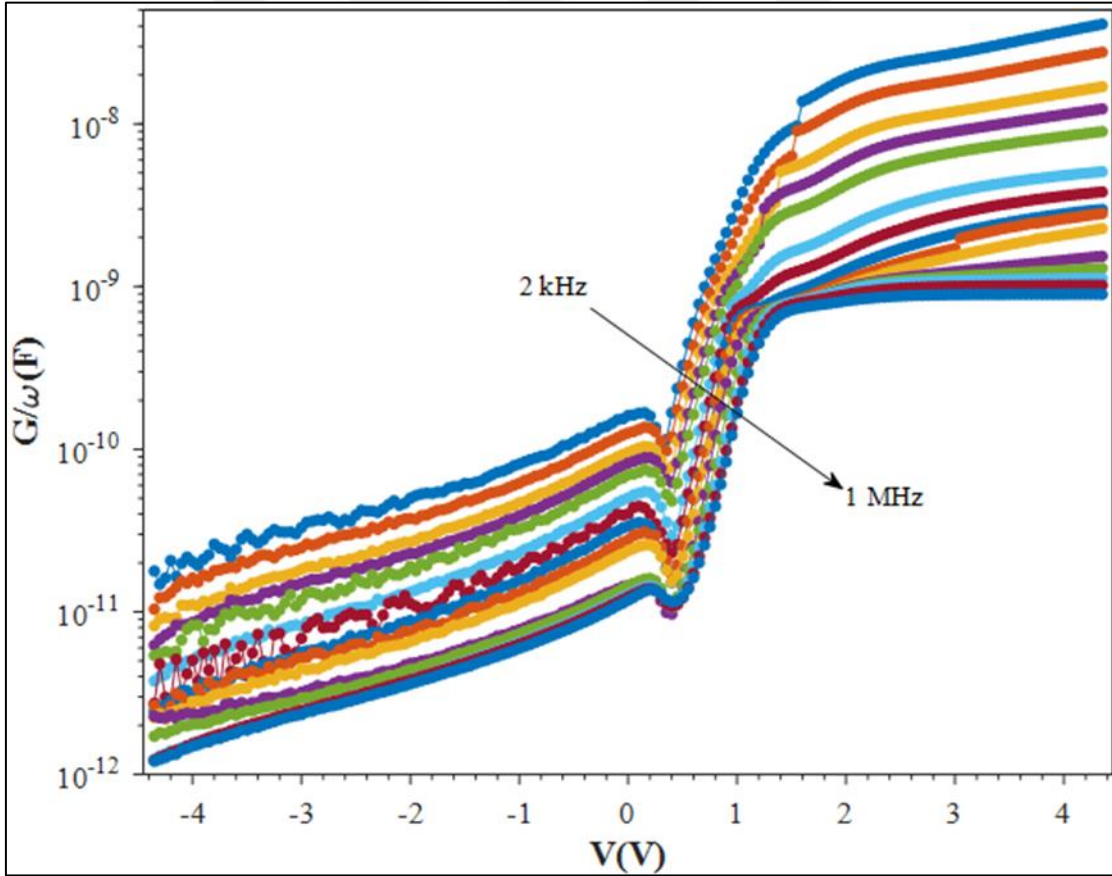
#### 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Au/(CeO<sub>2</sub>:ZnO-katkılı PVP) /n-Si (MPS) tipi Schottky diyotların frekansa bağlı temel elektriksel parametreleri ve bariyer oluşumu hakkında bilgi edinmek amacıyla C-V ve G/ω-V ölçümleri, 2 kHz-1 MHz geniş frekans aralığı ve ±4,5 V geniş voltaj aralığında alınmış ve Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Bu şekillerde görülebileceği gibi farklı frekanslardaki C-V ve G/ω-V eğrileri, ±4,5V aralında, özel bir N<sub>ss</sub> yoğunluğu ve onların rahatlama süreleri (τ), polarizasyon süreçleri ve R<sub>s</sub>’ye bağlı olarak farklı şekiller almıştır. Örneğin, Şekil 4.2’de görüldüğü üzere, C-V eğrileri, özellikle düşük frekanslarda belirgin olan, 3 anormal tepeye sahiptir. Bu tepeler, zayıf-terslenme bölgesi (~0 V), tükenim bölgesi (~1 V), ve yığılma bölgesine (~2,5 V) karşılık gelir. Bu tepelerin büyüklükleri artan frekans ile azalırken pozitif beslem bölgesine kayar. İlk iki tepenin varlığı, düşük frekanslarda, özel bir N<sub>ss</sub> yoğunluk-dağılımı ve onların rahatlama süreleri (τ), ve polarizasyon süreçleri ile açıklanabilir. Ancak, son tepe R<sub>s</sub> ve arayüzey etkisinin sonucudur, çünkü Schottky diyota uygulanan beslem voltajı tükenim tabakası, R<sub>s</sub> ve arayüzey tabaka arasında paylaşılır [1, 4-10, 15, 17].



Şekil 4.1. MPS yapının belirli frekanslardaki C-V eğrileri

Arayüzey durumları elektron-hol-çifti-oluşumu/yeniden-birleşme merkezleri olarak davranarak, boşken yükleri tuzaklar ve doluyken, bir dış elektrik etkisi altında bulduklarında, yükleri serbest bırakır. Tuzakların rahatlama zamanları ( $\tau$ ) ve uygulanan periyod ( $T=1/2\pi f$ ) karşılaştırıldığında, düşük frekanslarda ( $T \gg \tau$ ) neredeyse bütün elektronların dalgali sinyali takip edebildiği ve sonuç olarak  $C$  ve  $G/\omega$ 'nın gerçek değerlerine katkıda bulunduğu görülür [1, 6-11]. Öte yandan, frekans arttıkça, bu katkının  $C$  ve  $G/\omega$ 'nın gerçek değerleri üzerindeki etkisi azalır. Benzer olarak, düşük frekanslarda, dipoller elektrik alan etkisi altındayken kendi eksenleri çevresinde dönecek zamanları olduğu için,  $C$  ve  $G/\omega$ 'nın gerçek değerlerine katkıları artar. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 karşılaştırıldığında, materyalin endüktif davranış sergilediği,  $C$  yığılma bölgesinde azalırken,  $G/\omega$ 'nın yükseldiği görülür. Üstelik  $G/\omega$ 'nın maksimum değerinin  $C$ 'nin minimum değerine denk geldiği görülür.



Şekil 4.2. MPS yapının belirli frekanslardaki  $G/\omega$ - $V$  eğrileri

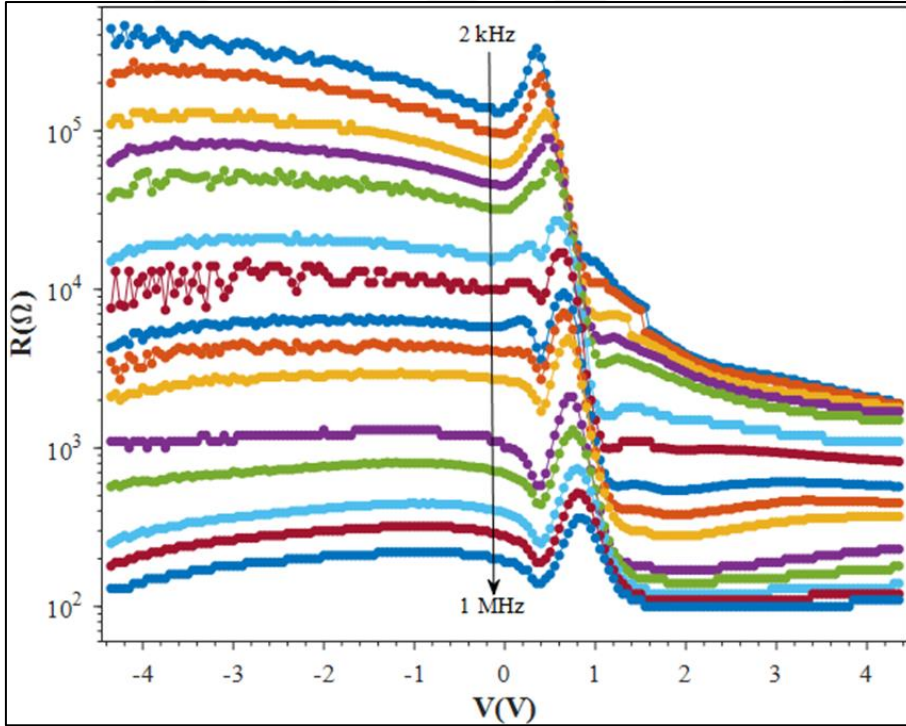
Açıktır ki, Schottky diyotun  $R_s$ 'yi ve arayüzey/yarıiletken arasında konumlanmış  $N_{ss}$ 'nin ikisi de yukarıda açıklandığı üzerine farklı kaynakları olmasına rağmen, hem  $C$ - $V$  hem de

$G/\omega$ - $V$  karakteristikleri üzerinde etkilidir. Direncin ( $R_i$ ) voltaj ve frekansa bağlı profili Nicollian-Brews [6] tarafından geliştirilmiş olan, Eş. 4.1 kullanılarak elde edilebilir.

$$R_i(V) = \frac{G_{mi}}{G_{mi}^2 + (\omega C_{mi})^2} \quad (4.1)$$

Böylece,  $R_i$ - $V$  eğrileri Eş. 4.1 kullanılarak,  $\pm 4,5$  V geniş voltaj aralığında, her frekans için elde edilerek Şekil 4.3'te verildi. Bu şekilde görüldüğü üzere,  $R_i$  değeri her frekansta uygulanan voltaja göre değişiklik göstermektedir ve 0,5 V çevresinde tepe verir, ancak  $R_i$  değeri, özellikle yeterince yüksek frekanslarda, kuvvetli yığılma bölgesinde, voltajdan neredeyse bağımsız hale gelir. Hem tepenin büyüklüğü hem de  $R_i$  değeri artan frekans ile azalır. Bu sonuçların gösterdiği üzere,  $R_s$  gerçek değeri kuvvetli yığılma bölgesine denk gelir. Eş. 4.1 yeterince yüksek frekans ve kuvvetli yığılma bölgesi için, aşağıda verildiği gibi tekrar yazılabilir:

$$R_s = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2} \quad (4.2)$$



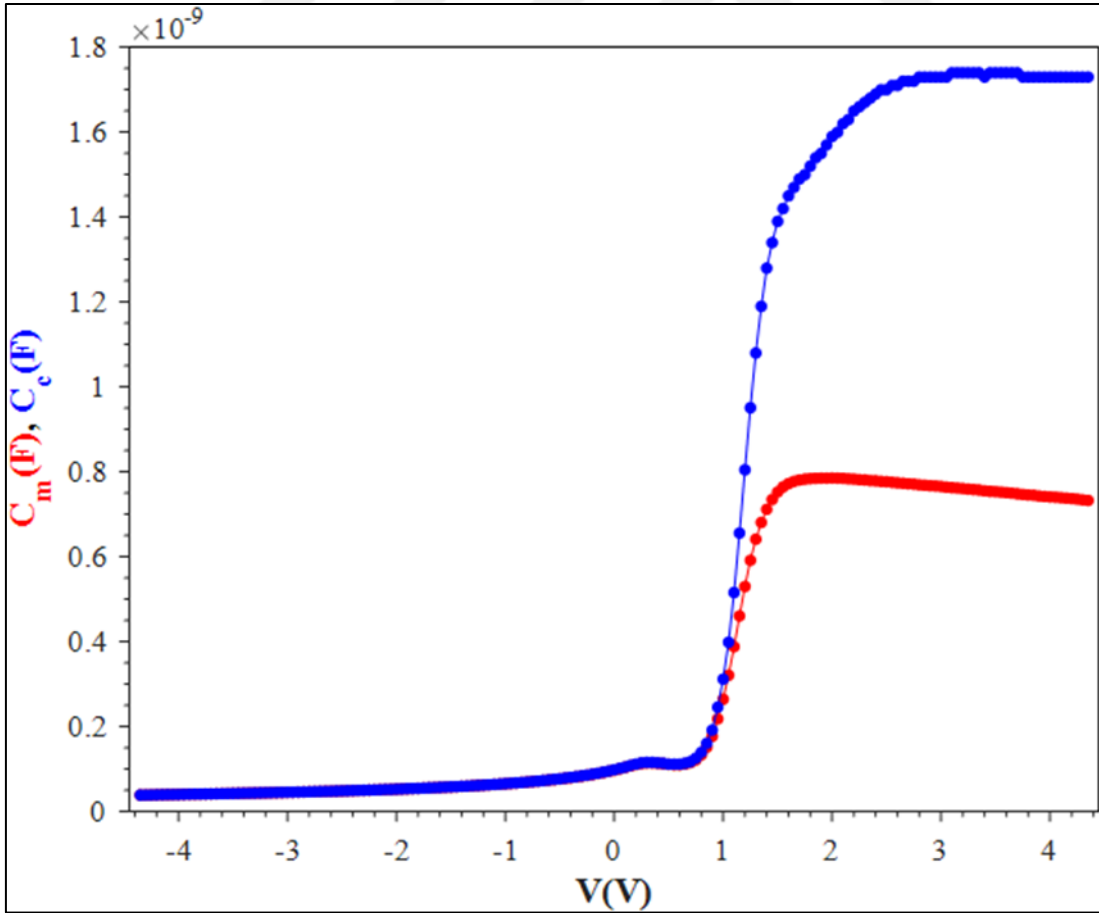
Şekil 4.3. MPS yapının belirli frekanslardaki  $R_i$ - $V$  eğrileri

$R_s$ 'nin sadece yığılma bölgesinde etkili olduğunu göstermek için, yeterince yüksek frekansta (1 MHz) hem C-V hem de  $G/\omega$ -V eğrisi, aşağıda eşitlikler kullanılarak,  $R_s$ 'nin etkisi göz önüne alınarak düzeltilmiş ve Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de verildi. Bu şekillerde açıkça görüldü gibi,  $R_s$  özellikle yığılma bölgesinde daha etkili hale gelir, ama etkisi terslenme ve tükenme bölgelerinde görmezden gelinebilir. Diğer taraftan, düzeltme sonrası C artarken  $G/\omega$  azalır ve 1,3 V'da belirgin bir tepe verir. Bu yüzden, hem C-V hem de  $G/\omega$ -V eğrisinde  $R_s$ 'yi dikkate almak önemlidir.

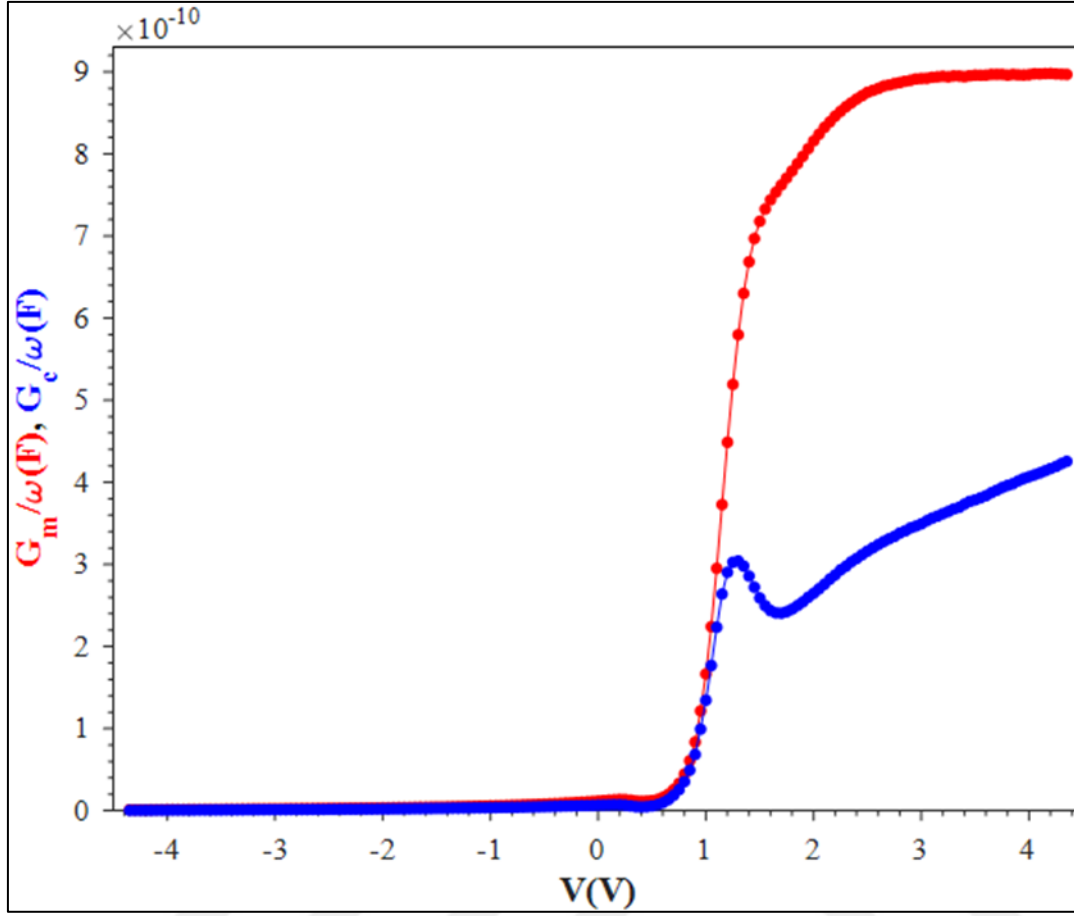
$$C_c = \frac{[G_m^2 + (\omega C_m)^2] C_m}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (4.3)$$

$$G_c = \frac{[G_m^2 + (\omega C_m)^2] a}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (4.4)$$

$$a = G_m - [G_m^2 + (\omega C_m)^2] R_s \quad (4.5)$$



Şekil 4.4. MPS yapının 1 MHz'de  $C_m$ -V ve  $C_c$ -V eğrileri

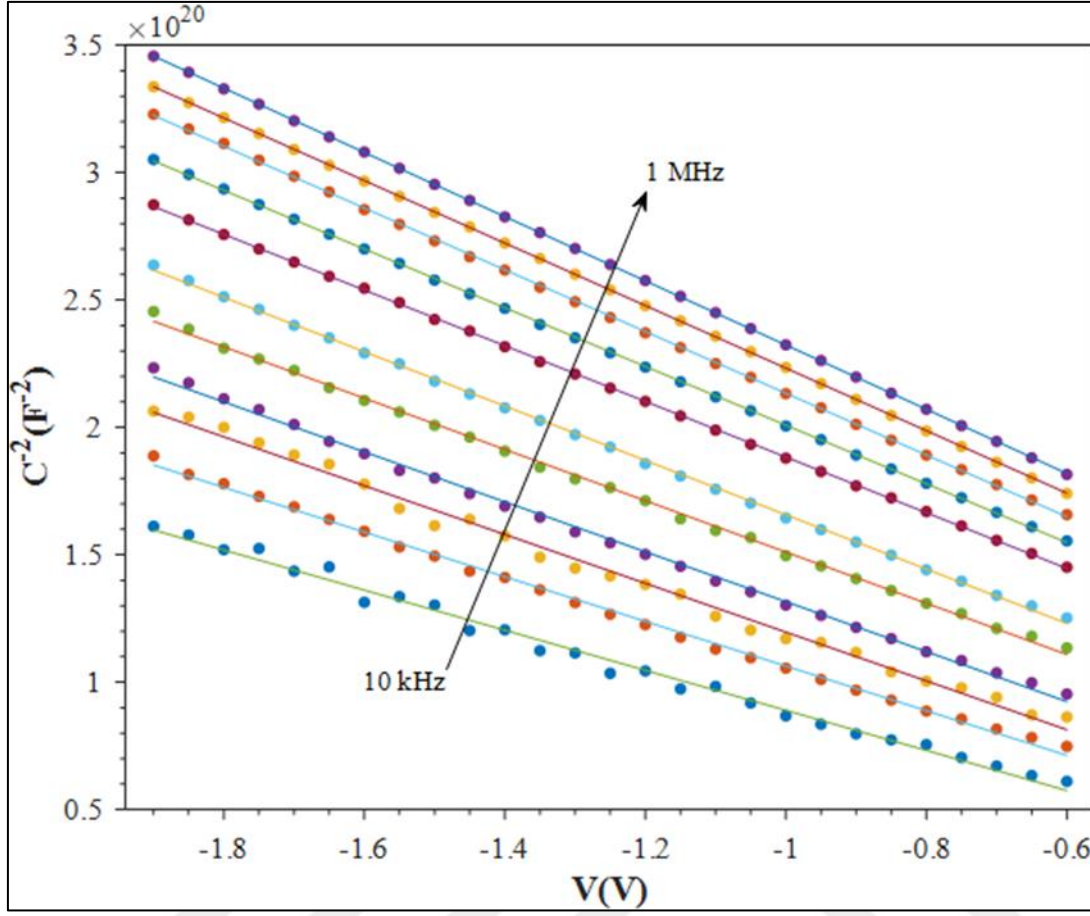


Şekil 4.5. MPS yapının 1 MHz'de  $G_m/\omega$ -V ve  $G_c/\omega$ -V eğrileri

Metal/aryüzey/n-Si (MIS) tipi yapıların voltaja bağlı tükenim bölgesi kapasitansı aşağıdaki eşitlikte verildiği gibidir [1, 6]:

$$C = \frac{|\partial Q_{SC}|}{\partial V} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s\epsilon_0 N_d}{2(V_0 - V_R - \frac{kT}{q})}} \quad (4.6)$$

Eş. 4.6'te  $\epsilon_s$ ,  $\epsilon_0$ ,  $N_d$ ,  $V_0$ , ve  $T$ , sırasıyla, yarıiletkenin geçirgenliği, vakumun geçirgenliği, verici atomlarının katkı yoğunluğu, kesme voltajı ( $V_0 = V_d - kT/q$ ), ve Kelvin cinsinde sıcaklık.  $V_0$  değeri ve difüzyon potansiyeli ( $V_d$ )  $C^{-2}$ -V eğrisinin lineer kısmının, her frekansta, sıfır volta y eksenini ( $C^{-2}$ ) kestiği noktadan bulunabilir.



Şekil 4.6. MPS yapının belirli frekanslarda  $C^{-2}$ -V eğrileri

Böylece, ters-beslem  $C^{-2}$ -V eğrilerinin lineer bölgelerinin eğim ve eksen kesme noktaları kullanılarak, difüzyon potansiyeli ( $V_d=V_0+kT/q$ ), verici atom yoğunluğu ( $N_d$ ), Fermi enerjisi ( $E_F$ ), tükenim bölgesi genişliği ( $W_d$ ), eklemdeki maksimum elektrik alan büyüklüğü ( $E_m$ ), ve M/S arasında bariyer yüksekliği oluşumu ( $\Phi_B(C-V)$ ) aşağıdaki eşitlikler kullanılarak her frekans için hesaplanıp Çizelge 4.1’de verilmiştir.

$$N_D = \frac{2}{q\epsilon_s\epsilon_0 A^2 \left(\frac{dC^{-2}}{dV}\right)} \quad (4.7)$$

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_c}{N_D}\right) \quad (4.8)$$

$$W_D = \left(\frac{2\epsilon_s V_D}{qN_D}\right)^{0,5} \quad (4.9)$$

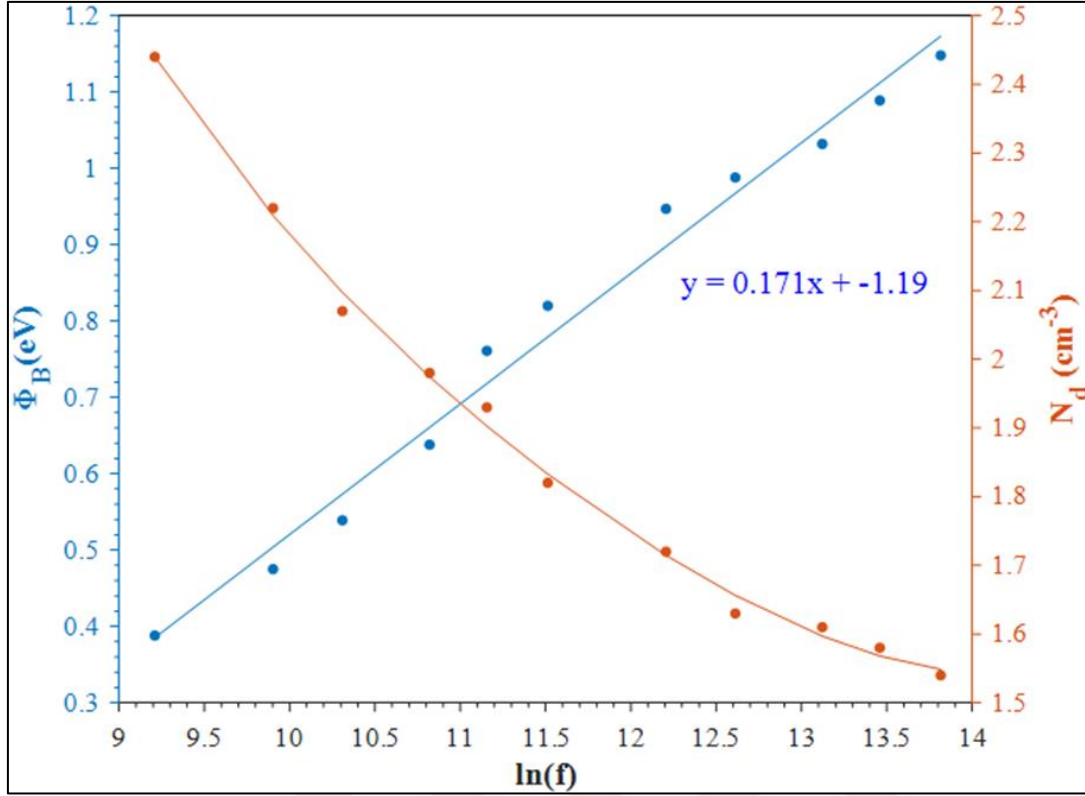
$$E_m = \left( \frac{2qN_D V_0}{\epsilon_s \epsilon_0} \right)^{0,5} \quad (4.10)$$

$$\Phi_B(C - V) = V_0 + \frac{kT}{q} + E_F = V_D + E_F \quad (4.11)$$

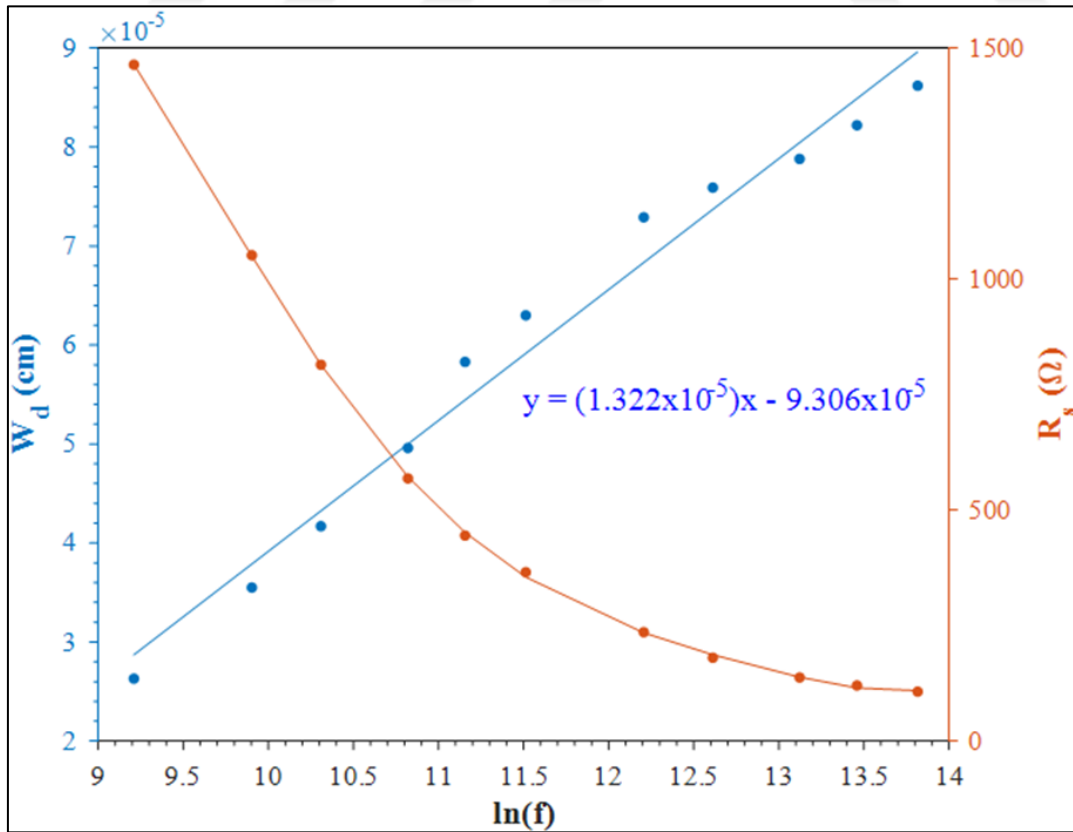
Çizelge 4.1. MPS yapının 10-1000 kHz aralığında ters-beslem  $C^{-2}$ -V eğrileri kullanılarak hesaplanan temel elektrik parametreleri

f(kHz)	ln(f)	$V_0$ (V)	$N_D$ ( $cm^{-3}$ ) $\times 10^{15}$	$E_F$ (eV)	$\Phi_B$ (eV)	$W_d$ (cm) $\times 10^{-5}$	$E_m$ (V/cm) $\times 10^4$	$R_s$ (kW) (4,5V'da)
10	9,20	0,129	2,44	0,234	0,388	2,63	0,98	1,464
20	9,91	0,213	2,22	0,236	0,475	3,55	1,20	1,051
30	10,31	0,276	2,07	0,238	0,539	4,17	1,32	0,814
50	10,82	0,374	1,98	0,239	0,638	4,96	1,51	0,568
70	11,16	0,502	1,93	0,240	0,761	5,83	1,72	0,445
100	11,51	0,554	1,82	0,241	0,820	6,30	1,76	0,365
200	12,21	0,700	1,72	0,242	0,947	7,29	1,92	0,236
300	12,61	0,719	1,63	0,244	0,988	7,59	1,89	0,180
500	13,12	0,763	1,61	0,244	1,032	7,88	1,94	0,138
700	13,46	0,820	1,58	0,245	1,089	8,22	1,99	0,120
1000	13,82	0,878	1,54	0,245	1,148	8,62	2,04	0,107

Çizelge 4.1, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de görülebileceği üzere,  $\Phi_B$  ve  $W_d$  değerleri artan frekans ile lineer artış gösterirken,  $N_d$  ve  $R_s$  değerleri üstel düşüş gösterir.  $R_s$ 'nin artan frekans ile düşmesi yığılma bölgesinde iletkenliğin (G) artması nedeniyle olur.  $R_s$  gibi,  $N_{ss}$  de admitans ölçümleri ( $Y=G+j\omega C$ ) üzerinde özellikle düşük ve orta frekanslarda etkilidir.



Şekil 4.7. MPS yapının  $\Phi_B$ - $\ln(f)$  ve  $N_d$ - $\ln(f)$  eğrileri

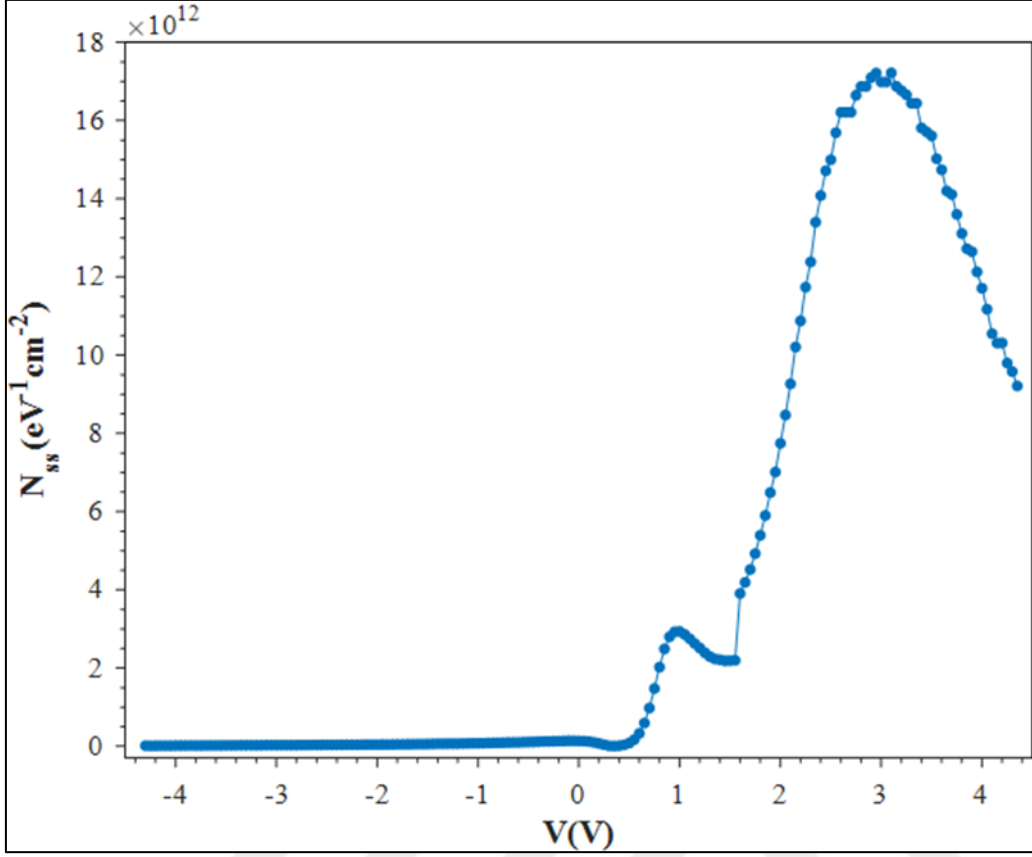


Şekil 4.8. MPS yapının  $W_d$ - $\ln(f)$  ve  $R_s$ - $\ln(f)$  eğrileri

Genellikle,  $N_{ss}$ 'nin enerji dağılımı yarıiletkenin yasak enerji aralığında ( $E_g$ ), arayüzey ve yarıiletken arasındadır. Ayrıca,  $C$  değeri, genellikle, artan beslem voltajı ile tersinim bölgesinden kuvvetli yığılma bölgesine kadar, yarıiletkenin n-tipi ya da p-tipi olmasına göre,  $S$  ya da ters- $S$  şeklinde bir eğri çizerek artar. Elektron ve holler arayüzey durumlarında tuzaklanabilir ve pozitif/negatifler yükler olarak davranırlar. Literatürde,  $N_{ss}$  ve onların  $\tau$ 'larını  $C$ - $V$  ve  $G/\omega$ - $V$  ölçümlerini kullanarak belirlemek ve karakterize etmek için kullanılabilir birçok yöntem bulunabilir [6, 14, 17, 31, 32]. Bu yöntemler arasında en basit olanlar Castagne&Vapaille tarafından geliştirilen düşük-yüksek kapasitans ( $C_{hf}$ - $C_{lf}$ ) yöntemi [15], ve Hill&Coleman yöntemidir [17], ama Hill&Coleman yöntemi sadece  $C$ - $V$  ve  $G/\omega$ - $V$  eğrileri belirgin tepeler verdiğinde kullanılabilir. Hill&Coleman'a göre, yeterince düşük frekanslarda neredeyse tüm arayüzey durumları alternatif akım (AC) sinyalini takip edebilir, böylece  $C$  değerinde önemli bir artış görülür. Tersine, yeterince yüksek frekanslarda ( $f \geq 0,5$  MHz) arayüzey durumlarının neredeyse hiçbiri AC sinyalini takip edemez ve gerçek  $C$  değerine katkıda bulunmaz. Bu nedenle,  $N_{ss}$  yoğunluğu dağılımı, yüksek ve düşük frekanstaki  $C$ - $V$  eğrilerinin arasındaki alan kullanılarak aşağıdaki eşitlik ile kolaylıkla hesaplanabilir:

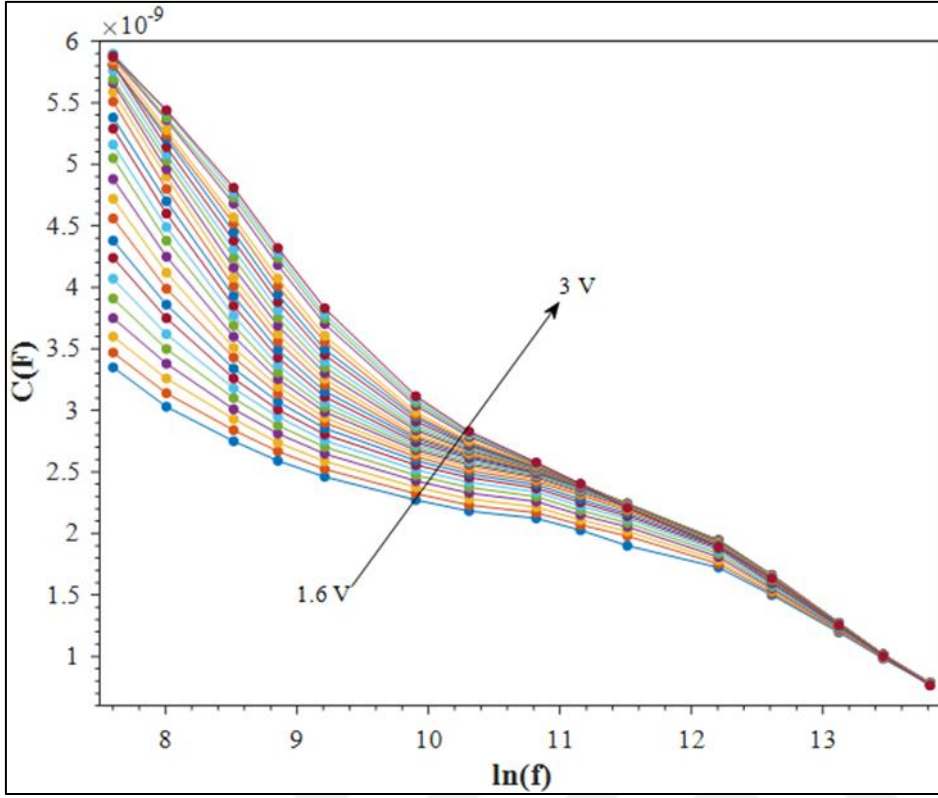
$$qAN_{ss}(V) = \left[ \left( \frac{1}{C_{lf}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} - \left( \frac{1}{C_{hf}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} \right] \quad (4.12)$$

Bu eşitlikte  $A$ ,  $C_i$ ,  $C_{lf}$ ,  $C_{hf}$  parametreleri, sırasıyla, diyotun doğrultucu kontağının alanı, arayüzey tabakanın frekansı, her voltaj için ölçülen düşük ve yüksek kapasitans değerleridir. Buna bağlı olarak,  $N_{ss}$ 'nin voltaja bağlı profili Eş. 4.12 kullanılarak hesaplandı ve Şekil 4.8'de verildi. Şekil 4.8'de görüldüğü üzere,  $N_{ss}$ - $V$  eğrisi arayüzey ve yarıiletken arasında, yarıiletkenin yasak enerji aralığında özel bir  $N_{ss}$  yoğunluğu dağılımından dolayı iki belirgin tepe vermiştir.

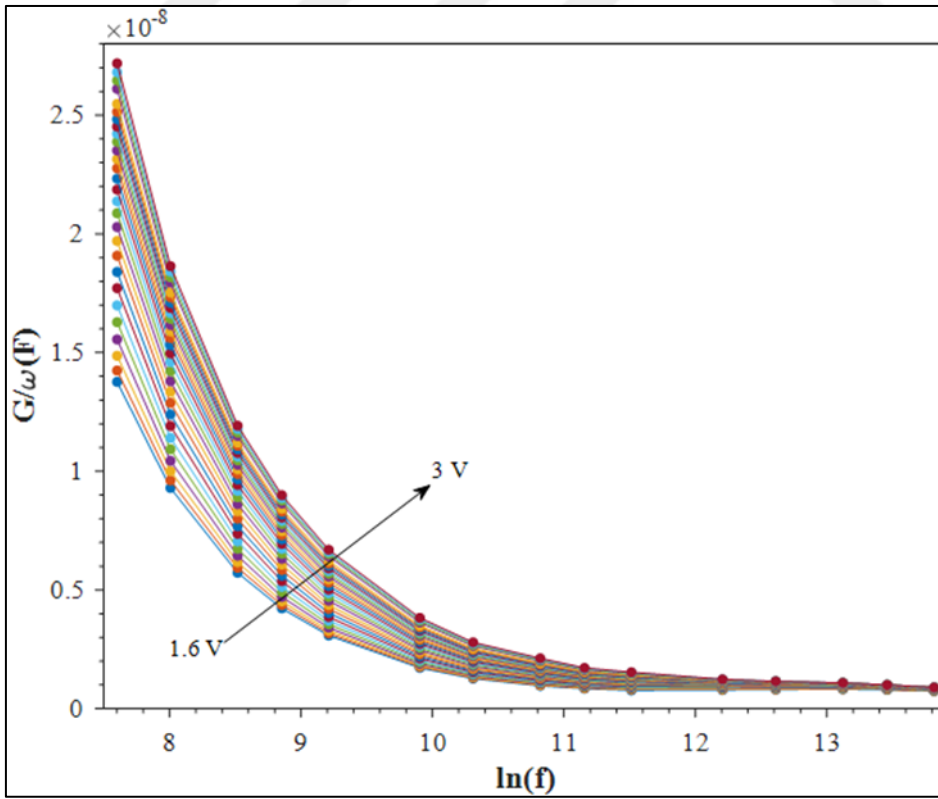


Şekil 4.9. MPS yapının belirli frekanslarda  $N_{ss}$ -V eğrisi

$N_{ss}$ 'nin enerji ya da voltaja bağlı profilini ve onların  $\tau$ 'larını elde etmek için kullanılabilecek diğer doğru ve güvenilir yöntem Nicollian&Goetzberger tarafından geliştirilmiş olan paralel-kondüktans yöntemidir [1, 6]. Bu yöntem, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da görülen, düşük, orta ve yüksek frekanslarda çeşitli beslem voltajlarında  $C-\ln(f)$  ve  $G-\ln(f)$  eğrilerini kullanmayı gerektirir.

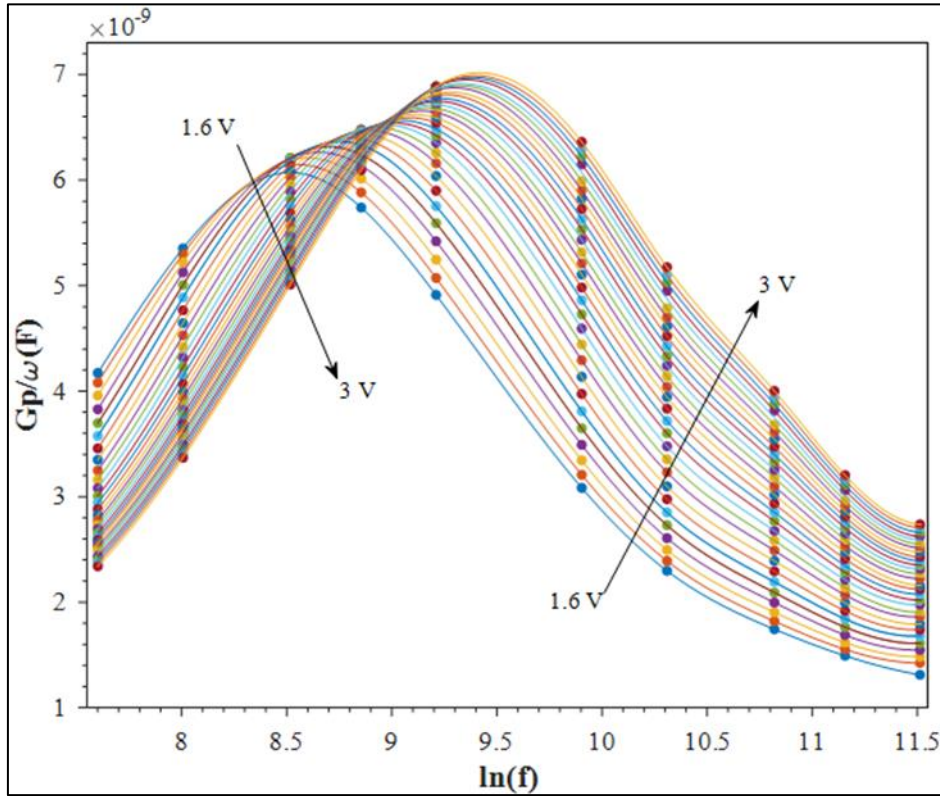


Şekil 4.10. MPS yapının belirli beslem voltajlarında C-ln(f) eğrileri



Şekil 4.11. MPS yapının belirli beslem voltajlarında  $G/\omega$ -ln(f) eğrileri

Paralel-kondüktans değeri ( $G_p/\omega$ ) arayüzey durumları elektron tuzakladığı/serbest bıraktığı zaman meydana gelen kayıp mekanizmalarını yansıtır. Paralel-kondüktans yöntemine göre,  $G_p/\omega-\ln(f)$  eğrisi  $\omega\tau=1,98$  olduğunda bir tepe verir ve bu tepe noktasında  $N_{ss}=(G_p/\omega)_{\max}/0,402qA$ . Bu nedende voltaja bağlı  $N_{ss}$  ve onların  $\tau$  değerlerini çıkarmak için  $Au/(CeO_2:ZnO\text{-katkılı PVP})/n\text{-Si}$  (MPS) tipi Schottky diyotun  $G_p/\omega-\ln(f)$  eğrisi, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 kullanılarak 1,6-3,0 V aralığında 50 mV adım genişliğinde çizildi.



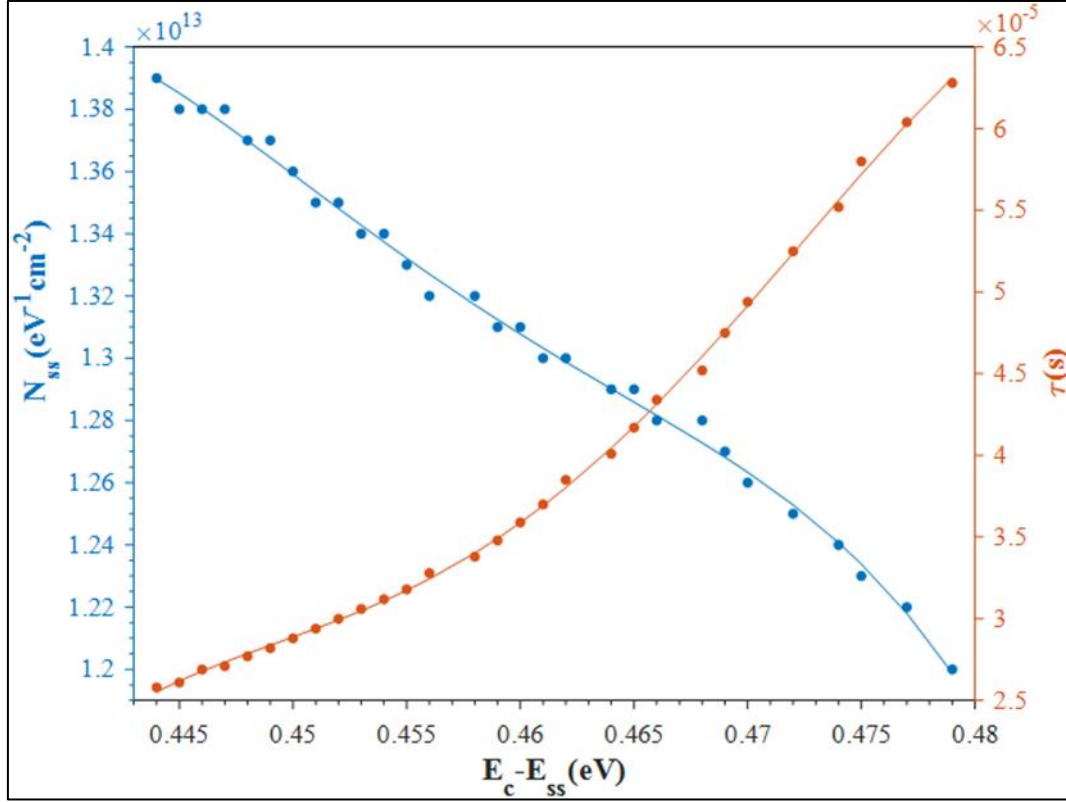
Şekil 4.12. MPS yapının belirli beslem voltajlarında  $G_p/\omega-\ln(f)$  eğrileri

$N_{ss}$ 'nin yoğunluk dağılımı uygulanan beslem voltajının fonksiyonu olarak Şekil 4.12 kullanılarak aşağıdaki eşitlik ile elde edilir [1, 6]:

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{\omega G_m C_i}{G_m^2 + \omega^2 (C_i - C_m)^2} = \frac{q A N_{ss}}{2 \omega \tau} \ln(1 + (\omega \tau)^2) \quad (4.13)$$

Böylece voltaja bağlı  $N_{ss}$  ve onların  $\tau$  değerleri Şekil 4.12'deki tepe noktaları kullanılarak hesaplanıp Şekil 4.13'de verilmiştir. Hesaplanan  $N_{ss}$  ve  $\tau$  değerleri ayrıca her beslem voltajı için Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Şekil 4.13 ve Çizelge 4.2’de açıkça görülebileceği gibi,  $N_{ss}$  değeri 0,444 eV’da  $1,39 \times 10^{13}$   $eV^{-1}cm^{-2}$ ’den üstel bir düşüşle 0,479 eV’da  $1,203 \times 10^{13}$   $eV^{-1}cm^{-2}$ ’e inerken  $\tau$  değeri 0,444 eV’da  $2,581 \times 10^{-5}$  sn’den üstel bir artışla 0,479 eV’da  $6,285 \times 10^{-5}$  sn’ye çıkmıştır. Bu değerler literatür ile karşılaştırıldığında bu cihazlar için uygun olduğu görülmüştür [33-36].



Şekil 4.13. MPS yapının  $N_{ss}$ ,  $\tau$ -( $E_c-E_{ss}$ ) eğrileri

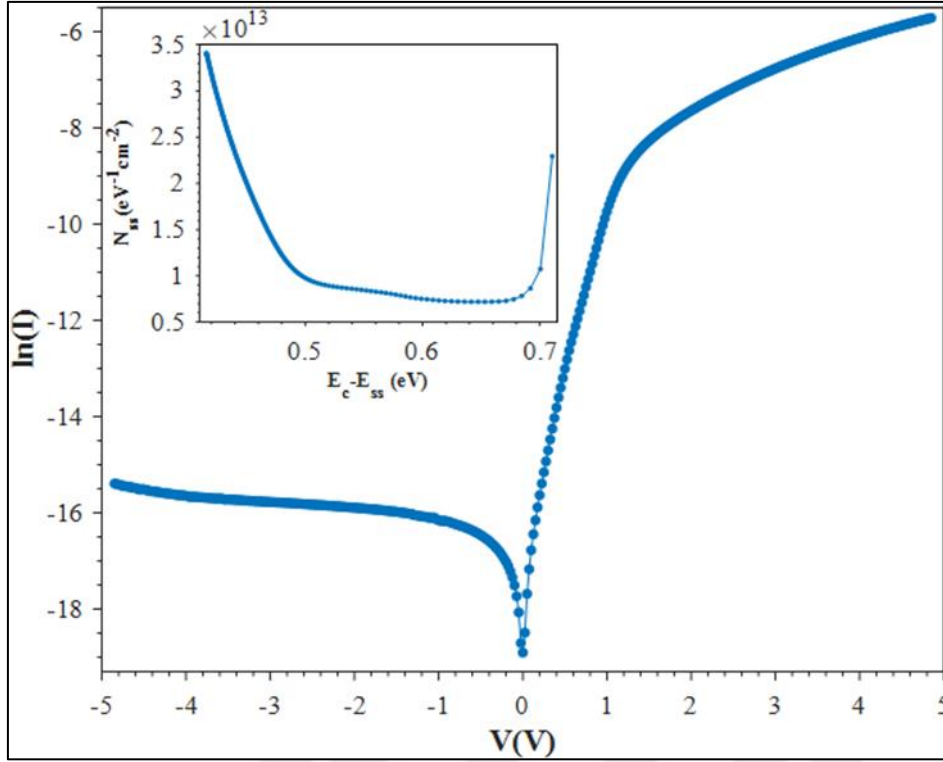
Çizelge 4.2. Kondüktans yöntemi ile elde edilen  $N_{ss}$  ve onların  $\tau$  değerleri

V (V)	$E_c-E_{ss}$ (eV)	$\ln(f)$ (Hz)	$(G_p/\omega)_{max} \times 10^{-9}$ (F)	$N_{ss} \times 10^{13}$ ( $eV^{-1}.cm^{-2}$ )	$\tau \times 10^{-5}$ (sn)
1,60	0,479	8,52	6,072	1,203	6,285
1,65	0,477	8,56	6,146	1,217	6,038
1,70	0,475	8,60	6,211	1,230	5,802
1,75	0,474	8,65	6,264	1,241	5,519
1,80	0,472	8,70	6,316	1,251	5,250
1,85	0,470	8,76	6,365	1,261	4,944
1,90	0,469	8,80	6,400	1,268	4,750
1,95	0,468	8,85	6,439	1,275	4,518
2,00	0,466	8,89	6,474	1,282	4,341
2,05	0,465	8,93	6,499	1,287	4,171
2,10	0,464	8,97	6,523	1,292	4,007
2,15	0,462	9,01	6,541	1,296	3,850

Çizelge 4.2. (devam) Kondüktans yöntemi ile elde edilen  $N_{ss}$  ve onların  $\tau$  değerleri

2,20	0,461	9,05	6,565	1,300	3,699
2,25	0,460	9,08	6,592	1,306	3,590
2,30	0,459	9,11	6,619	1,311	3,484
2,35	0,458	9,14	6,656	1,318	3,381
2,40	0,456	9,17	6,685	1,324	3,281
2,45	0,455	9,20	6,715	1,330	3,184
2,50	0,454	9,22	6,747	1,336	3,121
2,55	0,453	9,24	6,772	1,341	3,059
2,60	0,452	9,26	6,809	1,348	2,999
2,65	0,451	9,28	6,833	1,353	2,939
2,70	0,450	9,30	6,876	1,362	2,881
2,75	0,449	9,32	6,898	1,366	2,824
2,80	0,448	9,34	6,914	1,369	2,768
2,85	0,447	9,36	6,952	1,377	2,713
2,90	0,446	9,37	6,972	1,381	2,686
2,95	0,445	9,40	6,988	1,384	2,607
3,00	0,444	9,41	7,016	1,390	2,581

C/G-V ve akım-voltaj (I-V) karakteristiklerini karşılaştırmak için, I-V ölçümleri de  $\pm 5$  V beslem aralığında alınıp Şekil 4.14'de gösterilmiştir. Açıkça görülebileceği gibi,  $\ln(I)$ -V eğrisinde iyi doğrultucu davranış ve orta ileri beslem voltaj bölgesinde büyük bir lineer bölge vardır. Yeterince yüksek beslem voltajlarında, Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilen C/G-V eğrilerinde de olduğu gibi, lineerlikten uzaklaşma  $R_s$  ve arayüzey tabakanın etkisi nedeniyledir.



Şekil 4.14. MPS yapının yarı-logaritmik I-V eğrisi ve  $N_{ss}-(E_c-E_{ss})$  profili

Ayrıca,  $N_{ss}-(E_c-E_{ss})$  profili de ileri-beslem I-V eğrisinden, voltaja bağlı  $n(V)$  ve etkin bariyer yüksekliği ( $\Phi_e$ ) göz önüne alınarak, elde edilmiştir. Card-Rhoderick'e [18] göre hem  $n$  hem de  $\Phi_B$  voltaja bağlıdır, bu yüzden onların voltaja bağlı fonksiyonları sırasıyla Eş. 2.14 ve Eş. 2.15 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$n(V) = \frac{qV_i}{kT \ln\left(\frac{I_i}{I_0}\right)} = 1 + \frac{d_i}{\epsilon_i} \left( \frac{\epsilon_s}{W_D} + qN_{SS}(V) \right) \quad (4.14)$$

$$\Phi_e = \Phi_{B0} + \beta(V - IR_s) = \Phi_{B0} + (1 - 1/n(V))V \quad (4.15)$$

Eş. 4.14'te  $\epsilon_i$ ,  $\epsilon_s$ ,  $d_i$ ,  $I_0$ , ve  $W_d$  değerleri sırasıyla arayüzey geçirgenliği, yarıiletken geçirgenliği, arayüzey kalınlığı, doyum akımı ve tükenim bölgesi genişliğidir. Doyum akımının değeri  $\ln(I)$ -V eğrisinin sıfır beslem voltajında eksenini kesme değerinden elde edilir. n-Si için  $N_{ss}$ 'nin enerji pozisyonu aşağıda verildiği gibi tanımlanabilir:

$$E_c - E_{ss} = q(\Phi_e - V) \quad (4.16)$$

Böylece Eş. 2.14, Eş. 2.15 ve Eş. 2.16 kullanılarak  $N_{ss}$ 'nin enerjiye bağlı profili aşağıdaki eşitlik ile temsil edilip hesaplanmıştır:

$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left[ \frac{\epsilon_i}{l\delta} (n(V) - 1) - \frac{\epsilon_s}{w_D} \right] \quad (4.17)$$

Şekil 4.13'de açıkça görüldüğü gibi  $N_{ss}$  enerjiye bağlı değeri iletkenlik bandı ( $E_c$ ) kenarından yarıiletkenin yasak enerji bandı ortasına doğru 0,6 eV değerine kadar üstel olarak düşer ve daha sonra derin  $N_{ss}$  nedeniyle artmaya başlar. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 karşılaştırıldığında, paralel-kondüktans ve ileri beslem I-V yöntemleriyle elde edilen  $N_{ss}$  verilerinin neredeyse aynı büyüklükte ve birbirlerine uyumlu oldukları görülmektedir. Bu durum yasak enerji bandı aralığında, özel bir  $N_{ss}$  dağılımı ve onların rahatlama zamanları ile açıklanabilir. Son zamanlarda, farklı gruplar veya bilim adamları tarafından da hem I-V ölçümleri hem de Z-V ölçümleri kullanılarak bu ve benzeri yapıların elektrik, dielektrik ve optik özellikleri detaylıca açıklanmıştır [37-49]. Ancak bilim adamları arasında gerek akım iletim mekanizmaları ve gerekse metal-yarıiletken arasında oluşan engelin şekli ile temel elektrik ve dielektrik parametrelerin hesaplama yöntemleri arasında henüz tam bir uzlaşma sağlanmamıştır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Au/(CeO<sub>2</sub>:ZnO-katkılı PVP)/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotlar üretildi ve onların elektriksel ölçümleri olan I-V, C-V-f ve G-V-f ölçüm teknikleri kullanılarak detaylıca incelendi. Daha sonra 2 kHz -1 MHz frekans aralığında ölçülen C-V-f ve G/ω-V-f ölçümlerinden faydalanılarak hazırlanan MPS yapının temel elektriksel parametreleri olan difüzyon potansiyeli ( $V_D=V_0+kT/q$ ), verici katkı atomlarının yoğunluğu ( $N_D$ ), Fermi enerji düzeyi ( $E_F$ ), bariyer yüksekliği ( $\Phi_B$ ), tükenim bölgesi genişliği ( $W_d$ ), eklemdaki maksimum elektrik alan büyüklüğü ( $E_m$ ) değerleri ters beslem C<sup>-2</sup>-V grafiğinin lineer kısmının kesim noktası ( $V_0$ ) ve eğimlerinden hesaplandı ve Çizelge 4.1’de verildi. Çizelgeye bakıldığında, tüm bu elektriksel parametrelerin frekansa oldukça bağlı olduğu gözlemlendi. Bu parametrelerin frekansa bağlı değişimi özellikle arayüzey durumlarının ( $N_{ss}$ ), (CeO<sub>2</sub>: ZnO-katkılı PVP) arayüzey polimer tabakası, seri direnç ( $R_s$ ) ve yüzey ile dipol polarizasyonunun varlığından kaynaklanmaktadır. Ancak arayüzey durumları özellikle C-V ve G-V eğrilerinin zayıf terslenim ve tükenim bölgesinde düşük ve orta frekanslarda etkin iken  $R_s$  değeri sadece yığılım bölgesinde ve yüksek frekanslarda etkindir. Çünkü düşük ve orta frekanslara periyot ( $T=1/2\omega f$ ) değeri, arayüzeyde tuzaklanan yüklerin ömründen daha fazla olduğu için hem arayüzey durumları rahatlıkla yapıya uygulanan AC sinyali takip edebilir hem de dipoller elektrik alan doğrultusunda kendi eksenini etrafında dönebildiği için ölçülen C ve G değerlerine ek bir katkı meydana getirir. Arayüzey durumlarının voltaj veya enerjiye bağlı dağılım profilleri düşük-yüksek frekans C-V, kondüktans (C-V-f ve G-V-f), Hill-Colleman (C/G-V eğrileri tepe veriyorsa) ve doğru-beslem I-V ölçümlerinden hesaplanabilir. Ancak, arayüzey durumlarının enerjiye bağlı dağılım profili ( $N_{ss}-(E_C-E_{ss})$ ) ve onların ömür ( $\tau$ ) değerlerini elde etmek için en doğru ve güvenilir yöntemlerden biri Nicollian-Goetzberger tarafından geliştirilmiş olan paralel-kondüktans yöntemidir ancak daha fazla ölçüm ve zaman gerektirir.

Hazırlanan Au/(CeO<sub>2</sub>: ZnO-katkılı PVP)/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotların  $n$ ,  $I_0$  ve  $\Phi_{B0}$  gibi diğer bazı önemli elektrik parametreleri de ileri-beslem I-V ölçümleri kullanılarak elde edildi.  $N_{ss}-(E_C-E_{ss})$  profili Card-Rhoderick yöntemi ile de ileri-beslem I-V eğrisi kullanılarak elde edildi ve sonuçlar paralel kondüktans yöntemi ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldı. Sonuçlar  $N_{ss}$ ’nin düşük frekanslarda zayıf terslenme ve yığılıma bölgelerinde daha etkili olduğunu gösterdi. Ancak bu metotların hepsi aynı voltaj ve frekans bölgelerinde

kullanılmaya elverişli değildir ve dolayısıyla aralarında bazı farklılıklar da görülebilir. Dolayısıyla hem  $N_{ss}$  hem de direncin ( $R_i$ ) voltaja bağlı dağılım profilleri de sırasıyla Castange-Vapaille tarafından geliştirilen yüksek-alçak frekans ( $C_{LF}-C_{HF}$ ) kapasitans yöntemi ile Nicollian-Brews metodlarından edildi.  $R_s$ 'nin empedans ölçümleri üzerindeki etkisini belirlemek için, ölçülen yüksek frekans kapasitans/kondüktans-voltaj ( $C/G-V$ ) verileri düzeltildi ve bu verilerden  $R_s$ 'nin özellikle yığılma bölgesinde yüksek frekansta etkin olduğu görüldü. Deneysel sonuçlar organik arayüzey tabaka,  $R_s$ ,  $N_{ss}$ , ve onların  $\tau$ 'larının hem empedans hem de I-V ölçümleri üzerinde etkili olduğunu gösterdi. Ölçülen yüksek frekans kapasitans/kondüktans-voltage ( $C/G-V$ ) eğrileri ayrıca  $R_s$  etkisi göz önüne alınarak düzeltildi ve düzeltilen eğriler  $R_s$ 'nin kuvvetli yığılma bölgesinde daha etkili olduğunu göstermektedir. Deneysel sonuçlar, tüm temel elektriksel parametrelerin frekans ve voltajın güçlü birer fonksiyonu olduğunu ve ( $CeO_2:ZnO$ -katkılı PVP) organik arayüzey tabakanın geleneksel yöntemlerle büyütülen geleneksel yalıtkanlar yerine başarılı olarak kullanılabileceğini gösterdi. Sonuç olarak, ( $CeO_2:ZnO$ -katkılı PVP) organik arayüzey tabakanın geleneksel yöntemler ile büyütülmüş geleneksel yalıtkan tabakalar yerine, düşük masraf, kolay büyütme, esneklik ve yüksek mekanik dayanıklılık nedenleriyle kullanılabileceği söylenebilir.

Bu konuda bundan sonra çalışacaklara önerilerimiz, daha geniş sıcaklık ve ışık şiddetleri aralıklarında empedans ölçümleri gerçekleştirilerek hem muhtemel iletim mekanizmaları hem de temel elektrik ve dielektrik parametrelerinin sıcaklığa bağlı değişimi hakkında daha detaylı bilgiler elde etmektir. Hem MS hem de farklı oranlarda metal veya metal oksit katkı polimer arayüzey tabakalı (MPS) yapılar oluşturularak bu arayüzey tabakaların ve katkı oranlarının MS yapının performansı üzerindeki etkisi hakkında daha detaylı bilgi edinilmesi diğer bir önerimizdir. Bu ölçümlerin tekrarlanabilirliği de son derece önemlidir ve bunu belirlemek için ölçümlerin belirli periyot aralıklarında tekrarlanması ve dolayısıyla yaşlanma etkileri araştırılmalıdır.

## KAYNAKLAR

1. Sze, S. M., Ng, K. K. (2007). *Physics of Semiconductor Devices* (3rd edition). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 197-240.
2. Al-Ahmadi, N.A. (2020). Metal oxide semiconductor-based Schottky diodes: a review of recent advances. *Materials Research Express*, 7(3), 32001.
3. Tung, R.T. (2014). The physics and chemistry of the Schottky barrier height. *Applied Physics Reviews*, 1(1), 011304.
4. Demirezen, S., Altındal, Ş., Azizian-Kalandaragh, Y. and Akbaş, A. M., (2022). A comparison of Au/n-Si Schottky diodes (SDs) with/without a nanographite (NG) interfacial layer by considering interlayer, surface states ( $N_{ss}$ ) and series resistance ( $R_s$ ) effects. *Physica Scripta*, 97, 055811.
5. Tataroğlu, A., Altındal, Ş. and Azizian-Kalandaragh, Y. (2020). Comparison of electrical properties of MS and MPS type diode in respect of (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PVP) interlayer. *Physica B: Condensed Matter*, 576, 411733.
6. Nicollian, E. H., Brews, J. R. (1982). *MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology*. New York: John Wiley & Sons, 257-264.
7. Ulusoy, M., Badali, Y., Pirgholi-Givi, G., Azizian-Kalandaragh, Y. and Altındal, Ş. (2023). The capacitance/conductance and surface state intensity characteristics of the Schottky structures with ruthenium dioxide-doped organic polymer interface. *Synthetic Metals*, 292, 117243.
8. Güçlü, Ç., Tanrikulu, E. E., Ulusoy, M., Azizian-Kalandaragh, Y. and Altındal, Ş. (2024). Frequency-dependent physical parameters, the voltage-dependent profile of surface traps, and their lifetime of Au/(ZnCdS-GO:PVP)/n-Si structures by using the conductance method. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 35(5).
9. Akın, B., Ulusoy, M. and Altındal Yerişkin, S. (2024). Investigation of the interface state characteristics of the Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ge/p-Si heterostructure over a wide frequency range by capacitance and conductance measurements. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 170.
10. Çetinkaya, H. G., Bengi, S., Sevgili, Ö. and Altındal, Ş. (2024). The capacitance/conductance and surface state intensity characteristics of the Al/(CMAT)/p-Si structures. *Physica Scripta*, 99(2), 025955.
11. Güçlü, Ç., Altındal, Ş. and Erbilgen Tanrikulu, E. (2024). Voltage and frequency reliant interface traps and their lifetimes of the MPS structures interlayered with CdTe:PVA via the admittance method. *Physica B: Condensed Matter*, 677, 415703.
12. Cheung, S. K., Cheung, N. W. (1998). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49, 85.

13. Altındal, Ş., Sevgili, Ö. and Azizian-Kalandaragh, Y. (2019). A comparison of electrical parameters of Au/n-Si and Au/(CoSO<sub>4</sub>-PVP)/n-Si structures (SBDs) to determine the effect of (CoSO<sub>4</sub>-PVP) organic interlayer at room temperature. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 9273-9280.
14. Nicollian, E. H., 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(6), 1055-1033.
15. Castagne, R., Vapaille, A. (1971). Description of the SiO<sub>2</sub>-Si interface properties by means of very low frequency MOS capacitance measurements. *Surface Science*, 28, 157-193.
16. Şafak Asar, Y., Feizollahi Vahid, A., Basman, N., Çetinkaya, H. G. and Altındal, Ş. (2023). Frequency-dependent electrical parameters and extracted voltage-dependent surface states in Al/DLC/p-Si structure using the conductance method. *Applied Physics A*, 129, 358.
17. Hill, W. A., Coleman, C. C. (1980). A single-frequency approximation for interface-state density determination. *Solid-State Electronics*, 23, 987-993.
18. Card, H. C., Rhoderick, E. H. (1971). Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4, 1589-1601.
19. Norde, H. (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Applied Physics Letters*, 50(7), 5052-5053.
20. Üstün, O. (2023, December 8-10). *A comparative study on basic electrical parameters and photo-sensitivity of the Au/n-Si (MS) and Au/(ZnO-CeO<sub>2</sub>:PVP)/n-Si (MPS) photodiodes by using I-V measurements* [Paper Presentation]. 5. International Congress on Scientific Research, Şanlıurfa, Türkiye.
21. Archer, R., Atalla, M. (1963). Metals contacts on cleaved silicon surfaces. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 101, 697-708.
22. Neamen, D. (2002). *Semiconductor physics and devices*. New York: McGraw-Hill, Inc, 332-354.
23. Achuthan, M., Bhat, M. A. K. (2006). *Fundamentals of semiconductor devices*. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 122-130.
24. Rhoderick, E. H., Williams, R. (1988). *Metal-semiconductor contacts*. Oxford: Clarendon Press, 257-264.
25. Sharma, B. (2013). *Metal-semiconductor Schottky barrier junctions and their applications*. New York: Springer Science & Business Media, 1-50.
26. Alshaeer, F. (2018). *A study of current transport in Schottky diodes based on AlInSb/InSb-QW heterostructures*. PhD Thesis, Cardiff University.
27. Milnes, A. G. (2012). *Heterojunctions and metal semiconductor junctions*. New York: Elsevier.

28. Fiore, J. M. (2017). *Semiconductor Devices*. New York: Springer, 20-27.
29. Colince, J. P., Colince, C. A. (2002). *Physics of Semiconductor devices*. New York: Kluwer Academic Publishers, 28-50.
30. Tung, R. T. (1992). Electron transport at metal-semiconductor interface: General Theory. *Physical Review B*, 45(23), 13509-13523.
31. Hung, K. K., Cheng, Y. C. (1987). Characterization of Si-SiO<sub>2</sub> interface traps in p-metal-oxide-semiconductor structures with thin oxides by conductance technique. *Journal of Applied Physics*, 62, 4204-4211.
32. Sharma, M., Tripathi, S. K. (2016). Frequency and voltage dependence of admittance characteristics of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVA:n-ZnSe Schottky barrier diodes. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 41, 155-161.
33. Sevgili, Ö., Yıldırım, M., Azizian-Kalandaragh, Y. and Altındal, Ş. (2020). A comparison study regarding Al/p-Si and Al/(carbon nanofiber-PVP)/p-Si diodes: current/impedance-voltage (I/Z-V) characteristics. *Applied Physics A*, 126, 1-9.
34. Güçlü, Ç. Ş., Erbilen Tanrikulu, E., Dere, A., Altındal, Ş. and Azizian-Kalandaragh, Y. (2023). A comparison of electrical characteristics of the Au/n-Si Schottky diodes with (ZnCdS:GO(1:1) and (ZnCdS:GO(1:0.5) doped PVP interlayer using current-voltage (I-V) and impedance-voltage (Z-V) measurements. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34, 1909.
35. Sangeeth, C. S. S., Stadler, P., Schaur, S., Sariciftci, N. S. and Menon, R. (2010). Interfaces and traps in pentacene field-effect transistor. *Journal of Applied Physics*, 108, 113703.
36. Sharma, N., Negi, C. M. S., Sharma, M., Verma, A. S. and Gupta, S. K. (2019). A comparative analysis of the optoelectronic performance of conventional and inverted design organic photodetectors. *Optical Materials*, 95, 109273.
37. Barkhordari, A., Özçelik, S., Altındal, Ş., Pirgholi-Givi, G., Mashayekhi H. and Azizian-Kalandaragh, Y. (2021). The effect of PVP: BaTiO<sub>3</sub> interlayer on the conduction mechanism and electrical properties at MPS structures. *Physica Scripta*, 96, 085805.
38. Reddy, V. R., Manjunath, V., Janardhanam, V., Chang-Hyun L. and Chel-Jong, C. (2015). Double Gaussian Distribution of Barrier Heights, Interface States, and Current Transport Mechanisms in Au/Bi<sub>0.5</sub>Na<sub>0.5</sub>TiO<sub>3</sub>-BaTiO<sub>3</sub>/n-GaN MIS Structure. *Journal of Electronic Materials*, 44, 1.
39. Reddy, N. N. K., Reddy, V. R (2012). Barrier characteristics of Pt/Ru Schottky contacts on n-type GaN-based on I-V-T and C-V-T measurements. *Bulletin of Materials Science*, 35, 53-61.
40. Altındal, Ş., Farazin, J., Pirgholi-Givi, G., Marıl, E. and Azizian-Kalandaragh, Y. (2020). The effects of (Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TeO<sub>2</sub>-PVP) interfacial film on the dielectric and electrical features of Al/p-Si (MS) Schottky barrier diodes (SBDs). *Physica B: Condensed Matter*, 582, 411958.

41. Rajeswari, N., Selvasekarapandian, S., Karthikeyan, S., Prabu, M., Hirankumar, G., Nithya, H. and Sanjeeviraj, C. (2011). Conductivity and dielectric properties of polyvinyl alcohol–polyvinylpyrrolidone poly blend film using non-aqueous medium. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 357, 3751-3756.
42. Ashajyothi, S., Reddy, V. R. (2021). Influence of tin oxide ( $\text{SnO}_2$ ) interlayer on the electrical and reverse current conduction mechanism of Au/n-InP Schottky junction and its microstructural properties. *Thin Solid Films*, 740, 139001.
43. Gupta, S., Kumar, A., Mukherjee, S., Kushwah, K. K., Mahobia, S. K., Patharia, P., Kushwaha, A., Yadav, D., Dwivedi, U. K., Kumar, S. and Choubey, R. K. (2023). Temperature-dependent study of the fabricated ZnS/p-Si heterojunction. *Physica B: Condensed Matter*, 657, 414831.
44. Tataroğlu, A., Altındal, Ş. and Azizian-Kalanderagh, Y. (2020). C-V-f and  $G/\omega$ -V-f characteristics of Au/( $\text{In}_2\text{O}_3$ -PVP)/n-Si (MPS) structure. *Physica B: Condensed Matter*, 582, 411996.
45. Akin, B., Farazin, J., Altındal, Ş. and Azizian-Kalanderagh Y. (2022). A comparison electric-dielectric features of Al/p-Si (MS) and Al/( $\text{Al}_2\text{O}_3$ : PVP)/p-Si (MPS) structures using voltage–current (V–I) and frequency–impedance (f–Z) measurements. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33, 21963-21975.
46. Badali, Y., Farazin, J., Pirgholi-Givi, G., Altındal, Ş. and Azizian-Kalanderagh, Y. (2021). Graphene doped ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ – $\text{Bi}_2\text{O}_3$ – $\text{TeO}_2$ ): PVP dielectrics in metal–semiconductor structures. *Applied Physics A*, 127, 695, 1-11.
47. Hosseini, Z., Azizian-Kalanderagh, Y., Sobhanian, S., Pirgholi-Givi G. and Kouhi, M. (2022). Comparison of capacitance-frequency and current-voltage characteristics of Al/CdS-PVP/p-Si and Al/p-Si structures. *Physica B: Condensed Matter*, 640, 413836.
48. Demirezen, S., Eroğlu, A., Azizian-Kalanderagh, Y. and Altındal, Ş. (2020). Electric and dielectric parameters in Au/n-Si (MS) capacitors with metal oxide-polymer interlayer as a function of frequency and voltage. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31, 15589-15598.
49. Buyukbas-Ulaşan, A., Altındal Yerişkin, S., Tataroğlu, A., Balbaşı, M. and Azizian Kalanderagh, Y. (2018). Electrical and impedance properties of MPS structure based on ( $\text{Cu}_2\text{O}$ - $\text{CuO}$ -PVA) interfacial layer. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29, 8234-8243.



*Gazili olmak ayrıcalıktır*