



**Au/(Fe₃O₄ -katkılı PVA)/n-Si SCHOTTKY DİYOTLARDA (SDs) TEMEL
ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİN ARAYÜZEY TUZAKLARININ
YOĞUNLUĞUNUN (D_{it}) VE BUNLARIN GEVŞEME SÜRELERİNİN
FREKANS İLE GERİLİME BAĞLI İNCELENMESİ**

Alper UZUN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2025

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.

Alper UZUN

22/01/2025

Au/(Fe₃O₄-katkılı PVA)/n-Si SCHOTTKY DİYOTLARDA (SDs) TEMEL
ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİN ARAYÜZEY TUZAKLARININ
YOĞUNLUĞUNUN (D_{it}) VE BUNLARIN GEVŞEME SÜRELERİNİN FREKANS İLE
GERİLİME BAĞLI İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Alper UZUN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2025

ÖZET

Bu YL tez çalışmada, Au/(Fe₃O₄:PVA)/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotlar (SDs) hazırlandı ve empedans-voltaj-frekans (Z-V-f) ölçümleri 0,1kHz-1MHz arasında ve ±3V aralığında ölçüldü. Schottky diyotunun difüzyon potansiyel (V_D), Fermi enerjisi (E_F), engel yüksekliği (Φ_B), tükenim katmanının (W_D) genişliği ve maksimum elektrik alan (E_m) gibi temel elektronik parametreleri ters beslem C⁻²-V grafiklerinin voltaj eksenini kestiği nokta (V_o) ve eğimlerinden frekansa bağlı elde edildi. Arayüzey durumlarının (N_{ss}) voltaja bağlı dağılımı, düşük-yüksek frekans kapasitans (C_{LF}-C_{HF}) ve paralel iletkenlik (G_{p/w}-f) modelleri kullanılarak elde edilerek birbirleriyle karşılaştırıldı. Diyot resistansının (R_i) voltaja bağlı değişim profili ise her frekans için Nicolian-Brews metodundan elde edildi. Bu parametrelerden gözlenen değişimler; N_{ss} tuzaklarının varlığına, onların ömürlerine (τ), organik arayüzey tabakası ile seri direncin (R_s), yüzey ve dipol polarizasyonlarına atfedildi. Ancak N_{ss} değerleri hem tükenme hem de inversiyon bölgelerinde etkili iken, R_s kuvvetli yığılım bölgesinde yeterince yüksek frekanslarda etkilidir.

Bilim Kodu : 20218
Anahtar Kelimeler : Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si Schottky diyotlar; Empedans-voltaj-frekans (Z-V-f) karakteristikleri; Elektriksel parametreler, arayüzey tuzakları ve yaşam süreleri (t)
Sayfa Adedi : 37
Danışman : Doç. Dr. Seçkin ALTINDAL YERİŞKİN

THE INVESTIGATION OF BASIC ELECTRICAL PARAMETERS OF THE Au/(Fe₃O₄-
doped PVA)/n-Si SCHOTTKY DIODES (SDs), DENSITY OF INTERFACE TRAPS (D_{it})
AND THEIR RELECXATION TIME DEPEND ON FREQUENCY AND VOLTAGE

(M. Sc. Thesis)

Alper UZUN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2025

ABSTRACT

In this article, the impedance-voltage-frequency (Z-V-f) measurements of the fabricated Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si SDs have been performed between 0.1kHz and 1MHz, and in the $\pm 3V$ range. Main important electronic parameters of the Schottky diode (SD) like diffusion- potential (V_D), Fermi- energy (E_F), barrier- height (Φ_B), depletion layer (W_D), and max. electric field (E_m) were extracted from the reverse bias $1/C^2 - V$ plots in a wide frequency range. The voltage- reliant variations of the surface states (N_{ss}) have been calculated by using low – high frequency capacitance ($C_{LF}-C_{HF}$), and parallel conductance or admittance models and compared to each other. The voltage- reliant resistance profile of R_i has also been obtained from the Nicollian & Brews method for all frequencies. All these results indicate that these main electrical parameters are strongly dependent on voltage and frequency due to the existence of N_{ss} , their lifetimes (τ), interfacial organic layer, R_s , interface, and dipole polarizations. Formal, while N_{ss} is effective, both in depletion and inversion regions, R_s is efective at strong-accumulation region at high frequency.

Science Code : 20218

Key Words : Au/PVA-Fe₃O₄/n-Si Schottky iodes, impedance-voltage-frequency
(Z-V-f) characteristics, electrical parameters, interface traps and their
lifetimes (t)

Page Number : 37

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Seçkin ALTINDAL YERİŞKİN

TEŞEKKÜR

Tez çalıřmam sűresince, beni yűnlendiren, arařtırmalarımın her ařamasında bilgi ve deneyimlerini paylařarak katkıda bulunan danıřman hocam Doç. Dr. Seçkin ALTINDAL YERİŐKİN'e ve hem tezin tamamlanmasına hem de tez ile ilgili çalıřmaların yűrűtűlmesinde önemli katkılar saėlayan deėerli hocam Prof. Dr. Őemsettin ALTINDAL'a teőekkűr ederim. Ayrıca rneklelerin hazırlanmasında ve onların yapısal analizinde bana her tűrlű yardımı esirgemeyen Dr. Aysun ARSLAN ALSAÇ'a en içten duygularım ile teőekkűr ederim.



İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|------------------------------|--------------|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT..... | v |
| TEŞEKKÜR..... | vi |
| İÇİNDEKİLER | vii |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ..... | viii |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ..... | ix |
| SİMGELER VE KISALTMALAR..... | xii |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. TEORİK BİLGİLER..... | 5 |
| 3. DENEYSEL DETAYLAR..... | 13 |
| 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA..... | 17 |
| 5. SONUÇ..... | 31 |
| KAYNAKLAR..... | 33 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 37 |

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge | Sayfa |
|---|-------|
| Çizelge 2.1. n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler için doğrultucu ve omik kontak oluşumu | 6 |
| Çizelge 4.1. Farklı frekansta Au/(PVA-Fe ₃ O ₄)/n-Si Schottky diyotunun hesaplanan temel deneysel değerleri (V_D , N_D , E_F , W_D , E_m , ve $\Delta\Phi_B$, $\Phi_B(C-V)$)..... | 21 |
| Çizelge 4.2. Paralel iletkenlik yöntemi ile farklı uygulanan sabit voltajlar için elde edilen deneysel (G_p/ω) _{max} , N_{ss} ve τ değerleri | 26 |



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil | Sayfa |
|---|-------|
| Şekil 2.1. Bir metal ile N-tipi yarıiletken kontak edilmeden önceki enerji band diyagramları..... | 6 |
| Şekil 2.2. Bir n-tipi yarıiletken ile metal kontak oluşturulduktan sonraki termal denge durumunda oluşan enerji band diyagramı ($\Phi_M > \Phi_S$)..... | 7 |
| Şekil 2.3. Bir MS Schottky diyotunun doğru öngerilim altındaki enerji band diyagramı..... | 8 |
| Şekil 2.4. Bir MS Schottky diyotunun ters öngerilim altındaki enerji band diyagramı..... | 9 |
| Şekil 2.5. Hayali yüklerden/kuvvetlerden dolayı metal ile yarıiletken arasındaki engel potansiyel yüksekliğinde görülen engel düşmesi | 10 |
| Şekil 3.1. Hazırlanan Au/(Fe ₃ O ₄ :PVA)/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotların şematik gösterimi | 14 |
| Şekil 3.2. Empedans ölçümlerinde alınmasında kullanılan deneysel ölçüm sistemi..... | 14 |
| Şekil 3.3. HP 4192A LF empedans analizörü..... | 15 |
| Şekil 4.1. (a) Farklı frekanslar için Au/(PVA-Fe ₃ O ₄)/n-Si Schottky diyotunun voltaj bağımlı C-V eğrileri, (b,c) sırasıyla negatif ve pozitif voltajlar için C-ln(f) eğrileri | 17 |
| Şekil 4.2. (a) Farklı frekanslar için Au/(PVA-Fe ₃ O ₄)/n-Si Schottky diyotunun voltaj bağımlı G/ω-V eğrileri, (b,c) sırasıyla negatif ve pozitif voltajlar için G/ω-ln(f) eğrileri..... | 18 |
| Şekil 4.3. Au/(PVA-Fe ₃ O ₄)/n-Si Schottky diyotunun R _s ile V ve R _s ile ln(f) eğrileri | 20 |
| Şekil 4.4. Farklı frekansta Au/(PVA-Fe ₃ O ₄)/n-Si Schottky diyotunun 1/C ² -V eğrileri | 21 |
| Şekil 4.5. Au/(PVA-Fe ₃ O ₄)/n-Si SD'nin Φ _B (C-V) ile ln(f) arasındaki grafik..... | 23 |
| Şekil 4.6. Au/(PVA-Fe ₃ O ₄)/n-Si SD'nin W _D ve N _D ile ln(f) arasındaki grafik..... | 23 |
| Şekil 4.7. Au/(PVA-Fe ₃ O ₄)/n-Si için (C _{LF} -C _{HF}) frekans metodu ile hesaplanan N _{ss} -V eğrisi..... | 24 |

| Şekil | Sayfa |
|--|-------|
| Şekil 4.8. (a). $(G_p/\omega) - \ln(f)$ eğrileri, (b) Tükenim bölgesi için Au/(PVA-Fe ₃ O ₄)/n-Si diyotun $N_{ss}-V$ ve $\tau-V$ eğrileri..... | 27 |
| Şekil 4.9. (a). Au/(PVA-Fe ₃ O ₄)/n-Si SD'nin (G_p/ω) vs $\ln(f)$ eğrileri (terslenim bölgesinde). (b). N_{ss} ve $\tau - V$ eğrileri (terslenim bölgesinde) | 27 |
| Şekil 4.10. (a). Düzeltilmiş C-V eğrileri, (b) Düzeltilmiş $G/\omega-V$ eğrileri, 1 MHz frekansı için Au/(PVA-Fe ₃ O ₄)/n-Si SD | 29 |



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

| Simgeler | Açıklamalar |
|-----------------|--|
| \AA | Angström |
| A | Diyotun Kontak Alanı |
| A^* | Etkin Richardson sabiti |
| Al | Alüminyum |
| C | Sığa/Kapasitans |
| C_{HF} | Yüksek frekans kapasitans |
| C_{LF} | Düşük frekans kapasitans |
| cm | Santimetre |
| cm^2 | Santimetre kare |
| d_i/δ | Polimer Arayüzey tabakanın kalınlığı |
| D_{it} | Arayüzey tuzaklarının yoğunluğu |
| E (V/m) | Elektrik alan |
| E_a | Aktivasyon enerjisi |
| E_F | Fermi enerji seviyesi |
| E_g | Yarıiletkenin Yasak enerji aralığı |
| eV | Elektron volt |
| h | Planck sabiti |
| k | Boltzmann sabiti |
| M' | Elektrik modülülüsün reel kısmı |
| M'' | Elektrik modülülüsün sanal kısmı |
| M^* | Kompleks elektrik modulus |
| m_e^* | Elektron etkin kütlesi |
| m_h^* | Deşik/Hol etkin kütlesi |
| m_o | Elektron durgun kütlesi |
| N_A | Alıcı katkı atomlarının konsantrasyonu |
| N_c | İletim bandındaki izinli enerji durumlarının yoğunluğu |
| N_D | Verici katkı atomlarının konsantrasyonu |

| Simgeler | Açıklamalar |
|------------------------|--|
| N_v | Valans bandındaki izinli enerji durumlarının yoğunluğu |
| q | Elektronik yük |
| R_s | Diyodun Seri direnç |
| R_{sh} | Diyodun Kısa devre direnci |
| T | Kelvin Cinsinden Sıcaklık |
| $\tan\delta$ | Tanjant kayıp |
| W_D | Tüketim bölgesinin genişliği |
| Z^* | Kompleks Empedans |
| Z' | Kompleks Empedansın Reel Kısmı |
| Z'' | Kompleks Empedansın İmajiner Kısmı |
| $\Delta\Phi$ | Schottky engel alçalması |
| ϵ_0 | Boşluğun/Havanın dielektrik sabiti |
| ϵ_s | Yarıiletkenin dielektrik sabiti |
| τ (sn) | Ara-yüzey tuzaklarının gevşeme zamanı/ömrü |
| ϵ^* | Kompleks Dielektrik Sabiti |
| ϵ' | Kompleks Dielektrik Sabitinin Reel Kısmı |
| ϵ'' | Kompleks Dielektrik Sabiti İmajier Kısmı |
| ω ($=2\pi f$) | Açısal frekans |

| Kısaltmalar | Açıklamalar |
|--------------------|--|
| C-V-f | Kapasitans-voltaj-frekans |
| FeOx | Demir-oksit |
| G-V-f | İletkenlik-voltaj-frekans |
| MIS | Metal-arayüzey tabaka-yarıiletken yapılar/diyotlar |
| MPS | Metal-Polimer-Yarıiletken |
| MS | Metal-yarıiletken yapılar/diyotlar |
| p-Si | p-tipi Silisyum |
| PVA | Polivinil alkol |
| SBD | Schottky engel diyot |
| SD | Schottky diyot |

Kısaltmalar**Açıklamalar****SiO₂**

Silisyum di-oksit

Z-V-f

Empedans- voltaj-frekans



1. GİRİŞ

Malzemeler genelde elektriksel iletkenliklerine veya dirençlerine ($G=1/R$) göre üç guruba ayrılırlar. Bunlar iletkenler (metaller), yarıiletkenler (Si, Ge, GaAs) ve yalıtkanlardır (SiO₂, SnO₂, TiO₂) ve elektronik yapıları, elektron hareketleri ile enerji bant yapıları/diyagramları oldukça birbirinden farklıdır. Örneğin, iletken malzemelerde iletim-bandı (E_c) ve valans-bandı (E_v) çakışık veya iç-içe olduklarından dolayı elektronlar bir banttan diğerine geçerken herhangi bir engel/bariyer ile karşılaşmazlar ve dolayısıyla akım-voltaj (I-V) ilişkisi lineerdir. İletkenlerin/metallerin dirençleri ($R=\rho L/A$), iletkenin boyu (L) ve öz direnci (ρ) ile doğru orantılı, fakat dik-kesit alanı ($A=\pi r^2$) ile ters orantılıdır. İletkenlerin (Cu, Ni, Ag, Au,) öz dirençleri yaklaşık $\rho \leq 10^{-4}$ ($\Omega \cdot \text{cm}$), yarıiletkenlerin (Si, Ge, GaAs,...) $10^{-4} < \rho < 10^4$ ($\Omega \cdot \text{cm}$) ve yalıtkanların ise (SiO₂, SnO₂, TiO₂) $\rho \geq 10^4$ ($\Omega \cdot \text{cm}$) arasında değişir. Böylece iletkenin yarıçapı (r) ayarlanarak istenilen direnç değeri elde edilebilir. İletkenlerin aksine yarıiletken ve yalıtkanlarda E_c ile E_v enerji bantları arasında yasak enerji aralığı/bandı olarak tanımlanan ($E_g=E_c-E_v$) bir bant ile birbirlerinden ayrılırlar. Ancak yarıiletkenlerde E_g değeri yaklaşık 3-3.5 eV den küçük iken yalıtkanlarda ise bu yasak band genelde 4 eV tan büyüktür [1-3].

Örneğin Ge, Si, GaAs, GaN gibi yarıiletkenleri 0.65, 1.12, 1.42 ve 3.36 eV luk yasak enerji aralığına sahiptirler ancak bu enerji bantları artan sıcaklıkla azalarak akım değerini artırır [1,2]. Dolayısıyla bir yarıiletkenin valans bandındaki elektronlara yasak bandın enerji değerinde eşit veya fazla enerji optik veya termal olarak verilirse, onları valans bandından iletkenlik bandına uyarılarak iletme katkıda bulunurlar. Fakat yalıtkan malzemelerde hem E_g hem de dirençleri çok büyük olduğundan dolayı ne optik ne de termal olarak iletme geçemezler. Yarıiletkenler, iletkenlere nazaran çok kırılğan olduklarından dolayı öz dirençleri/iletkenlikleri ($\sigma=1/\rho=q\mu N$), ancak onların içine uygun oranlarda yabancı atomlar katkılanarak ayarlanabilir. Burada; μ elektron/değişin mobilitesi/hareketliliği ve N ise yarıiletken içine katkılanan alıcı/verici yabancı katkı atomlarının konsantrasyonudur (N_A/N_D). Yarıiletkenler, çok ilginç ve önemli özelliklerinden dolayı elektrik/optik alanlarda geniş uygulama alanlarına sahiptirler. Üstelik katkı atomlarının yoğunluğuna bağlı olarak iletkenlik değerleri yalıtkan veya iletkeneye yaklaştırılabilir/ayarlanabilir. Eğer son yörüngelerinde 4 elektron olan Si ve Ge gibi yarıiletkenlere uygun oranlarda periyodik cetvelin beşinci (V) sütununda 5 elektron bulunan P, As, Sb gibi yabancı atomlar katkıldığında; yarıiletkenin son yörüngesinde ki her 4 elektronu, katkı atomlarının son

yörüngesinde bulunan 5 elektrondan 4'ü ile kovalent-bağını tamamlar ve böylece her atom başına 1 elektron fazlalığı meydana gelir. Katkı atomları yarıiletkenlere göre yaklaşık 10^8 - $10^{12}/\text{cm}^3$ arasında değiştiğinden, sistemde büyük oranda elektron fazlasının oluştuğundan dolayı bu yarıiletkenler n-tipi olarak bilinir [2-5]. Tersine p-tipi yarıiletken oluşturmak için, yarıiletkenlere son yörüngesinde 3 elektron bulunan B, In, In gibi atomlar katkılандığı sistemde elektron eksikliği veya hol fazlalığı oluşur ve bu yarıiletkenler p-tipi yarıiletkenler olarak bilinir. Dolayısıyla; n-tipi yarıiletkenlerde akım iletiminin büyük bir çoğunluğu elektronlar tarafından sağlanırken, bir kısmı da deşikler tarafından sağlanır. Yarıiletkenler, katkı atomlarının konsantrasyonuna göre, düşük ($N \sim 10^{13}$ - 10^{14} cm^{-3}), orta ($N \sim 10^{15}$ - 10^{16} cm^{-3}) ve yüksek katkılı ($N \geq 10^{17-18} \text{ cm}^{-3}$) yarıiletkenler olarak bilinir [1-5].

Yarıiletkenlerin iletkenliği artan sıcaklık ile artar (dirençleri ise azalır) ancak mutlak-sıcaklıkta (0K) neredeyse tamamen yalıtkan gibi davranırlar. Sıcaklık artarken, elektronik yükler (elektron ve deşikler) hem termal-enerji kazanırlar hem de valans iletim bantları genişerek birbirine yaklaşır ve dolayısıyla da yasak enerji bandı (E_g) daraldığı için valans bantından (E_v) büyük oranda elektronlar iletim bandına çıkarak iletkenliği artırır fakat direnci azalır ($R=1/G$). Yarıiletkenlerde, devre elemanları deyince ilk akla gelen arayüzeyli/arayüzeyli metal-yarıiletken (MS) Schottky tipi kontaklar (MS, MIS), diyot, , fotodiyot, güneş pilleri gelir ve bunların uygulama alanları da genelde farklıdır. Eğer M/S arayüzeyinde oluşturulan tabaka/film yeterice kalın olursa, bunlar arasında yük geçişleri zorlaşır ve dolayısıyla yapı kapasitöre (yük depolama özeliği) dönüşür. Günümüzde, Fizikçi, Kimyacı ve Malzemeci bilim adamları, temel Teknik veya bilimsel sorun olan verimi artırmak ve maliyeti de düşürmektir. Bu amaçla da, bunun için de yeni arayüzey tabakalı malzemelerin geliştirilmesi, tekrarlanabilirliğinin ve kalitelerinin iyileştirilmesi şarttır. Ancak, Schottky tipi aygıtın performansını/verimliliği bir çok sayıda faktöre bağlıdır ve bunların başında; arayüzey tabakanın kalınlığı (d_i), homojenliği, dielektrik-sabiti (ϵ'), metal ile yarıiletkeninin kontak edilmeden sonra, onlar arasında oluşan engel yüksekliğinin (Φ_B) biçimi ve büyüklüğü, alıcı/verici katkı-atomlarının (N_a/N_d) konsantrasyonu, aygıtların seri/kısa devre dirençleri (R_s ve R_{sh}), arayüzey durumlarının/tuzaklarının konsantrasyonu (D_{it}) ve onların M/S arayüzeyinde ve yasak band aralığında özel bir dağılıma ve onların yaşam süreleri (τ) gelmektedir [2,3,6-9].

MS veya MIS tip Schottky aygıtların temel elektriksel parametreleri, özellikle düşük-orta frekanslarda, arayüzey durumlarına, seri dirence, arayüzey tabakaya, polarizasyona ve voltaja önemli ölçüde bağlıdır [1,2,4,10-14]. Bu nedenle, hazırlanan bu yarıiletken-aygıtların elektriksel parametreleri ve iletim mekanizmaların geniş bir voltaj ve frekans aralığında incelenmesi çok büyük önem arz etmektedir. Çünkü, yalnız bir veya dar frekans/voltaj aralığına alınan elektriksel ölçümler, onların temel elektriksel parametreleri ile iletim mekanizmaları hakkında bize yeterince güvenilir sonuçlar vermez. MS veya MIS tipi bu yapılar üzerine bilimsel çalışmalar neredeyse bir asırdan beri devam etmesine rağmen, onların iletim mekanizmaları ve performanslarını etkileyen faktörler hakkında henüz tam bir konsensüs yoktur.

Diğer taraftan geleneksel SiO₂ ve SnO₂ gibi yalıtkan arayüzey tabakaları kararlı olmasına rağmen elektronik aygıtlarda özellikle kaçak akımları artırmakta ve istenmeyen arayüzey tuzakları ile seri direncin tamamı pasivize edemez. Üstelik bu geleneksel yalıtkan arayüzey tabakalarının yine geleneksel metotlarla (termal oksidasyon veya buharda oksidasyon) metal ile yarıiletken arasında büyütülmesi hem maliyetlidir hem de uzun zaman gerektirmektedir. Bu nedenle, geleneksel yalıtkan arayüzeyli yapılar yerine (MIS veya MPS); büyütme maliyetleri düşük, esnek, yüksek dayanıklılık ve basit yöntemlerle (elektron-eğirme, sol-jel, spin kaplama) saf, metal veya metal oksit katkılı polimer/organik arayüzey tabakalı malzemeler kullanılmaya başlanmıştır [15-21].

E. Baydilli vd. (2020) metal ile yarıiletken arasına büyütülecek ince bir arayüzey tabakanın kullanılması MS yapının özelliklerinin önemli ölçüde değiştirdiğini gösterdiler [22]. Çünkü yalıtkan veya organik arayüzey tabakalar bir dış elektrik alan altında kolayca polarize olurlar. Bu arayüzey tabakalar hem metali yarıiletkenden izole eder hem de aradaki yük geçişlerini kontrol ederler. Polimerler arasında özellikle Polivinil alkol (PVA) veya poly prolidine (PVP) hidrofolik yani suda veya alkolde kolay ve hızlı çözünebilen polimerler/organikler olup, yarı-kristal ve yapısındaki hidroksil (OH) grupları sayesinde kolayca hidrojen (H)-bağı yapabilen ve iletmeyen malzemelerdir [23,24]. Ancak bu organik malzemelerin uygun oranda metal (bakır, nikel, çinko, kalay) malzemeler katkılanarak onların hem iletkenliği hem de dielektrik değerleri artırılabilir [25,26]. Polimer/organikler hem moleküler dipol etkileri hem de elektrostatik alan etkileşimlerinden dolayı elektronik/optoelektronik uygulamalar için sıkça kullanılmaktadır ve uygulanan elektrik alan altında polarizasyon, arayüzey tuzakları ve seri direnç etkisi altında hem elektrik, optik

ve dielektrik özellikleri oldukça değişmektedir [26-31]. Ancak arayüzey tuzakları ve polarizasyon/kutuplanma düşük frekanslarda ve tükenim bölgesinde etkili iken seri direnç yüksek frekanslarda ve yığılım bölgesinde etkindir. Bu nedenle bunların etkileri tüm hesaplamalarda dikkate alınarak gerekli düzeltmeler yapılmalıdır.

Önceki çalışmamızda, hazırlanan Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si Schottky diyotlarının ileri bias akım-voltaj ($I_F - V_F$) eğrileri, 80K ile 320K arası ve $\pm 2V$ arasında detaylı bir şekilde incelendi ve olası yük iletim/taşıma mekanizmaları (CTMs) ve M/S arayüzündeki potansiyel engel yüksekliğinin (BH) doğası hakkında daha güvenilir ve doğru bilgiler sağlandı [31]. Artan sıcaklıkla gözlemlenen BH değerindeki artış ve idealite faktöründeki (n) azalma, TE modeli ve ortalama değeri etrafındaki çift Gauss Dağılımı (DGD) ile açıklandı. Dolayısıyla ve yukarıda açıklanan sebepler doğrultusunda, bu tez çalışmasında, (Fe₃O₄ -katkılı PVA) arayüzey tabakalı Au/(Fe₃O₄:PVA)/n-Si (MPS) tipi yapılar hazırlandıktan sonra onların frekans ve voltaja bağlı empedans ölçümleri (C-V ve G-V) geniş bir frekans (100 Hz-1MHz) ve voltaj ($\pm 3V$) aralığında gerçekleştirildi. Bu yapıların; V_D , E_F , Φ_B , W_D ve E_m gibi temel elektronik parametreleri ters beslem $C^{-2}-V$ grafiklerinin voltaj eksenini kestiği nokta (V_o) ve eğimlerinden frekanslar için elde edildi. Arayüzey durumlarının (N_{ss}) voltaja bağlı dağılımı profili, düşük-yüksek frekans kapasitans ($C_{LF}-C_{HF}$) ve paralel iletkenlik ($G_p/w-f$) modelleri kullanılarak elde edilerek birbirleriyle karşılaştırıldı. Diyot resistansının (R_i) voltaja bağlı değişim profili ise her frekans için Nicollian-Brews metodundan elde edildi. Bu parametrelerden gözlenen değişimler; N_{ss} tuzaklarının varlığına, onların ömürlerine (τ), organik arayüzey tabakası ile seri direncin (R_s), yüzey ve dipol polarizasyonlarına atfedildi.

Bu tez çalışması 5 bölümden oluşmaktadır. 1. Bölümde (Giriş) hazırlanan ve benzeri yapılar hakkında kısa bir literatür özeti verildi. 2. Bölümde (Teorik Bilgiler) ise hazırlanan MPS tip Schottky diyotlar hakkında genel bir teorik altyapı verildi. 3. Bölümde (Deneysel Yöntem) ise yarıiletken kristallerin kimyasal olarak temizlenmesi ve alt omik ve üst doğrultucu kontakların oluşturulması ve ölçüm düzeneği hakkında gerekli bilgiler verildi. 4. Bölümde (Deneysel Sonuçlar) ise elde edilen ölçümlerle ilgili gerekli tüm grafik ve tablolar oluşturuldu ve mevcut literatür ile kıyaslanarak detaylıca incelendi. 5. Bölümde (Sonuçlar ve Tartışma) ise, bu tez çalışmasında elde edilen tüm sonuçlarla ilgili tartışmalar ve yorumlar yapıldı ve elde edilen veriler doğrultusunda bu ve benzeri konularda yapılacak yeni çalışmalara ışık tutmak amacıyla bazı öneriler yapıldı.

2. TEORİK BİLGİLER

Schottky ve Mott'a göre bir metal ile n-tipi yarıiletken yüksek sıcaklık ve vakum altında kontak yapıldıktan sonraki termal denge durumu için enerji band diyagramı Şekil 2.1 de verilmiştir [1,2,5,7]. Burada Φ_M ve Φ_s sırasıyla metal ile yarıiletkenin iş-fonksiyonlarıdır ve metalin veya yarıiletkenin Fermi enerji seviyesindeki bir elektronun vakum seviyesine uymak/çıkarmak veya serbest hale getirmek için gereken veya ihtiyaç duyulan enerji miktarı olarak tanımlanır. İletken bant kenarının alt-seviyesi (E_C) ile valans bandının en üst-seviyesi (E_V) arasındaki fark ise elektron yakınlığı (χ_s) olarak tanımlanır. Schottky tipi bir MS veya MIS tipi diyotların tarihçesi en az yüzyıl öncesine kadar uzanmasına rağmen, günümüzde halen artarak elektronik, optik ve dielektrik uygulamalarda kullanılmasına devam ediliyor.

İletkenlerde/metallerde iletim elektronlar tarafından sağlanır ve akım-voltaj ilişkisi lineer iken, bu durum MS ve MIS tipi yarıiletken aygıtlarda farklıdır. Diğer bir ifade ile, bu yarıiletken (diyot, fotodiyot, güneş pili) aygıtlarda akım elektronlar ve deşikler (holler) tarafından sağlanır ve doğru beslendiğinde (diyotun (+) ucu güç kaynağının (+) ucuna ve (-) ucuda diyotun (-) ucuna bağlanması) durumunda diyot iletime geçer ve I-V ilişkisi üsteldir. Bu durumun tersi ise ters-beslem olarak bilinir ve diyot neredyse hiç akım geçirmez [1,2]. Çünkü, doğru beslemde iç ve dış elektrik alan zıt yönde olduğu için eklemdeki toplam elektrik alan küçüktür ($E-\varepsilon$) ancak ters beslemde iç ve dış elektrik alan aynı yönde olduğu için eklemdeki toplam elektrik artar ($E+\varepsilon$) ve dolayısıyla bu elektrik alan altında başlatılan tükenim bölgesi genişleyerek akım geçişi iyice zorlaşır.

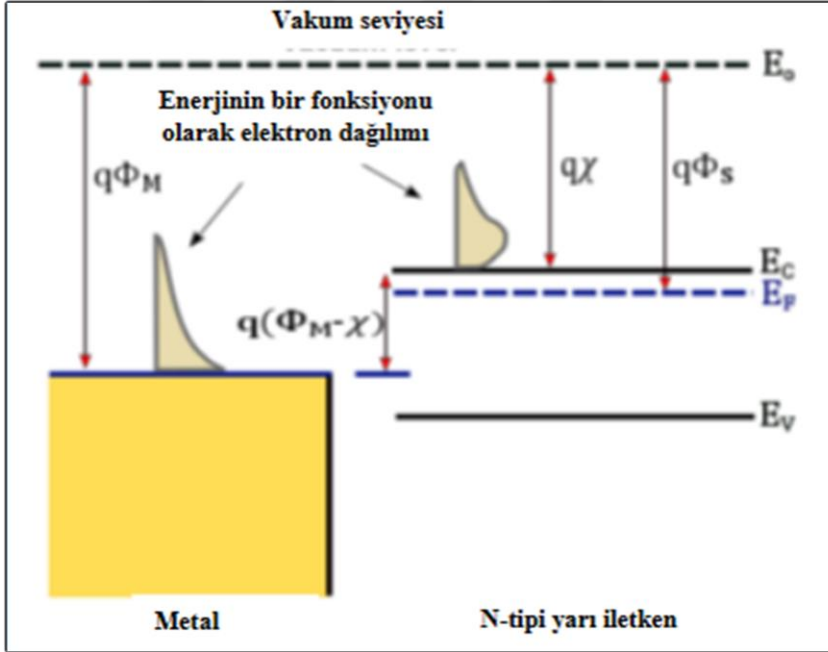
Bir metal ile yarıiletken kontak edildiğinde, ortaya çıkan kontak türünün (omik ve doğrultucu/Schottky) olması seçilen metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları belirler. Metal ile yarıiletken kontak edildikten sonra seçilen metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına göre aralarında sıfır veya Φ_{B0} yüksekliğinde bir potansiyel farkı veya engeli oluşur. Omik ve doğrultucu kontakın oluşması, yarıiletkenin n veya p tipi olmasına göre değişir ve bu durum aşağıdaki tabloda özetlenmiştir. Yani bir yarıiletken üzerine oluşturulan arka Omik ve ön doğrultucu metal kontakların seçimi rastgele/keyfi olmayıp, Schottky-Mott teorisine bu yarıiletken ve metallerin iş fonksiyonları dikkate alınarak seçim yapılır. Bu durum Tablo 2.

1’de özetlenmiştir. Eğer doğrultucu metal kontak ile yarıiletkenin iş fonksiyonları eşit olursa, metal ile yarıiletken arasında bir potansiyel engeli oluşmaz ($|\Phi_m - \Phi_s|$).

Çizelge 2.1. n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler için doğrultucu ve omik kontak oluşumu

| | n-tipi yarıiletkenler için | p-tipi yarıiletkenler için |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|
| $\Phi_M > \Phi_S$ | Doğrultucu | Omik |
| $\Phi_M < \Phi_S$ | Omik | Doğrultucu |

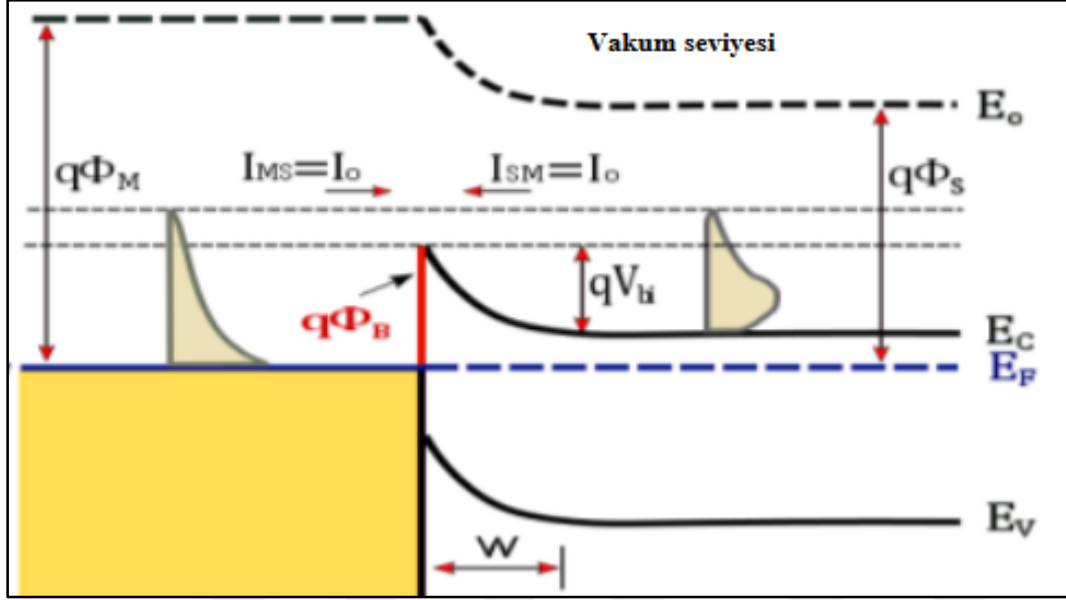
Çizelge 2.1 de görüldüğü gibi; n-tipi yarıiletken ile metal kontak edildiğinde, doğrultucu kontak elde etmek için $\Phi_M > \Phi_S$ ve omik kontak elde etmek için ise $\Phi_M < \Phi_S$ seçilmelidir. Ancak p-tipi bir yarıiletkende durum tersinedir. Yani p-tipi yarıiletken ile metal kontak edildiğinde, doğrultucu kontak elde etmek için $\Phi_M < \Phi_S$ ve omik kontak elde etmek için ise $\Phi_M > \Phi_S$ seçilmelidir [1-4]. Omik kontak durumunda, metal ile yarıiletken arasında bir potansiyel farkı oluşmaz ve dolayısıyla iletim iletkenlerde olduğu gibi omiktir. Başka bir ifadeyle I-V ilişkisi hem doğru beslemde hem de ters beslemde lineerdir.



Şekil 2.1. Bir metal ile N-tipi yarıiletken kontak edilmeden önceki enerji band diyagramları

N-tipi yarıiletken ile metal kontak edildikten sonra; yarıiletkenin ön yüzeyinde çoğunlukta olan elektronlar metalin ön yüzeyine difüzyon yoluyla geçerek arkalarında deşikler/holler

bırakırlar. Metal ve yarıiletken tarafındaki yükler eşit olana kadar veya metal ile yarıiletkenin Fermi enerjileri aynı hizaya gelene kadar bu yük geçişleri devam eder. Denge durumuna ulaşıldığında ($n=p$); yarıiletkenden metale doğru bir iç elektrik alan oluşur (ϵ) ve dolayısıyla metal ile yarıiletken arasında yük geçişleri durur.



Şekil 2.2. Bir n-tipi yarıiletken ile metal kontak oluşturulduktan sonraki termal denge durumunda oluşan enerji band diyagramı ($\Phi_M > \Phi_S$)

Yarıiletken ile metal arasındaki yük geçişlerinin sıfırlanması işimize gelmez ve biz devreden sürekli bir yük akışının olmasını isteriz. Yük akışı ise, metal/yarıiletken (MS) diyotun doğru veya ters öngerilimlemesiyle sağlanır. Örneğin n-tipi bir yarıiletkenin ucu bir güç kaynağının negatif ucuna (-) ve metal pozitif ucuna (+) bağlanırsa, buna doğru öngerilimlenme denir. Bu durumda MS üzerine uygulanan dış elektrik alan ile iç elektrik alan zıt yönlerde olduğu için Schottky-Mott teorisine göre diyot üzerine uygulanan voltaj (V_F) denge durumundaki potansiyel engelinden (Φ_{B0}) küçük olması şartıyla toplam engel yüksekliği (Φ_B) aşağıdaki gibi azaldığı için yük geçişleri iyice kolaylaşır.

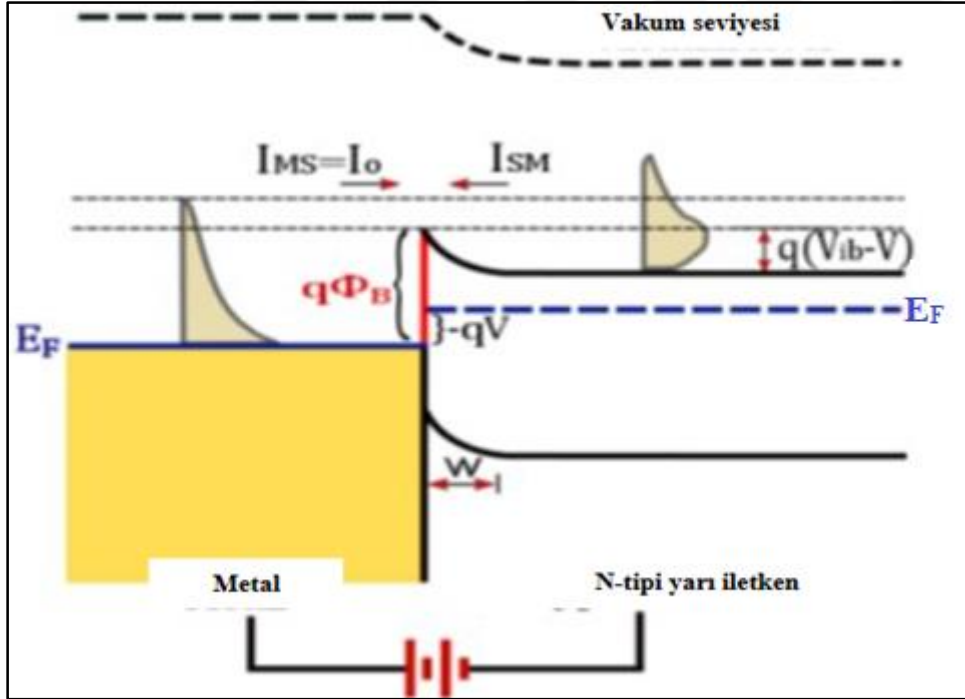
$$\Phi_B = \Phi_{B0} - V_F \quad (2.1)$$

Doğrultucu/Schottky kontak durumunda ise Şekil 2.2 de görüldüğü gibi, Schottky ve Mott teorisine göre yarıiletkenden metale geçen elektronlar qV_{ib} kadar bir potansiyel engeliyle karşılaşırken, metalden yarıiletkene geçen elektronlar ise $qV_{ib} + E_F$ kadar bir potansiyel engeliyle karşılaşır. Eşitlik 2.1'den de açıkça görüldüğü gibi doğru öngerilim altında M/S

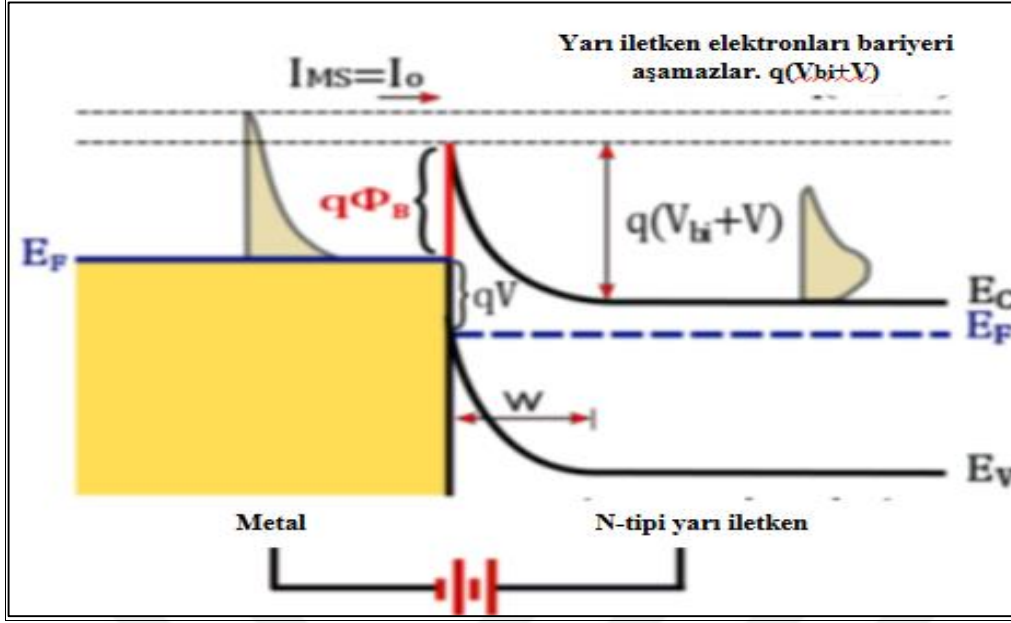
arayüzeyinde oluşan potansiyel engel yüksekliği iyice azaldığı için yük geçişlerinde önemli bir artış olur. Yani doğru besleme altında yarıiletken aygıt tamamen iletme geçer. Bunun aksine, eğer n-tipi yarıiletken güç kaynağının pozitif (+) ucuna ve metal negatif (-) ucuna bağlanırsa buna “ters öngerilim” denir. Ters öngerilim altında; iç ve dış elektrik alanlar aynı yöne olacağı için toplam elektrik alan iyice azalır ve dolayısıyla tüketim bölgesinin genişliği iyice genişler. Başka bir ifadeyle, Schottky-Mott teorisine göre ters öngerilim voltajı (V_R) termal denge durumundaki Φ_{B0} değerinden küçükse M/S arasında oluşan potansiyel engelinin yüksekliği aşağıdaki gibi uygulanan V_R kadar alçalacaktır.

$$\Phi_B = \Phi_{B0} - V_R \quad (2.2)$$

Bu durumu izah etmek için hem doğru öngerilim hem de ters öngerilim altında MS Schottky diyotu için oluşan enerji band diyagramları sırasıyla Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’de verilmiştir [32].



Şekil 2.3. Bir MS Schottky diyotunun doğru öngerilim altındaki enerji band diyagramı



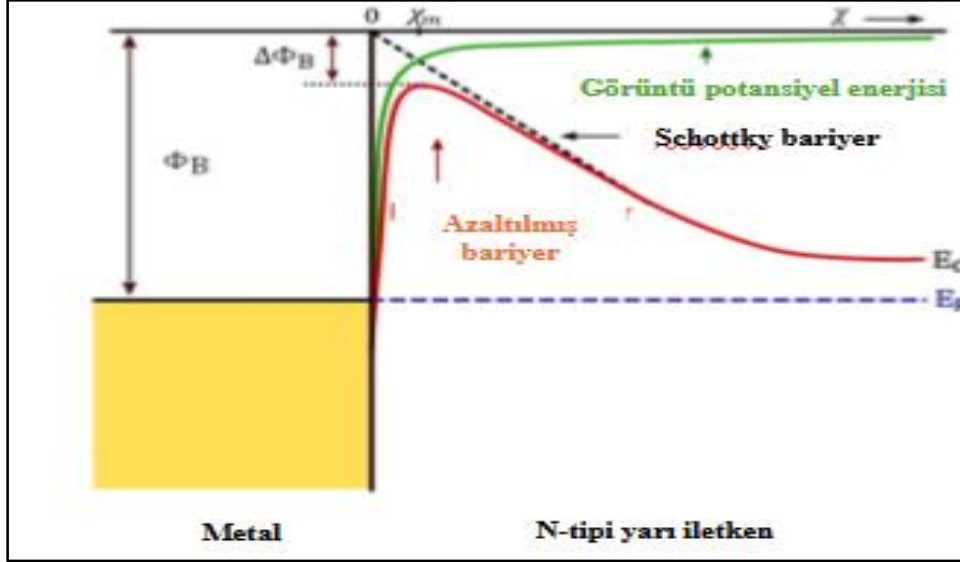
Şekil 2.4. Bir MS Schottky diyotunun ters öngerilim altındaki enerji band diyagramı

Sadece tek veya dar bir aralıkta ölçülen voltaja, frekansa veya sıcaklığa bağlı C-V ve G-V ölçümleri, metal (M) ve yarıiletken (S) arasında kontakta sonra oluşan potansiyel engel yüksekliği (BH), yük taşıma mekanizmaları (CTM'ler) ve temel elektriksel ve dielektrik parametreler hakkında yeterli ve güvenilir sonuçlar sağlayamayabilir. Bu nedenle, daha doğru ve daha güvenilir sonuçlar elde edebilmek için bu ölçümlerin geniş bir voltaj ve frekans aralığında ölçülmesi kritik bir öneme sahiptir. Genelde metal ile yarıiletken arasında oluşan potansiyel engel yüksekliği q/kT termal enerji değerinden daha yüksektir. Yasak enerji aralığı ($E_g = E_c - E_v$) değeri artan sıcaklıkla aşağıdaki eşitliğe göre azalmaktadır [1].

$$E_g(T) = E_g(0 K) + (\alpha T^2 / \beta + T) \quad (2.3)$$

Burada; $E_g(0 K)$, α , β sırasıyla yarıiletkenin 0 K daki yasak enerji bant genişliği, negatif sıcaklık katsayısı ve bir sabittir. Bu değerler Si için 1.17 eV, -4.73×10^{-4} eV/K ve 636 dır. İdeal durumda yarıiletkenlerin yasak bandında hiçbir izinli enerji seviyesi yoktur. Ancak yarıiletkenin yüzeyi ne kadar temizlenirse temizlensin yarıiletken ile metal ara yüzeyinde doymamış bağlardan, kristal örgüsündeki bir bozukluktan, temizleme sırasında laboratuvar ortamında bulunan organik kirlilikle ve katkılanan alıcı veya verici atomlardan dolayı yasak enerji aralığında çok sayıda izinli enerji seviyesi oluşur ve bunlar yarıiletken diyotun veya güneş pilinin performansını olumsuz yönde etkilerler. Diğer taraftan yarıiletken diyodun seri direnci idealde sıfır kabul edilirken uygulamada oldukça büyüktür. Çünkü alt ohmik ve üst

doğrultucu kontaklar, katkı atomlarının yoğunluğu, yarıiletkenin gövde direnci ve kullanılan kontak tellerinden dolayı diyodun seri direncinde önemli artışlar meydana getirir.



Şekil 2.5. Hayali yüklerden/kuvvetlerden dolayı metal ile yarıiletken arasındaki engel potansiyel yüksekliğinde görülen engel düşmesi

Metal-yarıiletken diyotlarda hayali yüklerden dolayı metal ile yarıiletken arasında oluşan potansiyel engel yüksekliğinde Şekil 2.5’de olduğu gibi $\Delta\Phi_B$ kadar bir düşme olur. Çünkü bir yarıiletkenin veya iletkenin yüzeyinde x kadar içerideki elektronu yüzeyden x kadar uzağında hayali (görüntü) yükü oluşur. Dolayısıyla bu hayali ve gerçek yük arasında aşağıda verilen gibi bir Coulomb potansiyel etkileşmesi olur [1,2].

$$\Phi(x) = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_s(2x)^2} = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_s x^2} \quad (2.4)$$

Yine metal ile yarıiletken arasında yüklerin ayrışması sonucu bir elektrik alan ($V = -\epsilon x$) oluştuğu için toplam elektriksel potansiyel aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\phi(x) = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_s x^2} - \epsilon x \quad (2.4)$$

Böylece, metal ile yarıiletken arasında oluşan potansiyel engel biçimi şekil 2.5’de verildiği gibi olacaktır. Son zamanlarda klasik metal-yarıiletken (MS) yarıiletken diyotlarda; metali yarıiletkenden izole etmek ve aralarındaki yük geçişlerini düzenlemek amacıyla genelde yalıtkan bir tabaka farklı yöntemlerle (termal oksidasyon gibi) oluşturulur. Normal şartlarda

da M/S arayüzünde laboratuvar ortamında oksitlenmeden dolayı doğal bir oksit tabaka da oluşabilir ancak bu tabakanın kalınlığı yaklaşık olarak 3 nm civarındadır. M/S arayüzeyinde oluşturulan bir arayüzey tabakası MS Schottky diyodunu metal-yalıtkan/oksit-yarıiletken (MIS/MOS) tipi Schottky diyotlara dönüştürür. Ancak bu yalıtkan arayüzey filmlerin/tabakaların geleneksel termal ve püskürtme yöntemleriyle oluşturulması hem zor hem de maliyetlidir.

Yalıtkan SiO₂ gibi bir yalıtkan tabaka oldukça kararlı olmasına rağmen hem düşük dielektrik sabitine ($\epsilon_i = 3.8 \epsilon_0$; burada $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14}$ F/cm boşluğun dielektrik sabitidir) hem de yüksek kaçak akımlarına sahiptir. Bu nedenle, son zamanlarda geleneksel yalıtkanlara (SiO₂, SnO₂, TiO₂) göre daha ucuz, üretimi kolay, esnek, yüksek mukavemet ve yüksek dielektrikli polimer/organik arayüzey tabakaları tercih edilmektedir. Her ne kadar polimerler düşük iletkenlik ve dielektrik değerlerine sahip olmasına rağmen bu değerler saf polimerin içerisine uygun oranlarda metaller (Zn, Co, Ni, Gr) veya metal oksitler CuO_x, MnO_x, ZnO_x, FeO_x, BiO_x) katkılanarak arttırılabilir veya ayarlanabilir [32-39]. Yüksek dielektrikli yalıtkanlar, ferroelektrikler ve polimer arayüzey tabakalarının MS tipi diyodun performansını arttırdığı birçok araştırmacı tarafından ispatlanmıştır [40-45].



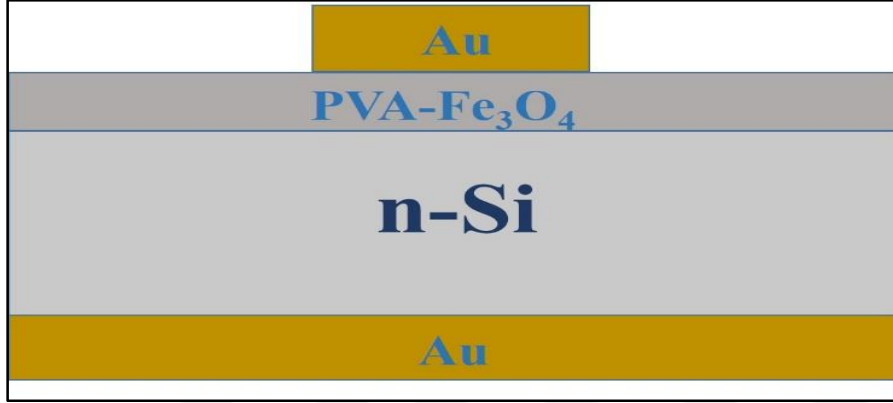
3. DENEYSEL DETAYLAR

Au/(Fe₃O₄:PVA)/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotlar (SDs) n-Si alttaşı üzerine oluşturuldu. Seçilen bu niSi alltaşı (100) yöneliminde, 350 µm kalınlığında, 2" (5.08 mm) çapında, 1-10 Ω·cm özdirence sahip olup bir yüzeyi kimyasal olarak parlatılmıştır. Üretimden önce, demir klorür (FeCl₂·4H₂O) ve ferrik klorür (FeCl₃·6H₂O) Merck Company'den, sodyum hidroksit (NaOH) ve amonyum hidroksit (NH₄OH) ise Loba Chemie'den temin edilmiştir. Bir önceki çalışmamızda [31], yapı kalitesi, Cu-Kα (λ=1.5406 Å) radyasyonu ile 20° ile 80° arasında 2θ aralığında X-ışını kırınımı (XRD) kullanılarak ve taramalı elektron mikroskobu (SEM, LEO 1430vp) ile incelenmiş ve nanoyapıların bant aralığı ve soğurma değeri, UV-1800 Shimadzu UV-Vis spektrofotometresi yardımıyla ölçülmüştür.

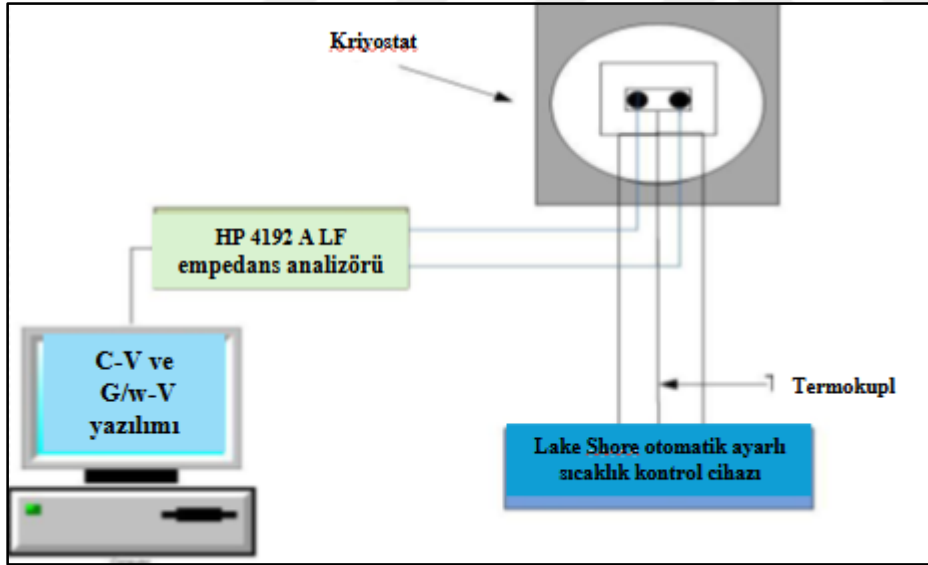
Ferrit nanoyapıların hazırlanması için, 10 ml FeCl₂·4H₂O (0.3 M) ve 10 ml FeCl₃·6H₂O (0.6 M) çözeltileri hazırlanmış ve birbiriyle karıştırılmıştır. Ardından, 6 ml amonyum hidroksit (NH₄OH) çözeltisi 100 ml saf suya (DIW) eklenmiştir. Amonyum hidroksit çözeltisinin ultrason yardımıyla karıştırılması ve çözeltiliye argon gazı geçirilmesi sırasında, katyon karışımı damla damla eklenmiştir. 30 dakika sonra, siyah bir çökelti hızla oluşmuş, çökelti ayrılmış, birkaç damla amonyum hidroksit çözeltisi ve saf su ile yıkanmış ve ardından oda sıcaklığında kurutulmuştur. Fabrikasyondan önce, n-Si alttaşlar, yaklaşık 70 °C sıcaklıkta, sırasıyla 5 dakika süreyle H₂O:H₂O₂:NH₄OH (64;13;13) ve HF:H₂O (1;24) çözeltileri kullanılarak 35 kHz frekansta çalışan bir ultrasonik banyoda temizlendi. Daha sonra, 18 MΩ·cm özdirence sahip deiyoniz su içinde 10 dakika durulandıktan sonra kuru azot gazı (N₂) ile kurutuldu. Hemen ardından, yüksek vakumlu metal kaplama sisteminin vakum odasına bu n-Si alttaşlar aktarıldı ve tüm arka yüzeyine 1 µTorr basınç altında, 150 nm kalınlığında yüksek saflıktaki (99.999%) altın (Au) ile kaplandıktan sonra düşük dirençli iyi bir ohmik kontak sağlamak için 550 °C de azot ortamında tavlandı. Bu işlemin hemen ardından, hazırlanan (PVA:Fe₃O₄) kompozit çözeltisi ara katman olarak spin-kaplama yöntemi ile n-Si alttaşın ön yüzüne büyütüldü.

Son adımda, aynı aynı metal buharlaştırma sisteminde ve aynı basınç altında (PVA-Fe₃O₄) kompozit/organik ara katman üzerine 1 mm yarıçapında ve 150 nm kalınlığında dairesel altın (Au) doğrultucu kontaklar oluşturuldu. Böylece, Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si Schottky diyotlarının (SDs) hazırlanma/fabrikasyon süreci tamamlanmış oldu. Hem tüm üretim süreci

hem de hazırlana arayüzey tabakanın yapısal analizi ile ilgili daha fazla bilgi referans [31]'de bulunabilir. Hazırlanan Au/(Fe₃O₄:PVA)/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotların şematik gösterimi ve empedans ölçümleri (C-V-f, G/ω-V-f) için kullanılan sistem Şekil. 3.1 ve 3.2'de verildi.



Şekil 3.1. Hazırlanan Au/(Fe₃O₄:PVA)/n-Si (MPS) tipi Schottky diyotların şematik yapısı



Şekil 3.2. Empedans ölçümlerinde alınmasında kullanılan deneysel ölçüm sistemi

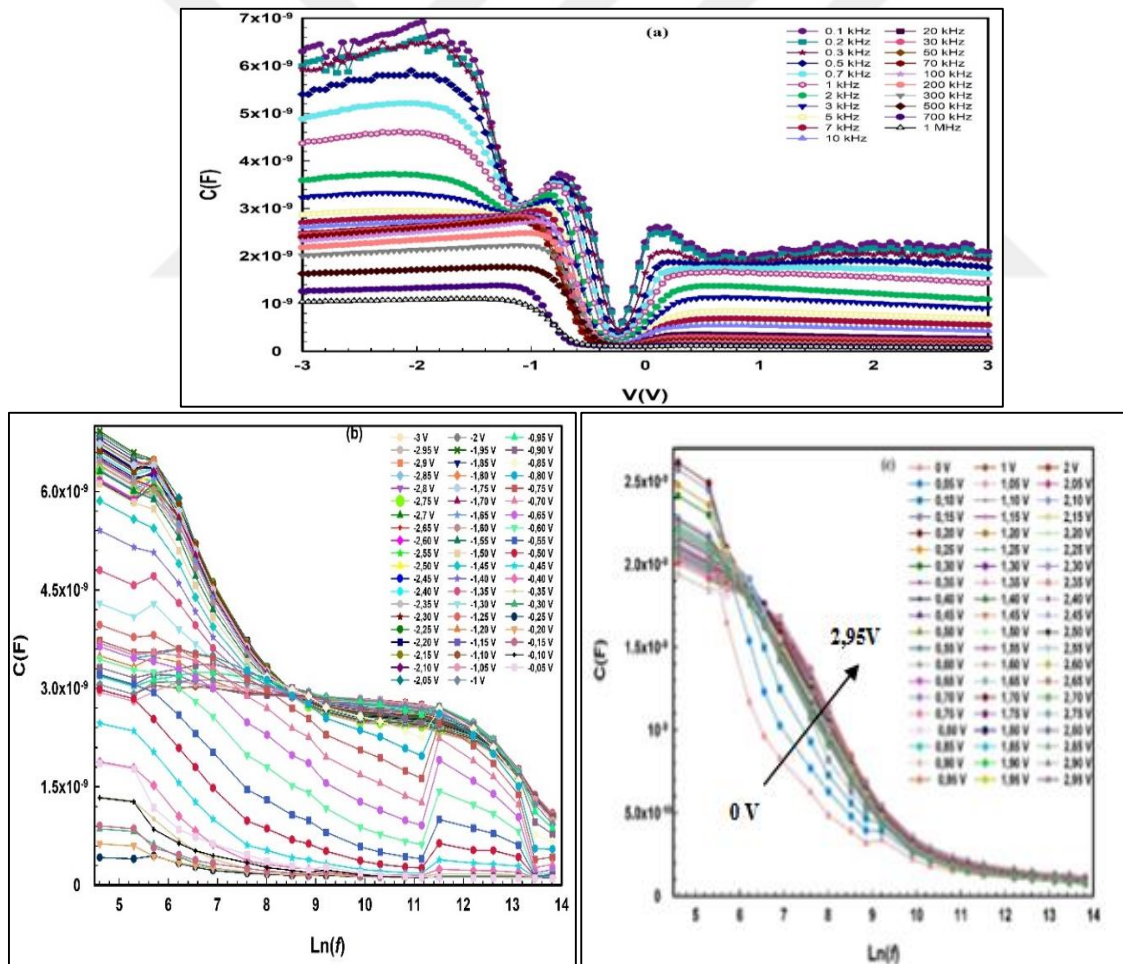


Şekil 3.3. HP 4192A LF empedans analizörü



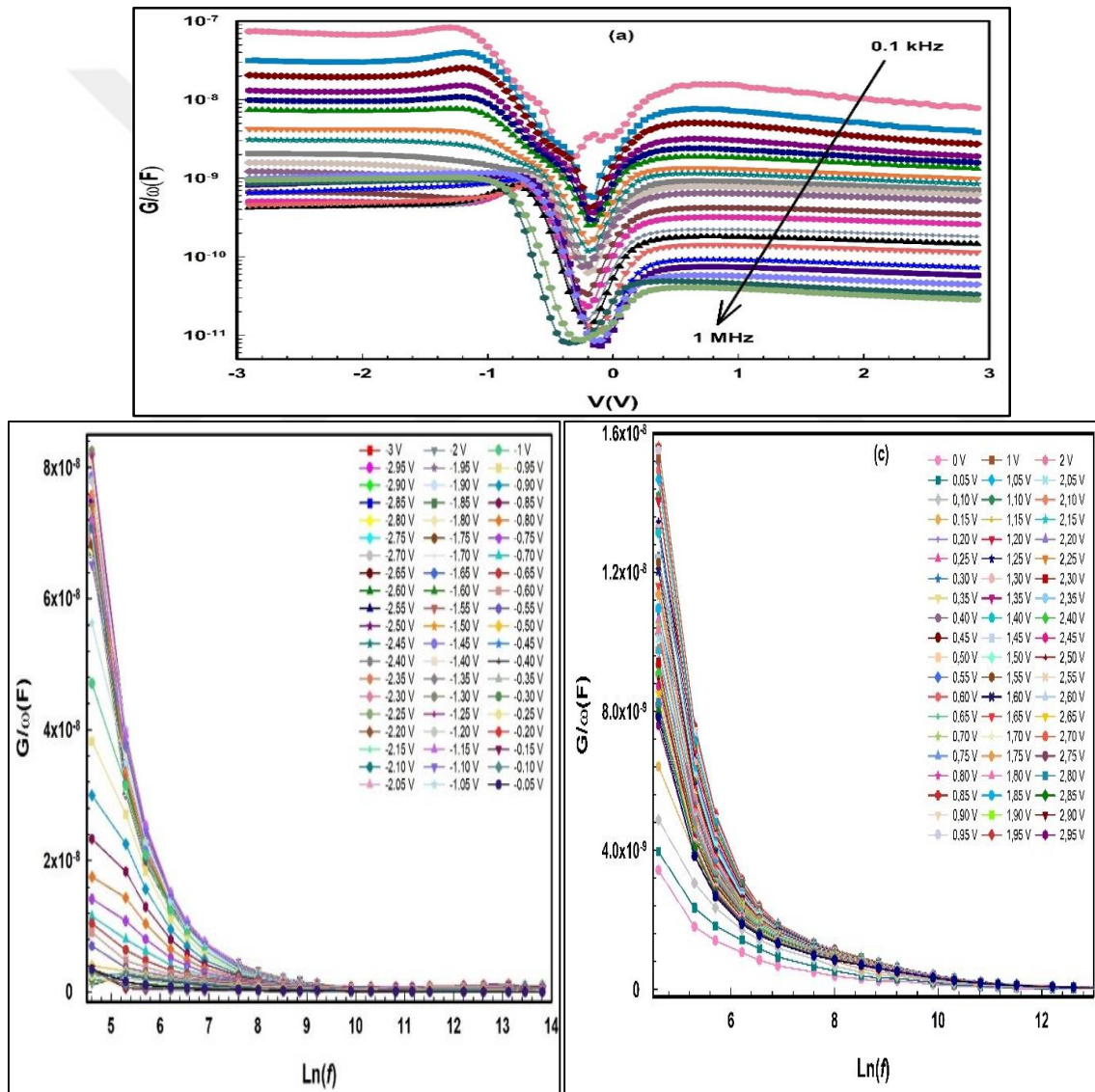
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Önceki çalışmamızda, Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si Schottky diyotlarının ileri bias akım-voltaj (I_F - V_F) eğrileri, 80K ile 320K arası ve $\pm 2V$ arasında detaylı bir şekilde incelenmiş ve olası yük taşıma mekanizmaları ve M/S arayüzündeki BH doğası hakkında daha güvenilir ve doğru bilgiler sağlanmıştır [31]. Gözlemlenen BH artışı ve n azalma, TE modeli ve BH'lerin ortalama BH etrafında çift Gauss Dağılımı (DGD) ile açıklanmıştır. Temel elektriksel parametrelerin frekans ve voltaja dayalı olarak incelenmesi, Nss, Rs, polarizasyon ve ara katman etkilerinin ileri/ters beslemede empedans ölçümleri üzerindeki etkisini belirlemek için önemli olduğu iyi bilinmektedir. Bu amaçla, Z-V-f ölçümleri geniş frekans aralığında gerçekleştirilmiş ve ölçüm sonuçları sırasıyla Şekil 1(a - c) ve 2(a - c)'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. (a). Farklı frekanslar için Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si Schottky diyotunun voltaj bağımlı C-V eğrileri, (b,c). sırasıyla negatif ve pozitif voltajlar için C-ln(f) eğrileri

Şekil 4.1(a), neredeyse tüm frekanslar için metal/oksit/yarı iletken (MOS) tipi yapı gibi, C-V eğrilerinin birikim ($\sim -3/-1.5V$), tükenme ($\sim -1.5/-0.2V$) ve tersinim ($-0.2/3V$) bölgelerini açıkça göstermektedir. Genel olarak, yüksek frekanslar ve voltajlar, kapasite ve iletkenlik değerlerinde azalmaya yol açar ve sırasıyla birikim ($\sim -2V$), tükenme ($\sim -0.5V$) ve tersinim ($\sim +0.5V$) bölgelerine karşılık gelen üç belirgin tepe oluşturur. Literatürde, C-V eğrilerinin birikim bölgesinde gözlemlenen bu tepe davranışı "Anomalous peak" (Anormal tepe) olarak adlandırılmakta olup, bu tepenin oluşumunun ana nedenleri olarak, birleşim bölgesindeki N_{ss} özel dağılımı ve polarizasyon gösterilmiştir [2,17,28,29].



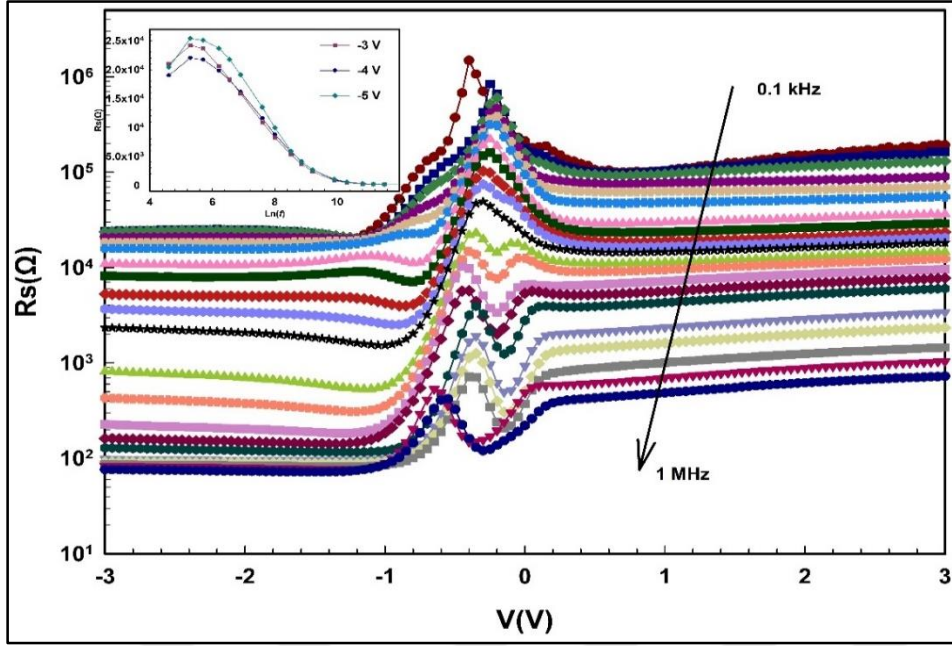
Şekil 4.2. (a). Farklı frekanslar için Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si Schottky diyotunun voltaj bağımlı G/ω -V eğrileri, (b,c). sırasıyla negatif ve pozitif voltajlar için G/ω - $\ln(f)$ eğrileri

Tükenme ve birikim bölgelerinde gözlemlenen tepeler, yarı iletkenin bant aralığında, ara katman ile yarı iletken arasındaki N_{ss} 'nin özel yoğunluk-dağılımı ve Maxwell-Wagner tipi polarizasyon ile açıklanmıştır [9,10,17,18,22,26]. Çünkü tuzaklarda veya N_{ss} 'de bulunan elektronların C/G-V eğrileri üzerindeki etkisi, yaşam süreleri (τ) ve periyotları ($T=1/2\pi f$) ile ilişkilidir ve bu da gerçek değerlerine önemli bir aşırı $C_{ex.}$ ve $G_{ex.}$ katkısına yol açar. Diğer bir deyişle, eğer $T \gg \tau$ (düşük ve orta frekanslar için), o zaman bu durumlar veya tuzaklar, diyot üzerine uygulanan alternatif sinyali kolayca takip edebilir ve dipoller, yeterli zamanla elektrik alanı yönünde kolayca dönebilirler [2,5,17,22,27-29]. Aksi takdirde, birikim bölgesindeki C-V eğrilerinde görülen tepeler, N_{ss} yerine diyotun R_s 'si ile açıklanmıştır. Çünkü, N_{ss} düşük-orta frekansta tükenme-tersinim bölgelerinde etkiliyken, R_s yalnızca yüksek frekansta birikim bölgesinde etkilidir [2,17,27-29]. Şekil 4.1(b, c)'de görülebileceği gibi, C'nin büyüklüğü, frekans arttıkça hemen hemen üssel olarak azalır çünkü N_{ss} 'nin dışsal alternatif sinyali takip etme yeteneği, frekans arttıkça hızla azalır ve dolayısıyla N_{ss} ve polarizasyonun C ve G'ye katkısı önemli ölçüde düşer.

R_s etkisini C-V eğrileri üzerindeki etkisini belirlemek için, tüm frekansta ve ölçüm voltajı aralığında elde edilen C ve G değerlerinden Nicollian & Brews yöntemi kullanılarak voltaja bağlı direnç (R_i) - V eğrileri de hesaplanmış ve Şekil 4.3'te gösterilmiştir [17].

$$R_i(V) = \frac{G_i}{[G_i^2 + (\omega_i^2 C_i^2)]} \quad (4.1)$$

Denklem 1'de, G_i ve C_i her voltaj için deneysel iletkenlik/kapasitans (G_m, C_m) değerlerini, ω ($=2\pi f$) ise açılmal frekansı ifade eder. Şekil 4.3'te belirtildiği gibi, R_i 'nin büyüklüğü, frekans arttıkça azalmakta ve ayrıca voltaj arttıkça, zirve bölgeleri hariç, artmaktadır. Ancak, -1V ile 0V arasındaki gözlemlenen pikler, ara katman/yarı iletken arayüzündeki N_{ss} 'nin özel bir dağılımının sonucudur. Şekil 4.3'te gösterildiği gibi, diyotun gerçek R_s değeri, yeterince yüksek frekansta ($f \geq 500$ kHz) güçlü birikim bölgesine karşılık gelmektedir. Şekil 3'ün ek kısmında belirtildiği gibi, birikim bölgesindeki (-3V, -4V ve -5V) R_s büyüklüğü, frekans arttıkça azalmakta ve frekans ile voltajdan bağımsız hale gelmektedir. Bu sonuçlar, R_i değerinin frekans ve bias voltajına bağlı olarak değiştiğini, ancak gerçek R_s değerinin yeterince yüksek frekansta güçlü birikim bölgesine karşılık geldiğini göstermektedir.



Şekil 4.3. Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si Schottky diyotunun Rs ile V ve Rs ile ln(f) eğrileri

Hazırlanan diyotunun, V_D , N_D , E_F , Φ_B , W_D , E_m , görüntü kuvveti ile indirgenmiş engel yüksekliği ($\Delta\Phi_B$) değerleri, C^{-2} -V eğrisinin kesişim (V_o) ve eğimi kullanılarak, 295 K'de 10 kHz -1 MHz arasındaki frekans aralığında aşağıdaki denklemlerle elde edilmiştir [2].

$$C^{-2} = \frac{2(V_R + V_o)}{q\epsilon_s\epsilon_o A^2 N_D} \quad (4.2)$$

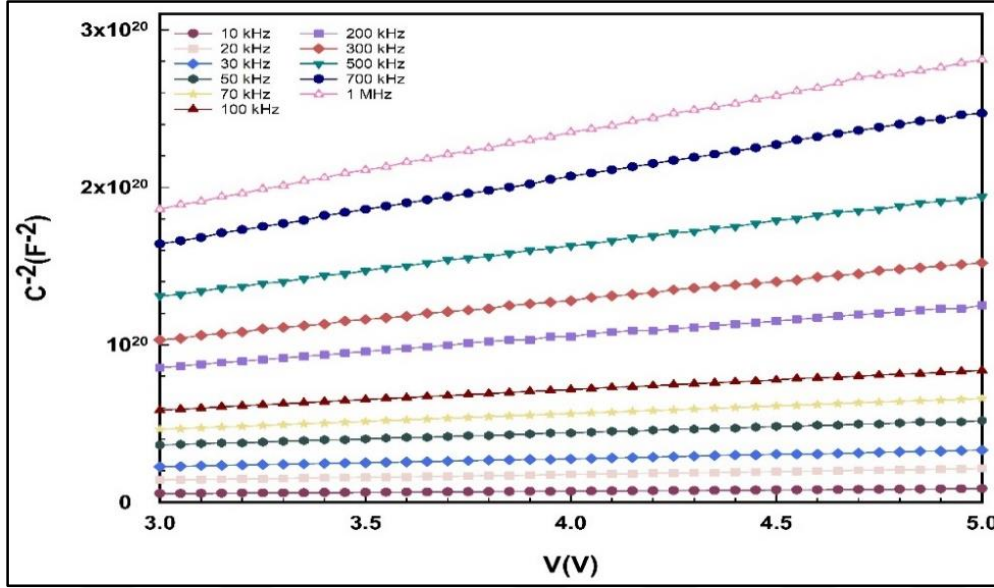
$$E_F = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right) \quad (4.3)$$

$$W_D = \left(\frac{2\epsilon_s\epsilon_o V_D}{qN_D}\right)^{1/2} \quad (4.4)$$

$$E_m = \left(\frac{2qN_D V_o}{\epsilon_s\epsilon_o}\right)^{1/2} \quad (4.5)$$

$$\Delta\Phi_B = \left(\frac{2E_m}{4\pi\epsilon_o}\right)^{1/2} \quad (4.6)$$

Denklem 4.2-4.6'da V_D , N_D , N_C , $\epsilon_{(s)}$ ve ϵ_o terimleri sırasıyla $V_D(=V_o+kT/q)$, donör atomlarının seviyesi, iletken banttaki enerji durumlarının yoğunluğu (E_c), yarı iletkenin ve serbest uzay permittivitesi ($=8.85 \times 10^{-12}$ F.m⁻¹) olarak ifade edilmiştir. V_D , N_D , E_F ve $\Delta\Phi_B$ değerleri hesaplandıktan sonra, $\Phi_B(C-V)$ değeri, tüm frekanslar için Denklem 4.4'ten hesaplanmıştır [2]. Bu hesaplanan temel elektriksel parametreler Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 4.4. Farklı frekansta Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si Schottky diyotunun 1/C²-V eğrileri

Çizelge 4.1. Farklı frekansta Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si Schottky diyotunun hesaplanan temel deneysel değerleri (V_D, N_D, E_F, W_D, E_m, ve ΔΦ_B, Φ_B(C-V))

| Frekans (kHz) | Ln(f) | V _D (eV) | N _D x10 ¹⁵ (cm ⁻³) | E _F (eV) | Φ _B (eV) | W _d x10 ⁻⁵ (cm) | E _m (kV/cm) | ΔΦ _B (eV) | Rs (kΩ) |
|---------------|--------|---------------------|--|---------------------|---------------------|---------------------------------------|------------------------|----------------------|---------|
| 1 | 6,908 | 0,996 | 20,916 | 0,180 | 1,176 | 0,996 | 79,902 | 0,107 | 15,9 |
| 2 | 7,601 | 0,962 | 9,471 | 0,200 | 1,162 | 0,962 | 52,835 | 0,087 | 10,9 |
| 3 | 8,006 | 0,927 | 6,461 | 0,209 | 1,137 | 0,927 | 42,846 | 0,079 | 8,21 |
| 5 | 8,517 | 0,901 | 3,683 | 0,223 | 1,124 | 0,901 | 31,881 | 0,068 | 5,27 |
| 7 | 8,854 | 0,866 | 2,286 | 0,235 | 1,102 | 0,866 | 24,635 | 0,060 | 3,68 |
| 10 | 9,210 | 0,797 | 1,338 | 0,249 | 1,045 | 0,797 | 18,068 | 0,051 | 2,35 |
| 20 | 9,903 | 0,723 | 0,505 | 0,273 | 0,997 | 0,723 | 10,579 | 0,039 | 0,81 |
| 30 | 10,309 | 0,698 | 0,320 | 0,285 | 0,982 | 0,698 | 8,266 | 0,034 | 0,43 |
| 50 | 10,820 | 0,642 | 0,195 | 0,297 | 0,939 | 0,642 | 6,196 | 0,030 | 0,223 |
| 70 | 11,156 | 0,591 | 0,147 | 0,304 | 0,895 | 0,591 | 5,154 | 0,027 | 0,16 |
| 100 | 11,513 | 0,557 | 0,114 | 0,310 | 0,867 | 0,557 | 4,405 | 0,025 | 0,13 |
| 200 | 12,206 | 0,487 | 0,075 | 0,321 | 0,808 | 0,487 | 3,341 | 0,022 | 0,09 |
| 300 | 12,612 | 0,474 | 0,061 | 0,326 | 0,800 | 0,474 | 2,982 | 0,021 | 0,091 |
| 500 | 13,122 | 0,427 | 0,048 | 0,332 | 0,759 | 0,427 | 2,508 | 0,019 | 0,086 |
| 700 | 13,459 | 0,376 | 0,036 | 0,339 | 0,715 | 0,376 | 2,025 | 0,017 | 0,083 |
| 1000 | 13,816 | 0,360 | 0,032 | 0,342 | 0,702 | 0,360 | 1,863 | 0,016 | 0,076 |

Çizelge 4.1'de gösterildiği gibi, bu parametrelerin neredeyse tamamı, özellikle düşük frekansta, N_{ss} , bunların τ süreleri ve dipol polarizasyonuna bağlı olarak frekansa göre değişmiştir. N_{ss} ve ara katmanın varlığı, büyük kesişim voltajı (V_o) ve $\Phi_B(C-V)$ değerinin E_g değerinden daha yüksek olmasına neden olur. Bu nedenle, elde edilen $\Phi_B(C-V)$ değeri, aşağıdaki düzeltme faktörü (c_2) kullanılarak düzeltilmiştir [2].

$$c_2 = \frac{N_{D(exp.)}}{N_{D(theor.)}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_i}{\epsilon_i + q^2 d_i N_{ss}} \quad (4.7)$$

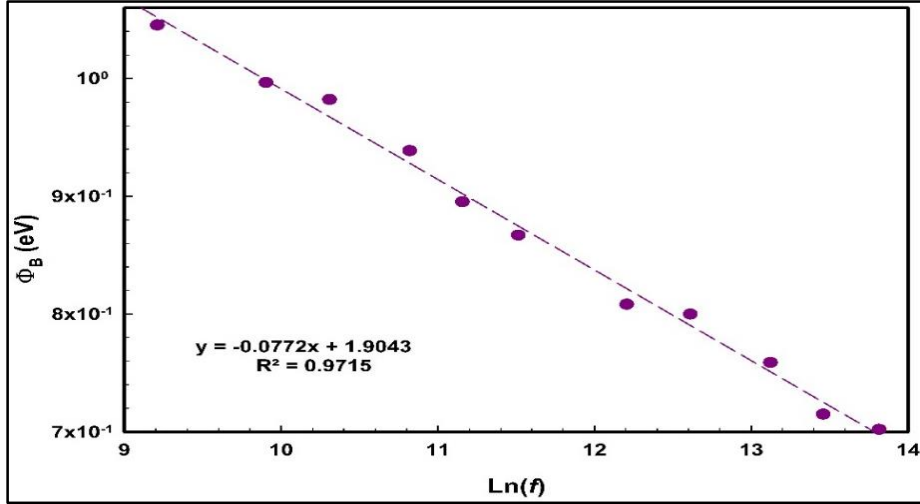
Denklem 4.7'te, N_{ss} için iki sınır durumu vardır; N_{ss} sonsuza giderken, c_2 sifıra ve N_{ss} ideale yaklaşırken, $c_2=1$ ' re yaklaşır. Dolayısıyla, gerçek $\Phi_B(C-V)$ değeri aşağıdaki gibi düzeltildi.

$$\Phi_B(C - V) = c_2 V_o + \frac{kT}{q} + E_F - \Delta \Phi_B = V_D + E_F - \Delta \Phi_B \quad (4.8)$$

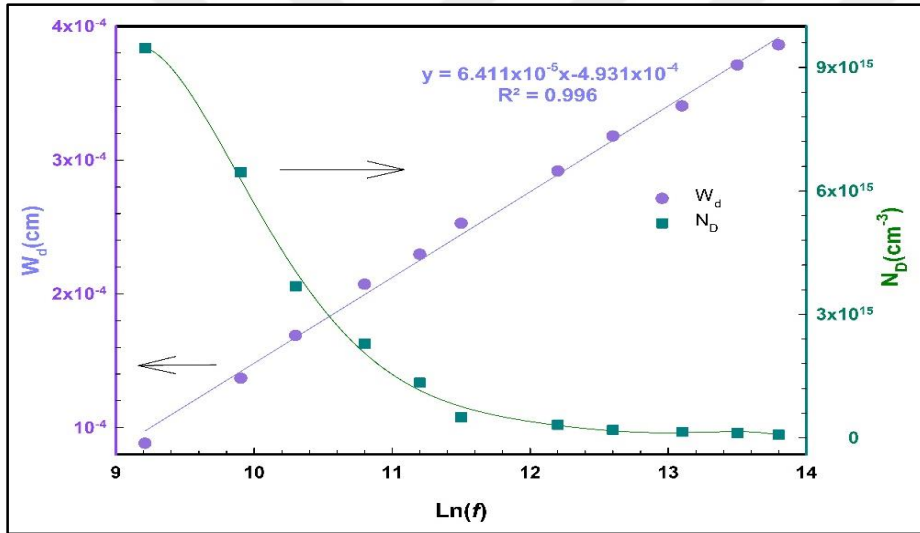
Frekans bağımlı N_{ss} , Denklem 4.7 ile şu şekilde de elde edilebilir;

$$N_{ss} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_i (1 - c_2)}{q^2 d_i c_2} \quad (4.9)$$

N_{ss} 'in ortalama değeri 10 kHz için $1.72 \times 10^{13} / (\text{eV} \cdot \text{cm}^2)$ olarak hesaplanmıştır. Hem Şekil 4.5'te hem de Tablo 4.1'de gösterildiği gibi, $\Phi_B(C-V)$ değeri frekansın artışıyla doğrusal olarak azalmaktadır ($\Phi_B = -0.077x + 1.904$) eV. Diğer taraftan, N_D ve c_2 değerleri frekans arttıkça üssel olarak azalmaktadır (Şekil 4.6). N_D ve c_2 'nin frekansın artışıyla gösterdiği bu davranış, N_{ss} ve N_D değerlerinin frekansın azalmasıyla arttığını göstermektedir. Çünkü düşük frekansta, tuzaklanmış elektronik yükler alternatif sinyali kolayca takip edebilir ve bu da kapasite ve iletkenlik değerlerinde bir artışa ve/veya fazlalığa yol açar.



Şekil 4.5. Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si SD'nin Φ_B(C-V) ile ln(f) arasındaki grafik



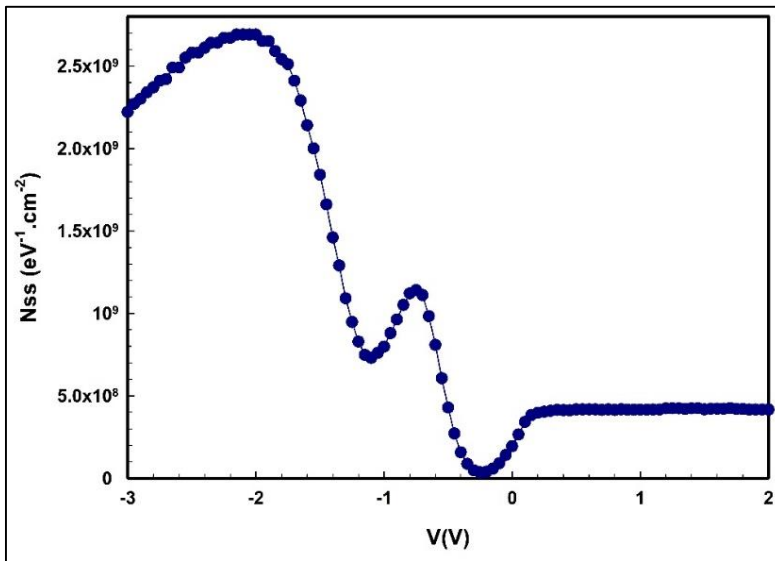
Şekil 4.6. Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si SD'nin W_D ve N_D ile ln(f) arasındaki grafik

Çünkü SD üzerinde bir elektrik alanı bulunmaktadır, ara yüzey ile yarı iletken arasındaki N_{ss} seviyesi, değerlik ile iletkenlik bantları arasındaki kenarla yukarı/aşağı hareket edebilir, bu nedenle E_F seviyesi neredeyse sabit kalır. Literatürde, C-V ölçümlerinden N_{ss} 'nin voltaj bağımlı dağılımlarını elde etmek için bir dizi model bulunmaktadır; bunlar arasında R. Castagne ve Vapaille tarafından geliştirilen (C_{LF} - C_{HF}) tekniği [32], Hill & Coleman [33] yöntemi ve Nicollian & Goetzberger tarafından tanımlanılan iletkenlik yöntemi [34] bulunmaktadır ve bunlar arasında en hassas ve doğru olanı admittance (geçirgenlik) yöntemidir. Aksi takdirde, bu yöntem birçok C/G-V-f grafiği gerektirir ve aynı zamanda daha fazla zaman harcar, oysa (C_{LF} - C_{HF}) tekniği sadece iki C-V grafiği gerektirir. Düşük

frekansta ($f \leq 0.1$ kHz), N_{ss} 'de bulunan elektronik yüklerin, alternatif sinyali kolayca takip edebileceği ve bu nedenle C ve G 'nin ölçülen değerlerine eklemeye yapacağı düşünülmektedir. Buna karşılık, yüksek frekansta ($f \geq 0.5$ MHz), bunların hiçbiri alternatif sinyali takip etme yeteneğine sahip değildir ve katkıları iptal edilebilir [2,5,9,10,17]. Bu varsayıma göre, N_{ss} 'nin voltaj bağımlı eğrisi, aşağıdaki denklemi kullanarak C_{LF} ve C_{HF} 'ye karşılık gelen bu iki C-V grafiğinden hesaplanabilir [32].

$$qAN_{ss}(V) = \left[\left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} \right] \quad (4.10)$$

Denklem 4.10'da; A , diyot alanı, C_i , ara yüzey kapasitansı, C_{LF} , 0.1 kHz'deki ölçülen kapasitans ve C_{HF} , 1 MHz'deki ölçülen kapasitansdır. N_{ss} -V grafiği, C_{LF} -V (0.1 kHz) ve C_{HF} -V (1 MHz) eğrileri kullanılarak Denklem 4.10'dan elde edilmiş ve Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Şekil 4.7'de, N_{ss} -V eğrisinin üç belirgin pike sahip olduğu görülmüştür; bunlardan ikisi yaklaşık -0.8V'deki tükenme ve yaklaşık -0.2V'deki tersinme ile ilişkilidir. Birikim bölgesinde elde edilen pik (ilk pik), yapının R_s 'sine atanabilir, ancak son iki zirve, N_{ss} 'nin (PVA- Fe_3O_4) ve n-Si'nin bant aralığındaki belirli bir dağılımına atfedilebilir. N_{ss} sıralamalarının yaklaşık $10^{12}/eV^1.cm^2$ olduğu ve MIS tipi SD'lerle oldukça benzerdir. Bu düşük N_{ss} büyüklükleri, kullanılan (PVA- Fe_3O_4) ara yüzey katmanının pasivasyon etkisinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.7. Au/(PVA- Fe_3O_4)/n-Si için (C_{LF} - C_{HF}) frekans metodu ile hesaplanan N_{ss} -V eğrisi

Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si SD'nin voltaja bağılı N_{ss} eğrileri ve τ eğrileri, Nicollian ve Goetzberger tarafından önerilen paralel iletkenlik tekniği kullanılarak, Denklem 4.11 ile hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar hem ters bölgede (0.0/3V) hem de tükenme-birikim bölgelerinde (-3V/0.0V) yapılmıştır. Birikim-tükenme bölgelerinde ve ters bölgelerdeki C ve G/ω'nin frekans bağımlılığı, Şekil 4.1(b, c) ve 4.2(b, c) üzerinde verilmiştir. Bu eğriler/veriler kullanılarak, (G_p/ω) - ln(f) profilleri Denklem 4.11'den çıkarılmıştır. Bu (G_p/ω) - ln(f) grafikleri, tükenme/negatif voltaj bölgesi ve ters/pozitif voltaj bölgesi için sırasıyla Şekil 8(a) ve Şekil 9(a)'da verilmiştir.

$$\frac{G_p}{\omega} (V) = \frac{\omega G_m C_i}{G_m^2 + \omega^2 (C_i - C_m)^2} = \frac{q A N_{ss}}{2 \omega \tau} \ln(1 + (\omega \tau)^2) \quad (4.11)$$

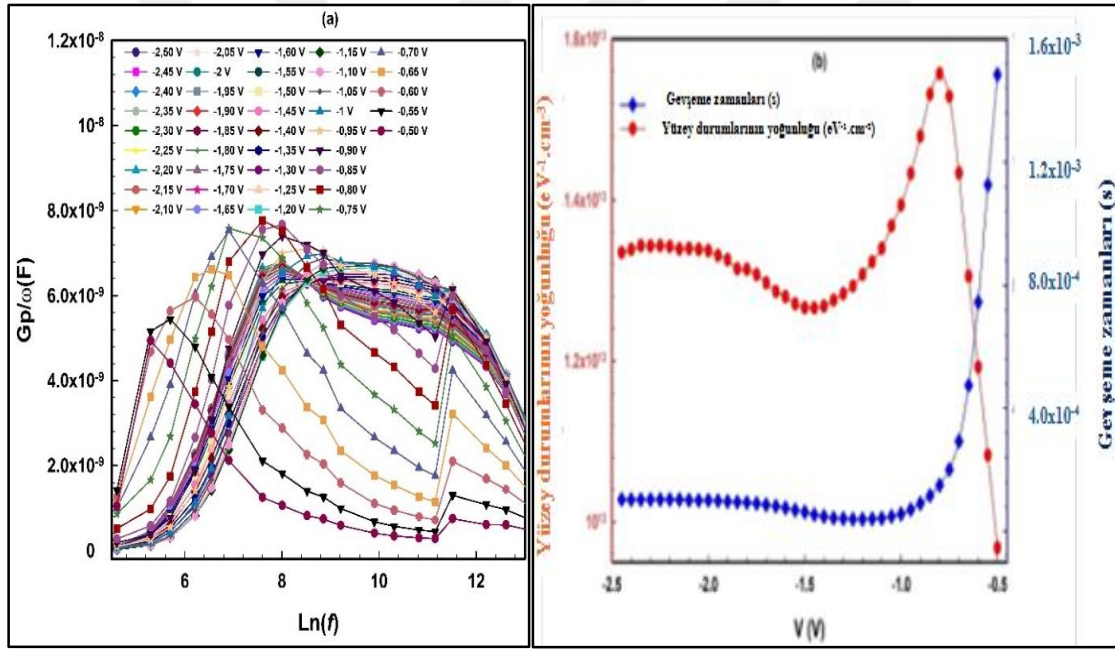
Nicollian & Brews'e göre, her sabit voltajdaki (G_p/ω) vs ln(f) grafikleri, Şekil 4. 8 ve 4. 9'da görüldüğü gibi pik verir ve bu pik değerinde, ωτ=1.98 ve N_{ss}=(G_p/ω)_{max}./0.402qA olur. Bu şekilde, N_{ss} ve τ değerleri her sabit voltaj için hesaplandı ve tüm sabit voltajlar için Çizelge 4.2'de sıralanmıştır. Şekil 4.8(b) ve Şekil 4.9(b), bu değerlerin voltaja bağılı değişimini göstermektedir.

Çizelge 4.2. Paralel iletkenlik yöntemi ile farklı uygulanan sabit voltajlar için elde edilen deneysel (G_p/ω)_{max}, N_{ss} ve τ değerleri

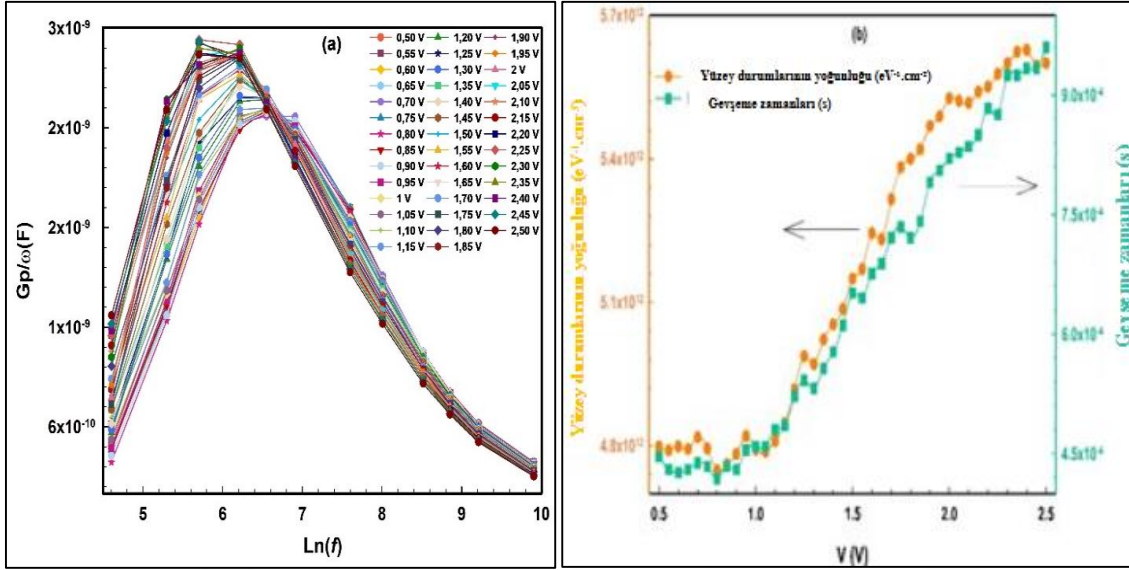
| Tükenme/negatif voltaj bölgesi | | | | | Ters/pozitif voltaj bölgesi | | | | |
|--------------------------------|-------|---|---|----------------------------|-----------------------------|-------|---|---|----------------------------|
| V (V) | Ln(f) | G _p /ω) _{max} (nF) | N _{ss} ×10 ¹³ eV ⁻¹ .cm ⁻² | τ ×10 ⁻⁴ (s) | V (V) | Ln(f) | G _p /ω) _{max} (nF) | N _{ss} ×10 ¹² eV ⁻¹ .cm ⁻² | τ ×10 ⁻⁴ (s) |
| -2,50 | 8,03 | 6,70 | 1,33 | 1,02 | 0,50 | 6,56 | 2,42 | 4,80 | 4,47 |
| -2,40 | 8,03 | 6,76 | 1,34 | 1,03 | 0,60 | 6,61 | 2,42 | 4,80 | 4,26 |
| -2,30 | 8,02 | 6,78 | 1,34 | 1,04 | 0,70 | 6,58 | 2,43 | 4,82 | 4,38 |
| -2,20 | 8,02 | 6,78 | 1,34 | 1,04 | 0,80 | 6,62 | 2,40 | 4,75 | 4,19 |
| -2,10 | 8,04 | 6,76 | 1,34 | 1,02 | 0,90 | 6,60 | 2,41 | 4,78 | 4,30 |
| -2,00 | 8,04 | 6,75 | 1,34 | 1,01 | 1,00 | 6,53 | 2,42 | 4,79 | 4,59 |
| -1,90 | 8,08 | 6,69 | 1,33 | 0,97 | 1,10 | 6,49 | 2,43 | 4,81 | 4,81 |
| -1,80 | 8,12 | 6,63 | 1,31 | 0,93 | 1,20 | 6,40 | 2,48 | 4,92 | 5,22 |
| -1,70 | 8,20 | 6,55 | 1,30 | 0,86 | 1,30 | 6,38 | 2,51 | 4,97 | 5,32 |
| -1,60 | 8,33 | 6,46 | 1,28 | 0,76 | 1,40 | 6,30 | 2,55 | 5,05 | 5,78 |
| -1,50 | 8,52 | 6,39 | 1,27 | 0,62 | 1,50 | 6,18 | 2,60 | 5,15 | 6,52 |
| -1,40 | 8,78 | 6,40 | 1,27 | 0,48 | 1,60 | 6,14 | 2,65 | 5,24 | 6,76 |

Çizelge 4.2. (devam) Paralel iletkenlik yöntemi ile farklı uygulanan sabit voltajlar için elde edilen deneysel $(G_p/\omega)_{max}$, N_{ss} ve τ değerleri

| | | | | | | | | | |
|-------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| -1,30 | 8,93 | 6,48 | 1,28 | 0,41 | 1,70 | 6,08 | 2,68 | 5,32 | 7,21 |
| -1,20 | 8,97 | 6,60 | 1,31 | 0,40 | 1,80 | 6,08 | 2,68 | 5,40 | 7,21 |
| -1,10 | 8,91 | 6,77 | 1,34 | 0,42 | 1,90 | 5,99 | 2,76 | 5,47 | 7,91 |
| -1,00 | 8,62 | 7,04 | 1,39 | 0,56 | 2,00 | 5,95 | 2,79 | 5,53 | 8,21 |
| -0,90 | 8,15 | 7,47 | 1,48 | 0,90 | 2,10 | 5,93 | 2,79 | 5,52 | 8,36 |
| -0,80 | 7,65 | 7,86 | 1,56 | 1,50 | 2,20 | 5,88 | 2,80 | 5,55 | 8,83 |
| -0,70 | 6,98 | 7,24 | 1,43 | 2,93 | 2,30 | 5,83 | 2,86 | 5,60 | 9,25 |
| -0,60 | 6,05 | 6,02 | 1,19 | 7,45 | 2,40 | 5,82 | 2,84 | 5,63 | 9,34 |
| -0,50 | 5,36 | 4,89 | 9,68 | 14,80 | 2,50 | 5,79 | 2,83 | 5,60 | 9,60 |



Şekil 4.8. (a). $(G_p/\omega) - \ln(f)$ eğrileri, (b). Tükenim bölgesi için Au/(PVA- Fe_3O_4)/n-Si diyotun $N_{ss}-V$ ve $\tau-V$ eğrileri



Şekil 4.9. (a). Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si SD'nin (G_p/ω) vs $\ln(f)$ eğrileri (terslenim bölgesinde) (b). N_{ss} ve τ - V eğrileri (terslenim bölgesinde)

Şekil 4. 8(b) ve Şekil 4. 9(b)'de görüldüğü gibi, N_{ss} - V grafiği tepe davranışı sergilerken, N_{ss} değeri, birikim rejiminde artan uygulanan sabit voltajla yükselir. Bununla birlikte hem birikim hem de ters çevirme rejiminde τ büyüklüğü, voltaj arttıkça artar. Özellikle, birikim rejimindeki N_{ss} büyüklüklerinin ters çevirme rejimindekilerden yaklaşık bir kat daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, N_{ss} 'nin genellikle ters çevirme rejimindense birikim rejiminde bulunduğunu açıkça göstermektedir. Başka bir deyişle, yüzey durumları, enerji bandında ara tabaka/yarı iletken ara yüzeyinde özel bir dağılım sergiler. Ancak, gevşeme sürelerine (τ) bağlı olarak, aydınlatma ve sıcaklık gibi dış faktörler altında yeniden düzenlenebilir ve yapılandırılabilir.

Düşük frekanslarda, τ büyüklükleri periyottan ($T=1/2\pi f$) daha küçük olduğu için, bu yüzey durumları alternatif sinyallere kolayca tepki verebilir. Temel elektrik parametreleri ve paralel iletkenlik tekniği üzerine yapılan benzer sonuçlar literatürde de kaydedilmiştir [4,10,34-38].

Yüzey durumlarının aksine, R_s 'nin ölçümlere etkileri yalnızca yüksek frekansta birikim bölgelerinde daha belirgindir. Bu nedenle, R_s etkilerini C-V ve G/ω -V grafiklerinden çıkarmak için ölçüm sonuçlarına Nicollian & Brews yöntemi uygulanarak 1 MHz'deki R_s değeri dikkate alınarak düzeltmeler yapılmıştır. Ölçülen değerlere bağlı olarak düzeltilmiş C_c ve G_c/ω değerlerini bulmak için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır:

$$C_c = \frac{[G_m^2 + (\omega C_m)^2] C_m}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (4.12)$$

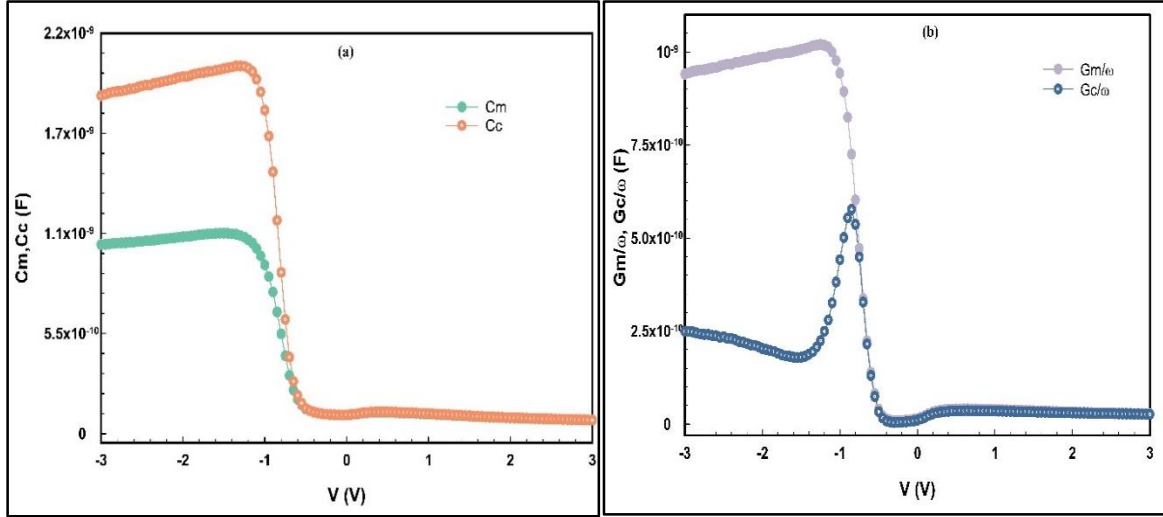
$$G_c = \frac{[G_m^2 + (\omega C_m)^2] a}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (4.13)$$

Eşitlik 4.12 ve 4.13'de, α , R_s değerine bağlı düzeltme katsayısını ifade eder ve aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$a = G_m - [G_m^2 + (\omega C_m)^2] R_s \quad (4.14)$$

Denklem 4.12, 4.13 ve 4.14 kullanılarak, düzeltilmiş değerler hesaplanmış ve ölçülen verilerle karşılaştırmalı olarak Şekil 4.10 (a, b)'de sunulmuştur. C_c değerleri birikim bölgelerinde C_m değerlerinden daha büyük, G_c değerleri ise ölçülen değerlerden daha küçüktür. Hem C hem de G için düzeltilmiş ve ölçülen değerler, birikim bölgelerinde farklılıklar göstermektedir. Buna karşılık, bu farklar tükenim bölgesinde azalmaya başlar ve ters dönüşüm bölgesinde tamamen kaybolur. Düzeltme sürecinde elde edilen sonuçlar, birikim bölgesindeki R_s etkilerinin baskın olduğunu desteklemektedir.

Denklem 4.12, 4.13, 4.14 kullanılarak düzeltilmiş değerler hesaplanmış ve Şekil 4.10 (a, b)'de ölçülen verilerle karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Birikim bölgelerinde C_c değerleri C_m değerlerinden daha büyük, G_c değerleri ise ölçülen değerlerden daha küçüktür. Hem C hem de G için düzeltilmiş ve ölçülen değerler, birikim bölgelerinde farklılıklar göstermektedir. Buna karşılık, bu farklar tükenim bölgesinde azalmaya başlar ve ters dönüşüm bölgesinde kaybolur. Düzeltme sürecinde elde edilen sonuçlar, birikim bölgesindeki R_s etkilerinin baskın olduğunu desteklemektedir.



Şekil 4.10. (a) Düzeltmiş C-V eğrileri, (b) Düzeltmiş G/ω -V eğrileri, 1 MHz frekansı için Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si SD



5. SONUÇ

Bu araştırmada, ana elektriksel parametreler hakkında daha doğru ve güvenilir bilgiler sağlamak, iletim mekanizmalarını ve polarizasyon süreçlerini incelemek amacıyla, geniş bir frekans (0.1 kHz - 1 MHz) ve gerilim (± 3 V) aralığında, 295 K sıcaklıkta Z-V-f karakteristikleri incelenmiştir. Bu amaçla, 0.1 kHz ile 1 MHz arasında $1/C^2 - V$ eğrisinin doğrusal kısmından V_D , N_D , E_F , $\delta\Phi_B$, Φ_B , W_D , E_m ve R_s gibi bazı temel elektrik parametreleri elde edilmiştir. Tüm bu parametrelerin frekansa bağlı olarak büyük değişimler gösterdiği bulunmuştur. Φ_B ve W_D değerlerinin $\ln(f)$ ile sırasıyla $\Phi_B(f) = (-0.077 \cdot \ln(f) + 1.765)$ eV ve $W_D(f) = (6.11 \times 10^{-5} \cdot \ln(f) - 0.456 \times 10^{-5})$ cm olarak doğrusal bir şekilde değiştiği tespit edilmiştir.

Öte yandan, N_D değeri, yüzey durumlarının etkisinin azalmasına bağlı olarak frekans arttıka üstel olarak azalmaktadır. R_s değeri Nicollian-Brews yöntemiyle hesaplanmış ve frekans arttıka neredeyse üstel olarak azaldığı görülmüştür. R_s 'nin C-V ve $G/\omega - V$ eğrileri üzerindeki etkisini görmek için, 1 MHz'de R_s dikkate alınarak bu eğriler düzeltilmiştir. Düzeltme sonrası, C'nin değerinin boşaltma ve birikim bölgelerinde arttığı, G/ω 'nin ise tükenim bölgesinde (yaklaşık -1 V'da) belirgin bir pik verdiği gözlemlenmiştir.

Azınlık taşıyıcılarının gerilimle değişen profili ve yaşam/gevşeme süreleri hem tersinim hem de boşaltma bölgelerinde paralel iletkenlik yöntemi ile elde edilmiştir ve bu değerlerin artan gerilimle birlikte arttığı görülmüştür. Ancak, boşaltma bölgesindeki N_{ss} 'nin ortalama değeri, tersinim bölgesine göre yaklaşık bir büyüklük sırasıyla daha yüksektir. Bu durum, N_{ss} 'nin genellikle zayıf tersinim bölgesine kıyasla tükenim bölgesinde konumlandığını göstermektedir.



KAYNAKLAR

1. Altındal, Ş., Sevgili, Ö., Azizian-Kalandaragh, Y. (2019). A comparison of electrical parameters of Au/n-Si and Au/(CoSO₄-PVP)/n-Si structures (SBDs) to determine the effect of (CoSO₄-PVP) organic interlayer at room temperature *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 9273–9280.
2. Sze, S. M., Li, Y., Ng, K. K. (2021). *Physics of semiconductor devices*. John Wiley & sons.
3. Sharma, B. L. (2013). *Metal-semiconductor Schottky barrier junctions and their applications*. Springer Science & Business Media.
4. Hudait, M. K., Venkateswarlu, P., Krupanidhi, S. B. (2001). Electrical transport characteristics of Au/n-GaAs Schottky diodes on n-Ge at low temperatures. *Solid-State Electronics*, 45(1), 133-141.
5. 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(10), 1589.
6. Reddy, V. R., Manjunath, V., Janardhanam, V., Kil, Y. H., Choi, C. J. (2014). Electrical properties and current transport mechanisms of the Au/n-GaN Schottky structure with solution-processed high-k BaTiO₃ interlayer. *Journal of Electronic. Materials*, 43(9), 3499-3507.
7. Al-Ahmadi, N. A. (2020). Metal oxide semiconductor-based Schottky diodes: a review of recent advances. *Materials Research Express*, 7(3), 032001.
8. Tung, R. T. (2014). The physics and chemistry of the Schottky barrier height. *Applied Physics Reviews*, 1(1), 86-93.
9. Yerişkin, S. (2019). The investigation of effects of (Fe₂O₄-PVP) organic-layer, surface states, and series resistance on the electrical characteristics and the sources of them. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 17032-17039.
10. Akın, B., Ulusoy, M., Yerişkin, S. A. (2024). Investigation of the interface state characteristics of the Al/Al₂O₃/Ge/p-Si heterostructure over a wide frequency range by capacitance and conductance measurements. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 170, 107951.
11. Siva Pratap Reddy, M., Sreenu K., Reddy V. R., Park C. (2017). Modified electrical properties and transport mechanism of Ti/p-InP Schottky structure with a polyvinylpyrrolidone (PVP) polymer interlayer. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28, 4847-4855.
12. Güçlü, Ç. Ş., Özdemir, A. F., Altındal, Ş. (2016). Double exponential I–V characteristics and double Gaussian distribution of barrier heights in (Au/Ti)/Al₂O₃/n-GaAs (MIS)-type Schottky barrier diodes in wide temperature range. *Applied Physics A*, 122, 1-9.

13. Turut, A., Karabulut, A., Efeoğlu, H. (2021). Effect of the Al₂O₃ interfacial layer thickness on the measurement temperature-induced I–V characteristics in Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs structures. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(17), 22680-22688.
14. Molina-Reyes, J., Uribe-Vargas, H., Torres-Torres, R., Mani-Gonzalez, P. G., Herrera-Gomez, A. (2017). Accurate modeling of gate tunneling currents in Metal-Insulator-Semiconductor capacitors based on ultra-thin atomic-layer deposited Al₂O₃ and post-metallization annealing. *Thin Solid Films*, 638, 48-56.
15. Deniz, A. R., Caldıran, Z., Taşyürek, L. B. (2022). Electrical characteristics of Al₂O₃/p-Si heterojunction diode and effects of radiation on the electrical properties of this diode. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(36), 26954-26965.
16. Efil, E., Kaymak, N., Seven, E., Orhan, E. O., Bayram O., Ocak S. B., Tataroglu A. (2020). Current-voltage analyses of Graphene-based structure onto Al₂O₃/p-Si using various methods, *Vacuum*. 181, 109654.
17. Nicollian, E. H., Brews, J. R. (2002). *MOS (metal oxide semiconductor) physics and technology*. John Wiley & Sons.
18. Chandrakala, H. N., Ramaraj, B., Shivakumaraiah, Madhu, G. M., & Siddaramaiah, F. (2012). The influence of zinc oxide–cerium oxide nanoparticles on the structural characteristics and electrical properties of polyvinyl alcohol films. *Journal of Materials Science*, 47, 8076-8084.
19. Nezhadesm-Kohardafchahi, S., Farjami-Shayesteh, S., Badali, Y., Altındal, Ş., Jamshidi-Ghozlu, M.A., Azizian-Kalandaragh, Y. (2018). Formation of ZnO nanopowders by the simple ultrasound-assisted method: Exploring the dielectric and electric properties of the Au/(ZnO-PVA)/n-Si structure, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 86, 173-180.
20. Güneşer, M. T., Elamen, H., Badali, Y., Altındal, Ş. (2023). Frequency dependent electrical and dielectric properties of the Au/(RuO₂:PVC)/n-Si (MPS) structures *Physica B: Condensed Matter*, 657, 414791.
21. Tunç, T., Uslu, H., Altındal, Ş. (2011). Preparation and dielectric properties of polyvinyl alcohol (Co, Zn Acetate) Fiber/n-Si and polyvinyl alcohol (Ni, Zn Acetate)/n-Si Schottky diodes. *Fibers and Polymers*, 12, 886-892.
22. Sharma, M., Tripathi, S. K. (2016). Frequency and voltage dependence of admittance characteristics of Al/Al₂O₃/PVA: n-ZnSe Schottky barrier diodes. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 41, 155-161.
23. Reddy, C. V. S., Han, X., Zhu, Q. Y., Mai, L. Q., Chen, W. (2006). Dielectric spectroscopy studies on (PVP+ PVA) polyblend film. *Microelectronic Engineering*, 83(2), 281-285.

24. Basha, S. S., Sundari, G. S., Kumar, K. V., Rao, M. C. (2017). Structural and dielectric properties of PVP based composite polymer electrolyte thin films. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 27, 455-466.
25. Barkhordari, A., Mashayekhi, H., Amiri, P., Altındal, Ş., Azizian-Kalandaragh, Y. (2023). On the investigation of frequency-dependent dielectric features in Schottky barrier diodes (SBDs) with polymer interfacial layer doped by graphene and ZnTiO₃ nanostructures. *Applied Physics A*, 129(4), 249.
26. Berkün, Ö., Ulusoy, M., Altındal, Ş., Avar, B. (2023). On frequency and voltage dependent physical characteristics and interface states characterization of the metal semiconductor (MS) structures with (Ti: DLC) interlayer, *Physica B: Condensed Matter*. 666, 415099.
27. Güçlü, Ç. Ş., Altındal, Ş, Tanrikulu, E. 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.
28. Çetinkaya, H. G., Bengi, S, Sevgili, O, Altındal, Ş. (2024). The capacitance/conductance and surface state intensity characteristics of the Al/(CMAT)/p-Si structures. *Physica Scripta* 99(2), 025955.
29. Erbilen, T. E., Taşçıoğlu, İ. (2023). Variation of the Surface States and Series Resistance Depending on Voltage, and Their Effects on the Electrical Features of a Schottky Structure with CdZnO Interface. *Journal of Electronic Materials* 52, 2432-2440.
30. Altındal Yerişkin, S., Şafak Asar, Y. (2021). Influence of graphene doping rate in PVA organic thin film on the performance of Al/p-Si structure. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(18), 22860-22867.
31. Arslan Alsaç, A., Serin, T., Altındal, Ş., Kalandaragh, Y. (2021). Evidences on double Gaussian (DG) distribution of barrier heights in Au/(PVA-Fe₃O₄)/n-Si Schottky barrier diodes (SBDs) from the current-voltage (I-V) measurements in wide temperature, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 23, 339-347.
32. Castagne, R. Vapaille, A. (1971). Description of the SiO₂/Si interface properties by means of very low frequency MOS capacitance measurements. *Surface Science*, 28(1), 157-193.
33. Hill, W. A., Coleman, C. C. (1980). A single-frequency approximation for interface-state density determination. *Solid-State Electronics*, 23(9), 987-993.
34. Nicollian, E. H., Goetzberger, A. (1991). MOS conductance technique for measuring surface state parameters. In *Semiconductor Devices: Pioneering Papers*, 558-561.
35. Manjunath, V., Reddy, V.R., PRS. Reddy, VJanardhanam, CJ Choi. (2017). Electrical and frequency-dependent properties of Au/Sm₂O₃/n-GaN MIS junction with a high-k rare-earth Sm₂O₃ as interlayer. *Current Applied Physics* 17(7), 980-988.

36. Çetinkaya, H. G. (2018). Frequency and voltage dependent profile of dielectric parameters and electric modulus for Al/(HgS-PVA)/p-Si Capacitor via impedance Spectroscopy method. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 13(3), 421-427.
37. Nangia, R., Shukla, N. K., Sharma, A. (2019). Impedance spectroscopy study of electrical properties of polymer blend interlayered Al/PEG-PVA/p-Si (MPS) structure. *Materials Research Express*, 6(9), 096315.
38. Alptekin, S., Altındal, Ş. (2020). Electrical characteristics of Au/PVP/n-Si structures using admittance measurements between 1 and 500 kHz. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31, 13337-13343.





Gazili olmak ayrıcalıktır