

T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

ÇİNKO OKSİT ESASLI DİELEKTRİK MALZEMELERİN ÜRETİLMESİ VE
DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özkan GÖÇGELDİ

OCAK - 2025

**T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**ÇİNKO OKSİT ESASLI DİELEKTRİK MALZEMELERİN ÜRETİLMESİ VE
DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özkan GÖÇGELDİ

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Burhan COŞKUN

Ocak – 2025

“ÇİNKO OKSİT ESASLI DİELEKTRİK MALZEMELERİN ÜRETİLMESİ VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması **Özkan GÖÇGELDİ** tarafından hazırlanmış olup aşağıdaki jüri tarafından **OY BİRLİĞİ** ile Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Burhan COŞKUN
Kırklareli Üniversitesi

.....

Jüri Üyeleri:

Prof. Dr. Serpil AKÖZCAN PEHLİVANOĞLU
Kırklareli Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL
Gazi Üniversitesi

.....

Tez Savunma Tarihi: 08/01/2025

.....
Doç. Dr. Hale KARAYER
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Kırlareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez ve Proje Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum bilgileri, verileri ve dokümanları, değişik sonuç verebilecek şekilde araştırma araç gereçleri kullanmadan, işlem veya kayıt sonuçlarını değiştirmeden akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Özkan GÖÇGELDİ
08/01/2025

ÖZET

ÇİNKO OKSİT ESASLI DİELEKTRİK MALZEMELERİN ÜRETİLMESİ VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Özkan GÖÇGELDİ

Yüksek Lisans Tezi

Kırklareli Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Danışman: Doç. Dr. Burhan COŞKUN

Ocak 2025, 43 sayfa

Bu çalışmada metal (Au) ile yarıiletken (p-Si) arasına hidrotermal metot ile büyütülen (%0,5 Bi-katkılı ZnO) ara yüzey tabakalı (MPS) yapıların hem sığa-voltaj (C-V) hem de iletkenlik-voltaj (G-V) ölçümleri düşük (10 kHz) ve yüksek (1MHz) frekanslarda $\pm 4V$ aralığında 50 mV'luk adımlarla ölçüldü. Ters beslem C^{-2} -V grafinin lineer bölgesinin voltaj eksenini kestiği noktadan (V_0) ve eğim (dC^{-2}/dV) değerlerinden faydalanarak yapının temel elektriksel parametreleri olan difüzyon potansiyeli (V_D), Fermi-enerji seviyesi (E_F), potansiyel engel yüksekliği (Φ_B) ve tükenim tabakasının kalınlığı (W_D) elde edildi. Yüksek-düşük frekans kapasitans (C_{HF} - C_{LF}) metodundan arayüzey durumların (N_{ss}) voltaja bağlı dağılım profili; C ve G değerlerinden de yapının voltaja bağlı rezistans (R_i) profili Nicollian-Brews metodundan elde edildi. Deneysel C-V ve G-V verileri kullanılarak; kompleks dielektrik sabitinin ve elektrik modülüsün voltaja bağlı dağılım profilleri elde edildi. Buna ilave olarak kayıp tanjant ($\tan\delta$) değerleri de voltaja bağlı elde edildi. Polarizasyon etkisini görmek için ϵ'' - ϵ' (Nyquist) grafikleri çizildi. Elde edilen tüm bu deneysel sonuçların hem frekansa hem de voltaja güçlü bir şekilde bağlı olduğu gözlemlendi. Dolayısıyla bu durum klasik metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapılar yerine rahatlıkla kullanılabilceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: (%0.5 Bi:ZnO) arayüzeyi, Frekans ve voltaja bağlılık, Yüksek-düşük frekans kapasitans, Arayüzey durumları ve Seri direnç

ABSTRACT

PRODUCTION OF ZINC-OXIDE BASED DIELECTRIC MATERIALS AND RESEARCH OF THEIR DIELECTRIC PROPERTIES

Özkan GÖÇGELDİ

MSc Thesis

Kirklareli University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Supervisor: Assoc. Prof. Burhan COŞKUN

January 2025, 43 pages

In this study, both capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G-V) measurements of the metal (Au)/semiconductor (p-Si) (MS) structure with (0.5% Bi-doped ZnO) interlayer grown by hydrothermal method were measured at low (10 kHz) and high (1MHz) frequencies with 50 mV steps between $\pm 4V$ voltage range. The fundamental electrical parameters of the structure, namely diffusion potential (V_D), Fermi-energy level (E_F), potential barrier height (Φ_B) and depletion layer width (W_D) were also obtained from the intercept point (V_o) and slope (dC^{-2}/dV) plot. The voltage-dependent distribution profile of the interfacial states (N_{ss}) was obtained from the high-low frequency capacitance ($C_{HF}-C_{LF}$) method, and the voltage-dependent resistance (R_i) profile of the structure was also from C and G values by using the Nicollian-Brews method, respectively. Using experimental C-V and G-V data, the voltage-dependent dispersion profiles of the complex dielectric constant and electric modulus were obtained. Consequently, tangent-loss ($\tan\delta$) value was obtained depending on voltage. To see the polarization effect, $\epsilon''-\epsilon'$ (Nyquist) plots were also obtained. It was observed that all these experimental results strongly depend on both frequency and voltage. The prepared MPS structure can store charge or energy locally and therefore can be easily used instead of conventional metal-oxide-semiconductor (MOS) structures.

Keywords: (0.5 Bi:ZnO) interlayer, · Frequency and voltage dependence, · High-low frequency capacitance, · Surface states and series resistance

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmalarımda bana her türlü desteği veren danışman hocam sayın Doç. Dr. Burhan COŞKUN' a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca deneyim ve tecrübelerini paylaşan ve yardımları için Gazi Üniversitesi Öğretim Üyesi Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL ve Dr. Çiğdem Şükriye GÜÇLÜ hocalarıma, Kırklareli Üniversitesi Öğretim Üyesi Doç. Dr. Mümin Mehmet KOÇ hocama teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca hayatımın her anında desteklerini için sevgili babam İsmail GÖÇGELDİ' ye ve annem Birgül GÖÇGELDİ' ye kardeşim Oğuzkan GÖÇGELDİ' ye zamanından çaldığım çok sevgili arkadaşım Serdar AKPINAR' a ve lisansüstü eğitimdeki sınıf arkadaşım Erdal KARAKUŞ' a sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Özkan GÖÇGELDİ

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1.GİRİŞ	1
2.KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1 Yarıiletkenler	3
2.2 Band Teorisi	4
2.3 Yarıiletkenlerin Sınıflandırılması Ve Özellikleri	5
2.3.1.Katkısız yarıiletkenler	5
2.3.2 Katkılı Yarıiletkenler	6
<i>n-Tipi Yarıiletkenler</i>	6
<i>p-Tipi Yarıiletkenler</i>	7
2.4 Metal-Yarıiletken Kontaklarda Schottky-Mott Teorisi	7
2.5 Metal-Silisyum (Metal–Yarıiletken) Yapılar	8
2.6 Schottky Diyotlarda Kapasitans/Kondüktans-Voltaj Frekans (C/G-V-f) Özellikleri	10
2.7. Paralel Plakalı Kondansatörler	10
2.8. Dielektrik Malzemeler	11
2.9. Dielektrik Malzemelerin Polarizasyon Mekanizmaları	11
2.9.1 Elektronik veya optik polarizasyon	12
2.9.2 Atomik Polarizasyon	12
2.9.3. Yönelme Polarizasyon	12
2.9.4. Arayüzey veya Uzay Yüğü Polarizasyonu	13
2.10.Çinko Oksit (ZnO) Bileşiminin Özellikleri	14
2.11. Bizmut (Bi) Elementinin Özellikleri	15
2.12. Hidrotermal Metot	16

2.13. ZnO Filmlerinin Elde Edilmesi.....	17
2.14. ZnO Filmlerinin Optik Özellikleri.....	18
2.15. ZnO Filmlerinin Elektriksel Özellikleri.....	19
3.DENEYSEL DETAYLAR	21
4.DENEYSEL SONUÇLAR VE BULGULAR.....	23
5.SONUÇ VE ÖNERİLER	35
KAYNAKLAR.....	37
ÖZGEÇMİŞ.....	43



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge 4.1.Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin 1 MHz' ters beslem C^{-2} -V grafiğinden elde edilen bazı temel Schottky diyot parametreleri.....27



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 3.1 (a,b) Hazırlanan Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au MIS tipi Schottky diyotun şematik görsel ve Kapasitans-voltaj (C-V) ve kondüktans/iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçüm sistemi... 22	22
Şekil 3.2 Hazırlanan Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au MIS tipi Scott diyotun enerji-bant diyagramı ve elektronik devresi.....22	22
Şekil 4.1.a Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin 10kHz ve 1MHz' deki C-V eğrileri24	24
Şekil 4.1.b Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin 10kHz ve 1MHz' deki G/ω -V eğrileri.....24	24
Şekil 4. 2 Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin 10 kHz' de R_s -V grafiği.....25	25
Şekil 4.3 Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin 1 MHz' de ters beslem C^{-2} -V grafiği.....26	26
Şekil 4.4 Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD'nin yüksek-düşük frekans kapasitans yönteminden hesaplanan N_{ss} -V eğrisi.....28	28
Şekil 4.5 Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' de sığanın zamana bağlı değişimi29	29
Şekil 4.6 Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin 10kHz ve 1MHz' deki ϵ' -V eğrileri.....30	30
Şekil 4.7 Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin 10kHz ve 1MHz' deki ϵ'' -V eğrileri.....30	30
Şekil 4.8 Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin 10kHz ve 1MHz' deki $\tan\delta$ -V eğrileri.....31	31
Şekil 4.9.a Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin 10kHz deki Cole/Cole (ϵ' ve ϵ'') eğrileri.....32	32
Şekil 4.9.b Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin 1MHz' deki Cole/Cole (ϵ' ve ϵ'') eğrileri.....32	32
Şekil 4.10 Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin elektrik modülüsünün gerçek (M') kısmı.....34	34
Şekil 4.11 Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin elektrik modülüsünün sanal (M'') kısmı.....34	34

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
C_o (F)	Boş kapasitörün sığası
C_i (F)	Arayüzey tabakanın sığası
C_m	Ölçülen sığa değeri
E	Elektrik alan
E_c (eV)	Yarıiletkenin iletkenlik bandı kenarı
E_g (eV)	Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
E_F (eV)	Fermi enerjisi
E_v (eV)	Yarıiletkenin valans bandı kenarı
F	Sığa birimi-Farad
S	İletkenlik birimi
G_m (S)	Ölçülen iletkenlik değeri
ω ($=2\pi f$)	Açısal frekans
Hz	Frekans birimi-Hertz
I (A)	Akım
I_o (A)	Ters beslem doyma akımı
J (A.cm ⁻²)	Ters beslem doyma akım yoğunluğu
P (Watt/cm ²)	Aydınlatma şiddeti
R (Watt/Amper)	Fototepki
n	İdealite faktörü
R_s (Ω)	Diyotun seri direnci
R_{sh} (Ω)	Diyotun kısa devre direnci
V (V)	Devreye uygulanan gerilim
V_D (V)	Diyot üzerine düşen gerilim
V_F (V)	Diyota uygulanan doğru beslem gerilimi
V_R (V)	Diyota uygulanan ters beslem gerilimi

$\epsilon_0(\text{F/m})$	Boşluğun elektrik geçirgenliği
ϵ^*	Kompleks dielektrik sabiti
σ	Elektrik iletkenlik
$\sigma_{ac}(\text{S/cm})$	AC elektriksel iletkenlik
$\Phi_B(\text{eV})$	Schottky engel yüksekliği
$\Phi_{B_0}(\text{eV})$	Sıfır beslem Schottky engel yüksekliği
$\Phi_e(\text{eV})$	Etkin engel yüksekliği
$\Phi_m(\text{eV})$	Metalin iş fonksiyonu
$\Phi_s(\text{eV})$	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
$\chi_s(\text{eV})$	Elektron yakınlığı
$^{\circ}\text{C}$	Sıcaklık birimi-Celcius derece
K	Sıcaklık birimi (Kelvin olarak)
di	Arayüzey tabakanın kalınlığı
W_d	Tükenim tabakası genişliği

Kısaltmalar	Açıklamalar
AC	Alternatif akım
DC	Doğru akım
TE	Termiyonik emisyon teorisi
CMs	İletim mekanizmaları
CTMs	Akım iletim mekanizmaları
I-V	Akım -Voltaj
J-V	Akım yoğunluğu -Voltaj
C-V	Sığa -Voltaj
R-V	Foto tepki -Voltaj
SD	Schottky diyot
S-V	Sensitivite-Voltaj
MS	Metal-Yarıiletken
MIS	Metal-Yalıtkan-Yarıiletken
MOS	Metal-Oksit-Yarıiletken

1.GİRİŞ

Teknolojik ilerlemeler, yaşamın her alanında yeni ve işlevsel malzemelere olan ihtiyacı arttırmıştır. Bu bağlamda, yarıiletken ince filmler, üstün optik ve elektriksel özellikleri sayesinde modern malzeme biliminin en önemli çalışma alanlarından biri haline gelmiştir. İnce filmler, bir alt tabaka üzerine atom veya molekül seviyesinde biriktirilen, genellikle 1 µm'den daha ince olan tabakalardır. Yüksek yüzey alanına sahip olmaları ve fiziksel ile kimyasal özelliklerinin özelleştirilebilir olması, bu malzemeleri çeşitli teknolojik uygulamalarda vazgeçilmez kılmaktadır.

İlk ince film uygulamaları 1838 yılında elektroliz yöntemiyle başlamış, 1940'lardan sonra ise CVD (kimyasal buhar biriktirme), spray pyrolysis (sprey piroliz) ve sol-jel gibi gelişmiş üretim teknikleri yaygınlaşmıştır. Bu yöntemler sayesinde ince filmler, güneş pilleri, gaz sensörleri, ekran teknolojileri, optoelektronik cihazlar ve enerji depolama sistemleri gibi geniş bir kullanım alanına ulaşmıştır.

Yarıiletken malzemeler arasında ZnO (Çinko oksit), kimyasal kararlılığı, enerji bant aralığı geniş (3,37 eV) ve eksiton bağ enerjisi yüksek (60 meV) olarak öne çıkmaktadır. ZnO, n-tipi iletkenlik göstermesi ve şeffaf yapısıyla, şeffaf elektrotlar, güneş pilleri ve lüminesans malzemelerde geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir [39]. Ayrıca, ZnO'nun doğada bol miktarda bulunması, düşük maliyetli üretim süreçleriyle birleşerek bu malzemeyi sürdürülebilir teknolojilerde ideal bir aday yapmaktadır.

Son yıllarda, geçişli metallere katkılandırılmış ZnO tabanlı seyrek manyetik yarı iletken (DMS) malzemeler geliştirmek için yoğun çalışmalar yürütülmektedir [40]. Bu çalışmalar kapsamında, Mn katkılı ZnO malzemeler, elektriksel ve manyetik özelliklerinin sunduğu potansiyel uygulamalar nedeniyle büyük ilgi görmüştür [41]. Mn katkılı ZnO nanopartiküllerinin ferromanyetik özellik sergileyebildiği öne sürülmüştür [42].

Mn katkılı ZnO'nun yapısal, optik ve manyetik özelliklerini optimize etmek amacıyla, Fe, Co, Cu ve Al gibi çeşitli elementler Mn ile birlikte ZnO'ya katkılandırılmıştır [43,44]. Fe ve Mn ile ortak katkılandırılan ZnO ince filmlerde, oda sıcaklığında ferromanyetizm

(RTF) gözlemlenmiş ve bu durumun malzemenin yapı ve mikro yapılarındaki değişimlerle ilişkilendirildiği belirtilmiştir [45].

RTF'nin taşıyıcılar aracılığıyla meydana geldiği, Ni ve Al ortak katkılı ZnO nanokristalitlerinde ileri sürülmüş, Co ve Cu ortak katkılı ZnO nanopartiküllerinde ise dielektrik ve manyetik özelliklerin düzenlenmesi detaylı olarak incelenmiştir [46].

Tüm bu çalışmalar, ZnO tabanlı DMS malzemelerin özelliklerini optimize ederek, manyetik ve elektronik cihazlar gibi ileri teknolojik uygulamalar için önemli fırsatlar sunduğunu göstermektedir.

Bu tez çalışması, %0.5 Bi:ZnO tabanlı ince filmlerin üretimi, elektriksel ve yapısal özelliklerinin incelenmesi farklı katkı elementlerinin malzeme üzerindeki etkilerinin araştırılmasını hedeflemektedir. Çalışmada, ZnO ince filmleri, hidrotermal yöntemi ile hazırlanacak olup katkı oranlarının, elektriksel, manyetik ve optik özellikler üzerindeki etkileri sistematik olarak değerlendirilecektir. Elde edilen bulgular, ZnO'nun modern teknolojilerdeki potansiyel kullanımını genişletmek ve performansını optimize etmek için önemli bilgiler sunacaktır.

2.KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Yarıiletkenler

Yarıiletkenler, metaller, ve yalıtkanlar olarak katı malzemeler elektriksel iletkenlik özelliklerine göre üç ana sınıfa ayrılmaktadır. Metallerin özdirenç değerleri 10^{-6} - 10^{-4} $\Omega \cdot m$ arasında değişirken, yarıiletkenlerin özdirençleri 10^{-4} - 10^{10} $\Omega \cdot m$ aralığındadır. Yalıtkanlar ise 10^{10} $\Omega \cdot m$ veya daha yüksek özdirenç değerlerine sahiptir [19,20]. Yarıiletkenlerin bant enerji yapıları, yalıtkanlarla benzerlik göstermektedir; ancak iki malzeme arasındaki temel fark, yarıiletkenlerin valans bandı tamamen dolu, iletkenlik bandı ise boş olmasına rağmen bu bantlar arasındaki yasak enerji aralığının daha dar olmasıdır [1]. Yarıiletkenlerin elektriksel iletkenliği, sıcaklıkla doğru orantılı olarak artar; ancak mutlak sıfır ($T = 0$ K) sıcaklıkta, bu malzemeler elektriksel iletkenlik göstermez ve yalıtkan gibi davranır [21,22].

Bir katının sadece elektriksel özdirencinin belirli bir aralıkta olması yarıiletken olabilmesi için yeterli değildir. Yasak enerji aralıkları yarıiletkenler için önemli bir parametre olarak dikkate alınmalıdır. Yarıiletkenler, ısı uyarılmayla ve erime halindeki sıcaklıklarının altındada elektriksel iletkenlik gösterebilir. Öyleki bağlamda, etkili yarıiletkenlerin yasak enerji aralıklarının $E_g \approx 2$ eV veya daha küçük olması gereklidir [2].

Elementel yarıiletken olan IV. grup elementleri Ge (germanyum) ve Si (silisyum) gibi materyaller olup, bu malzemeler yarıiletken teknolojisinin temelini oluşturur. Bileşik yarıiletkenler ise III-V ve II-VI gruplarındaki elementlerin birleşimiyle ortaya çıkar. III-V grup bileşenleri, GaAs, InSb, GaP, InAs gibi materyallerden oluşur ve genellikle kübik yapıda kristallenir, bağ yapıları kovalenttir [24,25]. II-VI grup bileşenleri ise ZnO, CdS, CdSe gibi bileşiklerden oluşur ve bu bileşikler kübik ya da hegzagonal yapıda kristallenebilir, bağ yapıları kovalent veya iyonik olabilir [3].

Elektriksel iletkenlik hem geçici hem de kalıcı şekilde geniş bir aralıkta yarıiletkenler için kontrol edilebilmektedir. Yarıiletken malzemelerin elektriksel özellikleri, dış katkı maddeleri ile değiştirilerek modifiye edilebilir [4]. Katkı malzemesinin çeşidine göre, yarıiletken de katkılanmış bölge daha fazla elektron ya da boşluk içerebilmektedir.

Busayede, yeterli miktarda katkı oranı ile yarıiletkenler, metaller kadar yüksek iletkenlik gösterebilir. Elektronlar ile iletim sağlayan n-tipi yarıiletkenler ve boşluklar ile iletim sağlayan p-tipi yarıiletkenler arasında, elektriksel iletkenlik açısından önemli farklar bulunmaktadır [19,21,26,29].

Yarıiletkenler, teknolojinin çeşitli alanlarında kritik öneme sahip materyallerdir. Otomotiv sektöründen telekomünikasyon ve askeri uygulamalara kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadırlar. Özellikle, yarıiletken diyotlar, cep telefonlarının ekranları, otomobillerin aydınlatma sistemleri, sensörlü algılama teknolojileri, tıbbi cihazlar ve askeri hedefleme sistemlerinde önemli işlevler üstlenmektedir. Bu malzemelerin yenilenebilir enerji alanındaki potansiyeli de göz önünde bulundurulduğunda, yarıiletken teknolojilerinin gelecekteki rolü daha da belirginleşmektedir.

2.2. Bant Teorisi

Bant teorisi, katıların elektriksel iletkenlik özelliklerini açıklamada önemli bir rol oynamaktadır. Serbest elektron modelinin yetersizliklerini giderebilmek amacıyla geliştirilmiş bu teori, özellikle metaller, yarıiletkenler ve yalıtkanlar arasındaki farkları netleştirmektedir. Serbest elektron modelinin, metallerde iletimi elektronlar ile sağlayan atomların değerlik elektronları arasındaki ilişkileri açıklamakta eksik kaldığı ve Hall katsayısının pozitif değerler aldığı bazı özel durumları anlamada yetersiz olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, katıların enerji yapısını daha detaylı bir şekilde açıklamak için bant teorisine başvurulmuştur [5-7].

Bant teorisine göre, katı malzemelerde enerji düzeyleri birbirine yakın olan bantlarda elektronlar bulunur. Bu bantlar, yarıiletkenlerde kısmi olarak dolu olan ve geniş bir yasak enerji aralığına sahip olan enerji bölgeleridir. Bu bant yapıları, malzemenin elektriksel iletkenlik özelliklerini belirler. Yarıiletkenler, bant yapılarındaki dar enerji aralığı, dolu valans/değerlik bandı ve boş iletkenlik bandı ile tanımlanabilirken, çok geniş yasak enerji aralığına sahip malzemeler ise yalıtkan olarak sınıflandırılır [5,6].

Kuantum mekaniği, bu enerji düzeylerinin nasıl oluştuğunu açıklar. Atomlar arasındaki mesafeler çok küçük olduğunda (yaklaşık 10^{-8} cm), atomlar birbirlerinin elektriksel etkileriyle etkileşir ve bu da elektronların enerji seviyelerinin ayrılmasına yol açar. Değerlik bandı, elektronların bulunduğu alt bandı ifade ederken, iletkenlik bandı, bu elektronların hareket edebileceği üst bandı temsil eder. Bu iki bant arasındaki enerji farkı (E_g) yarıiletkenin yasak enerji aralığını oluşturur. Bu yasak bölge, malzemenin kimyasal

yapısı ve atomlarının özelliklerine bağlı olarak değişir ve farklı yarıiletkenlerde bu aralık 0.1 eV ile 5 eV arasında değişebilir [8].

Sıcaklık arttıkça, kristaldeki atomların titreşim genlikleri ve atomlar arasındaki mesafe değişir, bu da yasak enerji aralığının genişliğini etkiler. Yarıiletkenlerde, değerlik bandındaki elektronlar, dış etkenler (örneğin gerilim, ısı, ışık) tarafından uyarılarak iletkenlik bandına geçiş yapar. Elektronun bu geçişi sırasında, değerlik bandında bir boşluk (holler) oluşur. Dışarıdan bir elektrik veya manyetik alan uygulandığında, bu boşluklar pozitif yüklü misali davranır. Elektrik akımı, iletkenlik bandındaki serbest elektronların hareketleri ile değerlik bandındaki boşlukların hareketleri oldukça gerçekleşir. Yarıiletkenlerin elektriksel iletkenliği, sıcaklıkla artar çünkü sıcaklık arttıkça daha fazla elektron yasak enerji aralığını geçerek iletkenlik bandına geçer [9,10].

Bu bağlamda, yarıiletkenlerin yasak enerji aralığı sıcaklıkla değişir, çünkü atomlar arasındaki titreşim genliği ve mesafeler sıcaklıkla birlikte değişir ve bunun sonucunda yarıiletkenin elektriksel özellikleri de sıcaklıkla birlikte farklılıklar gösterir [11,12].

2.3. Yarıiletkenlerin Sınıflandırılması ve Özellikleri

2.3.1. Katkısız yarıiletkenler

Katkısız yarıiletkenlerde iletkenlik bandında bulunan serbest elektron yoğunluğu, valans bandında bulunan deşik yoğunluğuyla eş değerdir. Bu durum, bir elektronun termal uyarılma sonucu geride bir deşik bırakarak iletkenlik bandına geçmesiyle gerçekleşir. Termal enerji ya da Elektrik alanla uyarılan elektronlar, yasak enerji boşluğunu aşarak iletkenlik bandına ulaşırlar böylelikle bu durum elektriksel iletimin sağlanmasına olanak tanır [7].

Bu tür yarıiletkenlerde yasak bant genişliği (E_g), elektron-deşik çiftlerinin aktivasyon enerjisini tanımlar ve malzemenin temel elektriksel özelliklerini anlamak açısından hayati öneme sahiptir [13]. Elektron ve deşik taşıyıcılarının oluşumu, kimyasal bağların kopması ve eşit miktarda elektron ile deşiklerin meydana gelmesi ile oluşurlar. Katkısız yarıiletkenlerde Fermi değeri, enerji bant diyagramında, elektronların iletkenlik yoğunluğu ile bağ enerjisi bandındaki yoğunluğunun eşit olduğu konumda yer alır [6].

Birçok yarıiletkende, sıcaklık yükseldikçe yasak enerji aralığı (E_g) genellikle doğrusal bir şekilde azalır. Bu değişim, kristal yapıdaki atomların titreşim genlikleri ile atomlar arası mesafelerdeki sıcaklığa bağlı değişimlerden kaynaklanır [1,4].

2.3.2. Katkılı Yarıiletkenler

Katkılı yarıiletkenlerde, yük taşıma işlemi, kullanılan katkı maddesinin türüne göre iletim bandındaki serbest elektronlar veya değerlik bandındaki boşluklar aracılığıyla gerçekleşir. Katkısız bir yarıiletken detaylı gözden geçirildiğinde, deşik ve elektron yoğunluklarının birbirlerine denk olduğu gözlenir. Ancak, yarıiletken uyumlu katkı elementleriyle katkılanırsa, yük taşıma; deşikler veya elektronlar tarafından sağlanır. Yarıiletkenler, katkı maddesine göre ikiye ayrılır: n-tipi ve p-tipi. Eğer katkısız yarıiletkenler içerisinde V. grup elementleri olursa bu durum n-tipinde yarıiletken oluşturur; III. grup elementleri içerisinde olursa bu durumda p-tipinde yarıiletken meydana gelir [14].

Silisyum (Si), özellikleri iyi bilinen doğada bol bulunabilen bir elementtir. Silisyum, katkı maddesi eklenerek n-tipi veya p-tipi yarıiletkenler üretilebilen bir malzemedir. Bugün yarıiletkenler teknolojisinin temel unsuru haline gelen Si, işlemciler, flaş bellekler ve güneş hücreleri gibi birçok elektronik cihazda temel bileşen olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, n-tipi çinko oksit ile hetero eklem oluşturmak amacıyla genellikle p-tipi Si tercih edilmektedir [15].

n-Tipi Yarıiletkenler

Silisyum (Si) ve germanyum (Ge), dört değerlik elektronuna sahip periyodik tabloda IV-A grubunda yer alan yarıiletkenlerdir ve bu elektronların arasında kovalent bağ yaparak kristal yapı içinde birbirleriyle etkileşirler [5]. Ancak, periyodik tablonun V-A grubundan (örneğin, arsenik (As), azot (N), fosfor (P), bizmut (Bi) ve antimon (Sb)) bir atomun bu yapıya eklenmesi durumunda, atomun söz konusu dört değeri kovalent bağ yapar, beşinci elektron bu durumda zayıf bir bağ ile safsızlık atomuna bağlı kalır [6]. Bağ kuramayan elektronlar, iletkenlik bandının hemen altındaki enerji seviyesinde bir yoğunluk oluşturur. Bu tip safsızlıklar 'verici (donör)' olarak adlandırılır ve neden oldukları enerji seviyeleri 'verici seviyesi' şeklinde tanımlanır [7].

Verici seviyesinde bulunan elektronlar, iletkenlik bandına düşük enerji ile geçiş yapabilir. Bu geçiş, katkısız yarıiletkenlerdeki değerlik bandında boşluk oluşumunu engeller.

Bunun yerine, iletkenlik bandına geçen elektron sayısının daha fazla olması, çoğunluk taşıyıcılarının elektronlar olmasını sağlar. Böyle bir yapı, n-tipi yarıiletken olarak adlandırılır [13]. n-tipi yarıiletkenlerde, Fermi seviyesi verici seviyesine yakın bir konumda yer alır [15].

p-Tipi Yarıiletkenler

p-tipi yarıiletkenler, Ge (germanyum) veya Si (silisyum) gibi yarıiletken malzemelere, üç değerlik elektronu bulunan katkı atomlarının eklenmesiyle oluşturulur. En yaygın kullanılan katkı elementleri arasında bor (B), galyum (Ga) ve indiyum (In) yer alır. Bu katkı atomlarının üç değerlik elektronu bulunduğundan, kovalent bağları tamamlamak için yeterli elektron sayısı bulunmaz. Bunun sonucunda, bağ yapamayan boşluklar oluşur ve bu boşluklar pozitif yük taşır. Bu boşlukların serbest elektron olma yönelimi vardır. Katkı maddeleri, 'alıcı (akseptör)' olarak adlandırılır ve bu atomlar, değerlik bandındaki elektronları çekerek enerji seviyesinde farklılık yaratır [5].

Katkılama işlemi tamamlandığında, akseptör atomunun enerji seviyesi, değerlik bandının hemen üzerinde yer alır. Bu seviyenin bulunduğu enerji, bir boşluğu yakalamak için gerekli enerji ile eşdeğerdir. Bir elektron, iletkenlik bandından boşluk pozisyonuna geçtiğinde, boşluk değerlik bandının tepe seviyesine hareket eder ve bu durum serbest taşıyıcı oluşumunu sağlar. Bu süreç, oda sıcaklığında değerlik bandında yoğun boşluk oluşumuna neden olarak malzemenin elektriksel iletkenliğini artırır [6].

2.4. Metal-Yarıiletken Kontaklarda Schottky-Mott Teorisi

Metal ve yarıiletken bir araya getirildiğinde, arayüzeyde bir potansiyel bariyeri oluşur. Bu durum, her iki malzemenin birbirinden ayrı ve elektriksel olarak nötr olduğu başlangıç haline kıyasla enerji bant yapısında değişimlere yol açar [5]. n-tipi bir yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s), metalin iş fonksiyonundan (Φ_m) küçükse, yarıiletkendeki elektronlar metale doğru akar ve iki malzemenin Fermi seviyeleri hizalanmaya zorlanır. Elektron akışı, metal ve yarıiletken arayüzeyinde bir yük dağılımı oluşturarak enerji bantlarının bükülmesine neden olur. Bunun sonucunda, yarıiletkende elektronlardan arınmış pozitif yüklerin bulunduğu bir tükenim (deplasyon) bölgesi meydana gelir [6].

Metal ve yarıiletken arasında oluşan potansiyel bariyerinin yüksekliği, ideal durumda $\Phi_{Bn} = \Phi_m - \chi_s$ denklemi ile tanımlanır. Burada χ_s , yarıiletkenin elektron yakınlığı değerini ifade eder [7]. Ancak, gerçek sistemlerde bu ideal durum çoğunlukla sağlanamaz. Bunun

nedeni, metal ve yarıiletken arasındaki ara yüzeyde genellikle 10–20 Å kalınlığında ince bir oksit tabakasının bulunmasıdır. Bu ince tabaka, elektronlar için bir tünelleme mekanizması oluşturarak potansiyel bariyer üzerinde önemli etkiler yaratır [13]. Bu etkiler göz ardı edilse bile, Schottky-Mott teorisinin uygulanabilirliği yüzey dipol katkıları ve yüzey durumlarının varlığı gibi faktörlerden etkilenir [15].

Potansiyel bariyerinin şekli, tükenim bölgesindeki yük yoğunluğuna bağlıdır. Eğer yarıiletkenin tükenim bölgesinde yük dağılımı homojen ise, elektrik alan şiddeti yarıiletkenin derinliklerine doğru doğrusal bir şekilde artar ve ortaya çıkan potansiyel enerji profili parabolik bir yapı sergiler. Bu durum, Schottky tarafından önerilen klasik modelle uyumludur [16]. Alternatif olarak, Mott' un geliştirdiği modele göre yarıiletkenin metal yüzeyine yakın kısmında elektronsuz bir tabaka bulunabilir. Bu durumda elektrik alan şiddeti önce kuadratik bir artış gösterir ve daha sonra sabit bir değere ulaşır. Ancak, Mott' un öngördüğü bu durum pratikte nadiren gözlemlenir [17].

Schottky-Mott teorisi, yarıiletkenindeki yüzey yüklerinin sadece tükenim bölgesinde yoğunlaştığını varsayar ve nötrallik koşulu $Q_m + Q_{sc} = 0$ ile ifade edilir. Burada Q_m , metalin yük yoğunluğunu; Q_{sc} ise tükenim bölgesindeki iyonlaşmış donör/verici yüklerini temsil eder [25]. Yarıiletkenin dielektrik sabiti (ϵ_s) ve donör yoğunluğu (N_d) dikkate alındığında, uzay yük yoğunluğu $Q_{sc} = \epsilon_s(2N_dqV)^{1/2}$ bağıntısıyla ifade edilir [39]. Eğer metal aynı yarıiletkenin farklı doping türleri (n ve p-tipi) ile temas ederse, bariyer yüksekliklerinin toplamı yarıiletkenin bant aralığını (E_g) verir: $\Phi_{Bn} + \Phi_{Bp} = E_g$ [30].

DeneySEL bulgular, metalin iş fonksiyonu ile bariyer yüksekliği arasında doğrusal bir ilişki olduğunu göstermektedir. Ancak bu ilişki, Schottky-Mott teorisinin öngördüğü eğim parametresinden sapmalar içerir. Bu sapmalar, yüzey durumlarının ve arayüzey etkilerinin bariyer özelliklerine olan katkılarına bağlanır [24]. Bu nedenle, teorisinin tam anlamıyla geçerli olabilmesi için ideal temas koşulları sağlanmalıdır.

2.5. Metal-Silisyum (Metal–Yarıiletken) Yapılar

Metal-silisyum yapılar, modern elektronik cihazların temel bileşenlerinden biridir ve bu tür yapıların özellikleri, özellikle metal-silisyum temasının davranışı, cihaz performansını doğrudan etkiler. Metal-silisyum eklemlerinin incelenmesi, yarıiletken cihazların çalışmasını anlamada önemli bir yer tutar [1,2]. Metal ve yarıiletkenlerin elektriksel temasında iki ana tür bağlantı oluşabilir: Schottky bariyer bağlantıları ve ohmik

bağlantılar. Metal ve yarıiletken arasındaki bağlantının tipi, her iki malzemenin iş fonksiyonlarına bağlı olarak belirlenir. Schottky bariyer bağlantısı, metalin iş fonksiyonu, yarıiletkenin elektron afinitesinden daha büyük olduğunda meydana gelir. Bu durumda, metal ve silisyum temasında bir enerji bariyeri oluşur ve bu bariyer, akım taşıyan elektronlar için bir engel teşkil eder [2,4]. Schottky bariyer yüksekliği, temas yüzeyindeki enerji seviyelerinin hizalanması ile belirlenir ve bu hizalanma, Fermi seviyelerinin eşitlenmesi sırasında gerçekleşir [5].

Omik bağlantılar ise metal ve yarıiletken arasındaki engelin düşük olduğu ve akımın serbestçe geçtiği durumlardır. Bu tür bağlantılar genellikle yüksek katkılı yarıiletkenlerle oluşturulur ve temas direncinin düşük olması sağlanır [7]. Omik kontakların verimliliği, yarıiletkenin katkı konsantrasyonuna ve yüzey temizliğine bağlıdır [6, 9]. Metal-silisyum temaslarında, ara yüzeyde oluşabilecek doğal oksit tabakaları ve yüzey pürüzlülüğü gibi faktörler, temas özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilir. Bu tür etkiler, Schottky bariyer yüksekliğinde sapmalara veya kontak direncinde artışlara yol açabilir [5,7]. Tung (2014) tarafından yapılan çalışmalar, Schottky bariyer yüksekliğinin, yüzey durumlarının etkisiyle metalin iş fonksiyonu ile doğrusal olmayan bir ilişkiye sahip olabileceğini göstermiştir [25].

Metal-silisyum kontaklarında ideal durum genellikle ara yüzeydeki oksit tabakası nedeniyle tam olarak elde edilemez. Bu tabakalar, Schottky-Mott teorisinin basit modellerinde öngörülen davranıştan sapmalara neden olur. Gerçek kontaklar, genellikle ara yüzeyde birkaç nanometre kalınlığında yalıtkan bir tabaka içerir ve bu tabaka, elektronların tünelleme ile bu engeli aşmasını sağlar [15]. Ayrıca, metal-silisyum kontaklarının özelliklerini geliştirmek amacıyla, yüzey işlemleri, metal seçimi ve yarıiletkenin katkı oranı gibi çeşitli mühendislik yöntemleri uygulanmaktadır. Yüksek performanslı cihazlarda, bu parametrelerin dikkatle optimize edilmesi gereklidir [3,8,10]. Metal-silisyum yapılar, günümüzde mikroişlemcilerden güç elektroniklerine kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu yapıların elektriksel özellikleri ve ara yüzey davranışları üzerine yapılan araştırmalar, yeni nesil cihazların tasarımında kritik bir rol oynamaktadır [1,4,9].

2.6. Schottky Diyotlarda Kapasitans/Kondüktans-Voltaj Frekans (C/G-V-f) Özellikleri

Arayüzey tabakasının kalınlığı, özellikle önemlidir; çünkü tabaka kalınlığı 300 Å'nin üzerine çıktığında, paralel plakalı kondansatör özelliği gösterir. Uygun kalınlığa sahip ve yüksek dielektrik sabiti olan arayüzey tabakaları, metal-yarıiletken arasında oluşabilecek kısa devre riskini ortadan kaldırır ve istenmeyen arayüzey durumlarını (N_{ss}) engeller. Eğer arayüzey tabakası çok ince olursa, tabaka büyütülürken sayısız delik oluşabilir ve bu da kısa devrelere sebep olabilir. Bu nedenle, arayüzey tabakasının kalınlığı, MIS/MOS/MPS yapıların performansını olumsuz etkileyebilecek seri direnç kaynaklarının etkilerini minimize etmek açısından önemlidir. Seri direnç, kontak telleri, arka omik kontak, bu kontak ile doğrultucu kontak arasındaki organik kirlilikler ve arayüzey durumlarından kaynaklanabilir. Seri direnç, C-V ve G/ ω -V grafiklerinde yığılım bölgesinde etkili olur. Düşük voltaj ve düşük frekans değerlerinde etkisi ihmal edilebilir.

İdeal bir Schottky diyotuna yakın bir MIS/MOS/MPS yapı oluşturabilmek için, arayüzey tabakasının kalınlığının düşük olması ve dielektrik sabitinin (ϵ') yüksek olması gerekmektedir. MS yapılarında, arayüzey tabakası ve seri direnç aynı anda mevcutsa, uygulanan voltaj (V_G), arayüzey tabakası, MS yapının seri direnci ve diyot $V_G = V_D + V_{RS} + V_i$ şeklinde bölüşülür. Bu nedenle, MIS/MOS/MPS yapıların akım iletim mekanizmaları, MS yapılarına göre farklılık gösterir.

2.7. Paralel Plakalı Kondansatörler

Paralel plakalı kondansatörler, elektriksel yük depolama ve enerji biriktirme işlevi gören temel devre elemanlarından biridir. Bu kondansatörlerin yapısı, birbirine paralel olarak d mesafeye yerleştirilmiş iki iletken plaka arasında bir elektriksel alan oluşturulmasına dayanır. Kondansatörün çalışma prensibi, plakalara uygulanan gerilim sonucunda plakalar arasında karşıt yüklerin birikmesiyle elektriksel alanın oluşması esasına dayanır. Bir plaka pozitif yük (+Q) taşırken, diğer plaka negatif yük (-Q) taşır. Bu yük birikmesiyle, plakalar arasında bir elektriksel alan oluşur [2,6,7].

2.8. Dielektrik Malzemeler

Elektrik iletkenliği olmayan ve elektrik yüklerini depolayabilme kapasitesine sahip olan malzemelere dielektrik malzemeler denir. Bu malzemelerin elektrik alanı içerisindeki davranışları, fizik, kimya, elektrik-elektronik ve malzeme bilimi gibi çeşitli disiplinlerde çalışan araştırmacılar için önemli bir ilgi alanı oluşturmaktadır. Yüksek voltajlı elektrik kablolarında gözlenen dielektrik özellikler, metal-oksid-yarıiletken (MOS) yapılarıdaki yalıtım bariyerleri ve entegre devrelerdeki ara tabaka izolasyonu gibi alanlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır.

Organik polimerler, yüksek sıcaklıklarda stabil malzemeler olarak kabul edilmekte ve radyasyon, kimyasal etkiler, yüksek elektriksel ve mekanik stres gibi zorlu koşullara karşı dayanıklılık göstermektedir. Bu özellikler, onları nükleer santrallerde veya uzay/boşluk gibi zorlu ortamlarda kullanım için ideal hale getirmektedir [2, 6]. Polimer malzemeler elektrik yüklerini depolama kapasitesine sahiptir. Bu özellik, kullanım amacına bağlı olarak bazı durumlarda istenmeyen bir durum olarak değerlendirilirken, fotokopi makineleri ve telefonlar gibi uygulamalarda ise oldukça faydalı bir özellik olarak öne çıkmaktadır [7].

Dielektrik sabitinin artması, yük depolama kapasitesini artırır ve ultra ya da süper kapasitörlerin üretimine olanak tanır [6,7].

2.9. Dielektrik Malzemelerin Polarizasyon Mekanizmaları

Dielektrik malzemelerin başlıca elektriksel özelliklerinden biri elektriksel geçirgenliktir. Elektriksel geçirgenlik, genellikle dielektrik sabiti (ϵ) ile tanımlanır. Çoğu malzeme için, belirli bir kritik değerin altındaki elektrik alanlar söz konusu olduğunda dielektrik sabiti, elektrik alan kuvvetinden etkilenmez; ancak, malzeme içindeki taşıyıcıların varlığı bu durumun değişmesine yol açabilir. Dielektrik sabiti, elektrik alanın frekansı veya değişim oranına bağlı olarak önemli ölçüde farklılık gösterebilir [6]. Bunun yanı sıra, sıcaklık, basınç gibi fiziksel koşullar ile kimyasal yapı ve malzeme kusurları gibi faktörler de dielektrik sabitini etkileyebilir [2].

Bir dielektrik malzeme, elektriksel polarizasyon mekanizmalarından birine ya da birden fazlasına sahip atomlar veya moleküllerden meydana gelir. Temel polarizasyon türleri arasında elektronik (optik) polarizasyon, atomik (iyonik) polarizasyon, yönelim polarizasyonu ve arayüzey (uzay yükü) polarizasyonu yer alır [2].

2.9.1 Elektronik veya optik polarizasyon

Elektrik alan, atomların ya da moleküllerin elektron bulutlarının simetrik dağılımını bozabilir veya yeniden düzenleyebilir. Bu süreç, dış elektron bulutlarının pozitif yüklü atom çekirdeğine göre ters yöne kaymasıyla meydana gelir. Elektronik polarizasyon, atom veya moleküllerdeki elektronların hareketiyle oluşur [2]. Bu polarizasyon mekanizması genellikle düşük frekanslı alanlarda gözlemlenir. Elektronik polarizasyon, dış elektrik alanının etkisi altında genellikle 10^{-15} saniye gibi oldukça kısa bir sürede gerçekleşir. Bu kadar hızlı bir etkileşim, elektronların son derece düşük kütlesi (9.31×10^{-31} kg) ile ilişkilidir; bu da onların elektrik alan etkilerine hızlıca tepki vermesini sağlar. İyonik özellik göstermeyen dielektrik malzemeler yalnızca elektronik polarizasyonu gerçekleştirir.

2.9.2 Atomik Polarizasyon

Poliatomik moleküllerden oluşan dielektrik malzemeler, genellikle elektronik ve iyonik polarizasyonu bir arada barındırır. Elektrik alanın etkisiyle, bir poliatomik molekül içindeki atomlar veya iyonlar birbirine göre yer değiştirir [2]. Bu olay, kristal yapının doğal titreşimlerinin bozulmasından kaynaklanır ve "titreşimsel polarizasyon" olarak adlandırılır. Özellikle düşük frekanslarda gözlemlenen iyonik polarizasyon, bu süreçte önemli bir rol oynar.

İyonik katı maddeler iki ana gruba ayrılabilir. Birinci grupta, NaCl gibi kalıcı dipol içermeyen maddeler bulunur. Bu malzemelerde, iyonlar basit bir kübik kafes yapısı oluşturur ve kafes simetrisi ile yük nötrlüğü, elektrik dipollerinin birbirini dengelemesini sağlar. İkinci grupta ise kalıcı dipollere sahip iyonik maddeler yer alır. Örneğin, HCl'de kristal kafesin asimetric yapısı, pozitif ve negatif iyon bölgeleri arasında farklı iç alanların oluşmasına neden olur. Çoğu iyonik katı madde, elektronegatiflik farklarından kaynaklanan bu asimetric yapıya sahiptir.

Bununla birlikte, kalıcı dipollere sahip iyonik katı maddeler, elektrik alan altında hizalanamadıkları için kutuplanabilirliğe doğrudan bir katkı sağlamazlar. İyonik polarizasyonun gerçekleşme süresi genellikle 10^{-13} - 10^{-12} saniye arasında değişir.

2.9.3. Yönelme Polarizasyonu

Yönelme polarizasyonu, yalnızca kalıcı dipol momenti bulunan molekül ya da parçacıkların yer aldığı malzemelerde gerçekleşir [2]. Elektrik alan uygulandığında, dipoller kendilerini alanın yönüne uygun biçimde yeniden düzenler. Dış kuvvetin etkisiyle dipoller, başlangıçtaki dengelerinden uzaklaşıp farklı bir denge durumuna geçer ve bu kuvvet ortadan kalktığında, orijinal dengelerine dönme eğilimindedir. Bu davranış, "gevşeme" olarak adlandırılır. Yönelme polarizasyonu, genellikle düşük frekanslarda ve dipol özelliklerine sahip malzemelerde gözlemlenir.

Atomik ve Elektronik polarizasyonlar ise, temel olarak elektron bulutlarının yer değiştirmesi ya da atomların ve moleküllerin kafes yapılarındaki titreşimlerden kaynaklanır. Molekül içi bu süreçler, sıcaklık değişimlerine karşı düşük bir hassasiyet gösterir. Bunun aksine, yönelme polarizasyonu moleküller arası bir etkileşimdir ve esnek olmayan hareketleri içerdiği için sıcaklık değişimlerine oldukça duyarlıdır. Bu sebeple, yönelme polarizasyonu sıcaklık değişikliklerinden büyük ölçüde etkilenir.

2.9.4. Arayüzey veya Uzay Yükü Polarizasyonu

Elektriksel iletkenliğin bulunmadığı durumlarda ortaya çıkan bir fenomen olan arayüzey ya da uzay yükü polarizasyonu, dielektrik malzemelerde yüklerin belirli bölgelerde birikmesiyle meydana gelir. Polimer katkısı ile zenginleştirilen malzemelerde, malzeme içerisindeki yük taşıyıcıları hareket etmeye başlar ve bu hareket sonucunda alan yükleri oluşur. Yük yoğunluğunun fazla olduğu, yani yüksek iletkenliğe sahip olan malzemelerde, bu taşıyıcıların arayüzeylerde veya tanecik sınırlarında birikmesi polarizasyon etkisini artırır [13]. Harici bir elektrik alan uygulandığında, yük taşıyıcılarının bu hareketi, malzemenin kapasitesini yükseltir. Bu tür bir süreç genellikle 'arayüzey' veya 'uzay yükü polarizasyonu' olarak adlandırılır.

MIS, MOS ve MPS gibi farklı yapı türleri, arayüzeylerinde bulunan yalıtkan tabakalar ya da yasak enerji aralığındaki safsızlıklar nedeniyle arayüzey polarizasyonuna maruz kalabilir. Bu durum, literatürde 'Maxwell-Wagner polarizasyonu' olarak da bilinmektedir. Kutuplaşmış yalıtkan tabakalar, farklı kondansatör özellikleri sergileyerek, arayüzeydeki elektrik potansiyelini ve elektrik alanını etkileyebilir.

2.10. Çinko Oksit (ZnO) Bileşiminin Özellikleri

Çinko oksit (ZnO), doğada mineral formunda bulunan ve genellikle wurtzite kristal yapısında kristalleşen bir bileşiktir. Hekzagonal yapıya sahip ZnO'nun örgü sabitleri sırasıyla $a=3,24 \text{ \AA}$, $c=5,20 \text{ \AA}$ olarak rapor edilmiştir [5,6].

ZnO, çok yönlü bir inorganik malzeme olarak tanımlanabilir ve geniş uygulama alanlarına sahiptir. Bu materyal, yüksek geçirgenlik, piezoelektrik özellikler, geniş bir bant aralığı $3,37 \text{ eV}$ ve oda sıcaklığında ferromanyetik davranış gibi birçok avantaja sahiptir [16]. Geniş bant aralığı, özellikle ZnO'yu morötesi (UV) ve mavi ışık yayan diyot (LED) gibi optoelektronik uygulamalar için uygun hale getirmektedir. Ayrıca, ZnO, yüksek bağlanma enerjisi ile dikkat çeker ve bu durum, ZnO'yu diğer geniş bant aralığına sahip malzemelerle karşılaştırıldığında avantajlı bir konuma getirir ((ZnSe (20 meV), GaN (21 meV)) 60 meV [7].

ZnO nanopartiküller, fotokatalitik özelliklerinden dolayı güneş ışığı altında organik kirleticilerin ayrıştırılması için kullanılabilir. Ayrıca sensörler, piezoelektrik güç çeviriciler, yüzey dalga cihazları ve şeffaf iletkenler gibi birçok yenilikçi cihazın üretiminde önemli bir rol oynar. Bu üstün özellikleri nedeniyle, ZnO'nun üretimi için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında sol-jel metodu, mikro emülsiyon sentezi, sprey pirolizi, hidrotermal yöntem ve RF plazma sentezi gibi teknikler bulunmaktadır. Üretim yönteminin seçiminde maliyet, süreklilik ve verimlilik önemli kriterlerdir [13].

Nano boyutlarda artan yüzey/hacim oranı, ZnO'nun fiziksel ve kimyasal özelliklerini daha belirgin hale getirmekte ve bu durum, malzemenin birçok yenilikçi alanda kullanımını artırmaktadır [15]. ZnO'nun saydam iletken oksit malzemeler arasında popülerliği yüksektir ve bu durum, çinkonun doğada fazlaca bulunması ile zehirsiz bir element olmasıyla ilişkilidir. ZnO'nun, genellikle wurtzite kristal yapısında bulunur ve doğrudan bant yapısı ile ($\sim 3,3 \text{ eV}$) geniş bir yasak enerji aralığına sahiptir [16]. Bu özellikler, ZnO'yu UV dedektörleri, gaz sensörleri, biosensörler ve ince film transistörler gibi uygulamalar için cazip hale getirir.

ZnO'nun n-tipi iletim özellikleri, stokiometrik sapmalardan kaynaklanan oksijen boşlukları ve çinko atomlarının etkisi ile ilişkilidir. Ancak, p-tipi ZnO üretimi oldukça

zordur ve bu alanda yapılan çalışmalar son yıllarda artış göstermiştir. p-tipi ZnO filmler, özellikle elektriksel cihazların geliştirilmesi açısından büyük önem taşır [17].

2.11. Bi Bizmut Elementinin Özellikleri

Bizmut, 83 atom numarasına sahip, periyodik tabloda VA grubunda yer alan genellikle gümüş-beyaz renkte görülen bir yarı metaldir. Hafif pembe tonları nedeniyle diğer metallere kolaylıkla ayırt edilebilir. Fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından oldukça ilgi çekici olan bizmut, modern teknoloji ve bilimde önemli bir yer tutmaktadır [5,6].

Bizmut, kristal yapısında rombohedral bir düzenlemeye sahiptir. Yoğunluğu 9.78 g/cm^3 olan bu element, düşük erime noktası ($271.4 \text{ }^\circ\text{C}$) ile dikkat çekerken, kaynama noktası ise oldukça yüksektir (1564°C) [5]. Elektriksel ve termal iletkenlik açısından değerlendirildiğinde, diğer metallere kıyaslandığında düşük iletkenlik göstermektedir. Bu özelliği termoelektrik uygulamalarda tercih edilmesini sağlar [7,13].

Kimyasal olarak bizmut, oldukça kararlı bir yapıya sahiptir. Havada ince bir oksit tabakası oluşturarak paslanmaya karşı direnç kazanır. Genellikle +3 ve +5 oksidasyon durumları sergiler ve bizmut oksit (Bi_2O_3), bizmut sülfür (Bi_2S_3) gibi çeşitli bileşikler oluşturur [13]. Ayrıca nitrik asit gibi oksitleyici asitlerde çözünmesine karşın, zayıf asitlere karşı oldukça dirençlidir [5].

Bizmut, yer kabuğunda düşük miktarda (yaklaşık 0.2 ppm) bulunan bir elementtir. Genellikle bizmutinit (Bi_2S_3) ve bizmut oksit (Bi_2O_3) gibi minerallerde rastlanır. Doğada az miktarda saf metal formunda da bulunabilmektedir [5]. Ticari üretimi genellikle bu minerallerin işlenmesi yoluyla gerçekleştirilir [7].

Bizmut, termoelektrik özellikleri sayesinde ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren cihazlarda kullanılmaktadır. Bu özellik, bizmut-tellür (Bi_2Te_3) alaşımlarında daha belirgin hale gelir ve bu alaşımlar termoelektrik jeneratörlerin üretiminde önemli bir rol oynar [6,15]. Ayrıca, düşük toksisiteye sahip olması, bizmutun optoelektronik cihazlarda çevre dostu bir alternatif olarak kullanılmasını sağlamaktadır [13].

Bizmut, fiziksel, kimyasal ve elektronik özellikleri ile modern bilim ve teknolojiye değerli bir elementtir. Geniş uygulama yelpazesi ve çevre dostu yapısıyla, sürdürülebilir

malzeme biliminde ve enerji dönüşüm teknolojilerinde önemli bir yer edinmektedir [5,13].

2.12. Hidrotermal Metot

Hidrotermal yöntem, çinko oksit (ZnO) üretiminde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, özellikle nanomalzemelerin sentezi, yüzey morfolojisi kontrolü ve saflık açısından avantaj sağlamaktadır. Literatürde ZnO'nun hidrotermal yöntemle üretimi ve bu yöntemin fiziksel, optik ve manyetik özelliklere etkileri geniş bir şekilde ele alınmıştır.

Hidrotermal yöntem, yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında suyun çözücü olarak kullanıldığı bir sentez tekniğidir. Dietl ve arkadaşlarının (2000) yaptığı çalışmalara göre, ZnO gibi malzemeler, hidrotermal reaksiyon sırasında düzenli kristal yapılar oluşturur ve bu yapıların fiziksel özellikleri optimize edilebilir (42). Yöntem genellikle otoklav adı verilen basınca dayanıklı kaplarda gerçekleştirilir ve reaksiyon sıcaklığı 100°C-300°C arasında, basınç ise birkaç ila yüzlerce atmosfer arasında değişir (39; 41). Bu yöntem, düşük sıcaklıklarda enerji tasarrufu sağlarken yüksek saflıkta ürün elde edilmesine olanak tanır [42,44].

ZnO'nun hidrotermal sentezi sırasında kullanılan parametreler (reaksiyon sıcaklığı, süre, pH ve başlangıç kimyasal çözeltileri) elde edilen malzemenin boyut, morfoloji ve fonksiyonel özelliklerini belirler. Ashokkumar ve Muthukumaran (2015), hidrotermal yöntemle üretilen ZnO nanopartiküllerinin optik ve manyetik özelliklerini incelemiş ve bu yöntemle elde edilen malzemelerin biyomedikal ve elektronik uygulamalarda kullanılabileceğini belirtmiştir [46].

Antonio ve arkadaşlarının (2016) çalışmasında, ZnO'nun gözenekli yapılarının hızlı sentezi gerçekleştirilmiş ve bu malzemelerin güneş enerjisi uygulamaları için uygun olduğu gösterilmiştir. Özellikle yüzey alanının artırılması, ZnO'nun fotokatalitik etkinliğini güçlendirmiştir (39).

ZnO'nun manyetik özellikleri, çeşitli dopant elementlerin eklenmesiyle hidrotermal yöntemle kontrol edilebilir. Ravichandran ve arkadaşlarının (2014) çalışmasında, ZnO nanoparçacıklarının Mn ile katkılanmasının, manyetik ve antibakteriyel özellikleri artırdığı rapor edilmiştir [41]. Bu, ZnO'nun biyomedikal uygulamalarda kullanım potansiyelini göstermektedir.

Aynı şekilde, Sajid Shafiq ve arkadaşları (2016), ZnO'nun manyetik ve dielektrik özelliklerini Mn ve Fe dopantları ile iyileştirmiştir. Bu çalışmada, hidrotermal yöntemin yüzey pürüzsüzlüğü ve kristal saflığı üzerindeki olumlu etkileri vurgulanmıştır [44].

2.13. ZnO Filmlerinin Elde Edilmesi

Son yıllarda teknolojiye ve bilimsel araştırmalarda yaşanan ilerlemeler, ince film üretim tekniklerinde önemli değişikliklere neden olmuştur. İnce filmlerin üretimi için kullanılan ilk yöntemlerden biri elektroliz olmuştur. Günümüzde ise yarıiletken ince filmlerin üretimi için farklı teknikler kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında kimyasal buhar biriktirme (CVD), püskürtme yöntemi (spray-pyrolysis), vakum buharlaştırma (VE) ve dönel kaplama (sputtering) öne çıkmaktadır. İnce filmler, 1 nanometre ile 1 mikrometre arasında değişen kalınlıklarda üretilen ve atomların ya da moleküllerin alt tabakaya düzenli bir şekilde yerleştirilmesiyle elde edilen kaplamalardır. Sol-jel tekniği ise vakum gereksinimi olmaması, ekonomik ve güvenilir bir yöntem olması ile tekrarlanabilirlik sağlaması gibi avantajları sayesinde dikkat çekmektedir [25-29].

ZnO, n-tipi bir yarıiletken özellikleri taşıyan bir malzeme olarak değerlendirilmektedir. Bu malzeme, katkılama yöntemleriyle modifiye edilerek yüksek dirençli veya iletken ZnO ince filmler üretimi için kullanılabilir. ZnO'nun bu özelliği, yüksek elektrik iletkenliği ve görünür ışık bölgesinde şeffaflık sağlamasından kaynaklanmaktadır. Bu sayede, dokunmatik ekranlar gibi modern teknolojilerde kullanılmasına olanak tanır. ZnO ince filmleri, gaz sensörlerinden UV detektörlerine, alan etkili transistörlerden (FET) nem sensörlerine ve güneş pillerine kadar çok çeşitli cihazlarda uygulanabilir [15]. Özellikle güneş pilleri, düz panel ekranlar, akıllı camlar ve ışık algılama cihazlarında 20 yılı aşkın bir süredir tercih edilmektedir. Metal katkılarıyla zenginleştirilen ZnO ince filmleri, amorf silikon tabanlı güneş pillerinin üretiminde de kritik bir rol üstlenmektedir [30].

ZnO'nun elektriksel iletkenlik özellikleri, çeşitli katkılama yöntemleriyle iyileştirilebilir. Katkı maddeleriyle geliştirilen geçirgen ZnO ince filmleri, güneş pilleri ve düz panel ekranlar gibi teknolojilerde ideal bir pencere malzemesi olarak dikkat çeker. Yüksek kimyasal kararlılığı sayesinde, ZnO özellikle güneş pilleri ve düz panel ekranlar için geçirgen elektrot olarak kullanılmaya uygundur.

Geçirgen ve iletken ZnO ince filmleri, düşük sıcaklıklarda üretilebilir, düşük elektrik direnci sergiler ve bu özellikleri nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın bir kullanım

alanına sahiptir. Bunun yanı sıra, ZnO'nun piezoelektrik özellikleri, c-ekseni taşıyıcı yüzeye dik olacak şekilde büyütüldüğünde daha belirgin hale gelir [31,32].

ZnO, gaz sensörleri, fotodedektörler, güneş pilleri, LED ışık sistemleri ve lazerler gibi geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır. 3.3 eV değerindeki geniş yasak enerji aralığı sayesinde, ZnO optoelektronik teknolojiler için ideal bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Ek olarak, ışınlamaya karşı dayanıklılığı, ZnO'yu uzay araştırmalarında kullanılabilir hale getirir. Bunun yanı sıra, ZnO'nun düşük maliyetli ve bol miktarda bulunabilir olması, geniş boyutlarda üretim yapılabilmesi, ultraviyole ışık soğurma ve emisyon özellikleri göstermesi, hidrojen plazmasında yüksek kararlılığı, düşük sıcaklık koşullarında büyütülebilmesi ve toksik olmaması gibi avantajları, bu malzemeye olan ilgiyi artıran diğer önemli faktörlerdir [33].

2.14. ZnO Filmlerinin Optik Özellikleri

ZnO (çinko oksit), geniş bant aralığı ve yüksek optik geçirgenliği ile optoelektronik cihazlarda yaygın bir şekilde kullanılan, yüksek performanslı bir yarı iletkenidir. Bu malzeme, özellikle saydam iletken oksit (TCO) olarak, güneş pilleri, gaz sensörleri, LED'ler, lazerler ve optik dalga kılavuzları gibi çeşitli uygulamalarda tercih edilmektedir [34,35].

ZnO'nun optik özellikleri, ışığın malzeme ile etkileşimi sonucu belirlenir. Işık, elektromanyetik dalgalar olarak tanımlanabilir ve bu dalgalar malzemedeki elektronlar, iyonlar ve elektriksel kutuplarla etkileşime girerek malzemenin optik özelliklerini oluşturur. Bu özellikler arasında renk, saydamlık, opaklık, parlaklık, yansıma, kırılma, soğurma ve geçirgenlik yer alır [7].

ZnO, geniş bant aralığına (yaklaşık 3.3 eV) sahip bir malzemedir, bu da onu mor ışığı soğurabilecek ve UV bölgesinde foton salınımı gerçekleştirebilecek bir yarı iletken yapar [1]. ZnO'nun optiksel özellikleri üzerine yapılan çalışmalar, bu malzemenin enerji uygulamaları ve optoelektronik cihazlar için uygunluk göstermesini sağlar. Katkısız ZnO, n-tipi bir iletkenlik sergileyerek elektriksel iletkenliği artırır, ancak katkılarla bu özellikler modifiye edilebilir [36].

ZnO'nun ayrıntılı şekilde optiksel özelliklerinin incelenmesi, bu malzemenin performansını optimize etmek için kritik öneme sahiptir. Farklı yöntemler (optik, elipsometri, fotoluminesans, absorpsiyon) kullanılarak ZnO'nun deneysel olarak optik

özellikleri belirlenebilir [17]. ZnO, saydam ve iletken özelliği sayesinde özellikle güneş hücreleri ve diğer optoelektronik cihazlarda geniş uygulama alanına sahiptir [34].

ZnO' nun daha geniş bant aralığına sahip olmasının istenmesi, bazı optoelektronik uygulamalarda daha verimli hale gelmesini sağlar. Bu malzeme, yüksek bant aralığı ve yüksek optik geçirgenlik özellikleriyle gelecekte daha fazla alanda kullanım potansiyeline sahiptir [17].

2.15. ZnO Filmlerinin Elektriksel Özellikleri

ZnO, II - VI grubu malzemeler arasında yer alan ve n-tipi bir yarıiletken özelliği taşıyan bileşiklerden biridir. Oda sıcaklığında yaklaşık 3,5 eV genişliğinde bir bant aralığı sunması, bu malzemeyi dikkat çekici elektriksel iletim özelliklerine sahip kılar. Görünür ışık bölgesinde optik geçirgenliği %80-%90 civarındadır ve elektriksel direnç değeri 10^{-3} ile $10^2 \Omega.cm$ arasında değişmektedir [37]. Bu özellikler, ZnO' nun çeşitli elektronik ve optoelektronik uygulamalarda kullanılmasını mümkün kılmaktadır.

Saydam iletken oksit (TCO) malzemeler, yüksek optik geçirgenlikleri ve iletkenlikleri sayesinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu malzemeler, özellikle düz ekran teknolojilerinde, dizüstü bilgisayar ekranlarında, gaz sensörlerinde, güneş hücrelerinde, fırın camlarında ve ısı yalıtımı sağlayan pencerelerde yaygın olarak kullanılmaktadır [38]. Saydam iletken oksitlerin tercih edilmesindeki temel faktörler, yüksek elektriksel iletkenliklerinin yanı sıra çevresel etmenlere karşı dayanıklılıkları, düşük maliyetleri ve elektronik devre elemanları olarak işlev görme uygunluklarıdır.

Elektriksel iletkenlik, malzemenin atomik bağ yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Metalik bağ yapısına sahip malzemelerde, serbest elektronlar rahatlıkla hareket edebilir, bu da yüksek elektriksel iletkenlik özelliklerinin ortaya çıkmasına neden olur.

Diğer bağ türlerinde ise valans elektronlar, iyonlara, atomlara, ya da kovalent bağlarda atom çiftlerine sıkı sıkıya bağlıdır ve malzemenin yalıtkan özellikler göstermesine yol açar. Örneğin, Si ve elmas; benzer kristal yapısına sahip olup, her ikisi de kovalent bağlarla bağlıdır. Ancak, Si yüksek sıcaklıklarda iyi bir iletkenlik gösterirken, elmas mükemmel bir yalıtıcıdır [26].

Yarı iletkenlerin özdirenci, belirli sıcaklık aralıklarında metallere benzer bir davranış sergileyebilirken, bazı sıcaklık koşullarında yalıtkan davranışı gösterebilirler [15].



3. DENEYSEL DETAYLAR

Bu çalışmada, Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au (MIS) yapılar p-Si alttaş (300 µm kalınlıklı, <100 > yüzey yönelimli, 1-10 Ω. cm öz dirençli ve bir yüzeyi kimyasal olarak parlatılmış) üzerine büyütüldü. Fabrikasyon işlemlerinden önce, ilk olarak p-Si alttaş standart temizleme prosedürü (RC) kullanılarak ultrasonik banyoda iyice temizlendik sonra yüksek özdirençli (18MW) deiyonize su ile 10 dakika süreyle durulanıp yüksek saflıktaki kuru azot gazı ile kurutuldu. Ardından hemen yüksek vakumlu metal buharlaştırma sistemine alınarak p-Si alttaşın arka yüzeyine 1mTorr basınç altında ve 150 nm kalınlığında yüksek saflıktaki altın (%99,999) termal olarak buharlaştırıldı. Düşük dirençli veya iyi kaliteli bir arka omik kontak oluşturmak için p-Si/Al alttaş 500oC' de azot ortamında tavlandı. Çinko asetat (Zn (CH₃COO)₂) ve nikel klorür (NiCl₂) 15 ml metoksietanol içinde ayrı ayrı çözülerek sırasıyla Çinko (0,1 M) ve Nikel (0,1 M) çözeltileri oluşturuldu. Ek olarak, NaOH 65 ml metanol içinde çözülerek 0,4 M baz çözeltisi hazırlanmıştır. ZnO ve Bi sentezi, 0,1 M çinko çözeltisi ve 0,4 M baz çözeltisinin ayrı ayrı çalkalanmasıyla oluşturulmuştur. İkinci aşamada, hazırlanan (%0,5 Bi:ZnO) çözeltisi p-Si alttaşın ön yüzünde ara yüzey tabakası olarak hidrotermal tekniği ile büyütüldü.

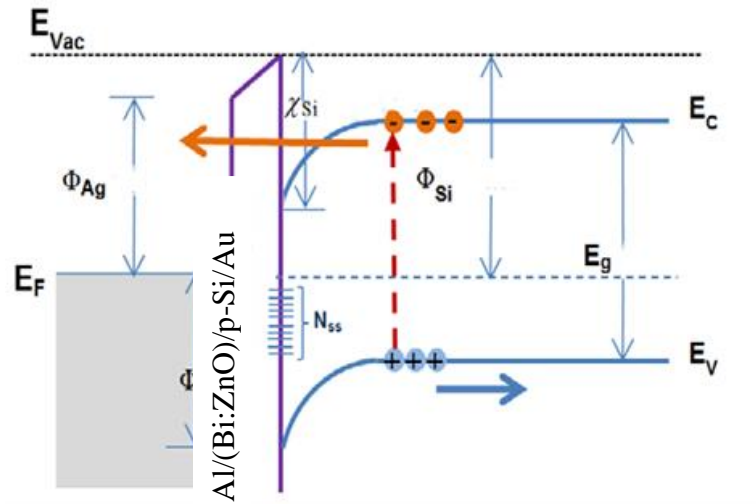
Katı filmler oluşturmak için sıcak bir plaka üzerinde 50 °C'de 1 saat kurutulmuştur. Daha fazla modifikasyon için, bir fulleren türevi olan PCBM, bir Fytronix spin kaplayıcı sistemi kullanılarak 2000 rpm ve 80 °C' de 30 saniye boyunca p-Si alttaşın ön tarafına kaplanmıştır. Bu 80 oC'lik sıcaklık, katman için optimum kaplama özelliklerinin elde edilmesinde hayati bir rol oynamaktadır. Bu gibi öngörülen koşullar altında, alt tabakaya daha iyi yapışma özelliğine sahip, oldukça homojen bir tabakanın elde edilmesi mümkün hale gelir. Kaplamadan sonra PCBM klorobenzen içinde çözülmüştür.

Son olarak, 1 mm çapında ve 150 nm kalınlığında aynı yüksek saflıkta Al, aynı termal buharlaştırma sisteminde (Bi:ZnO) ara yüzeyi üzerine büyütüldü. Hem Al doğrultucu/Schottky kontakların hem de arka taraf Au omik kontakların kalınlığı ve biriktirme oranları bir kuvars kristal metal kalınlık ölçer ile kontrol edildi. Elektriksel ölçümleri gerçekleştirmek için elektrot bağlantı sistemi olarak ince gümüş kaplı teller kullanılmış ve ardından üretilen numuneler bakır bir tutucu üzerine monte edilmiştir. C-

V ve G/ω -V ölçümleri de dahil olmak üzere karakterizasyon ölçümleri, dış etkileri ortadan kaldırmak için Fytronix kriyostatında yaklaşık 10^{-3} Torr' da Fytronix-FY-7000 karakterizasyon sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Al/Bi:ZnO/p-Si/Au diyotların şematik diyagramı Şekil 3.1'de sunulmuştur. Veri toplama ve analizler için kullanılan tüm cihazların karakterizasyon ekipmanı Fytronix Co. firmasından temin edilmiştir [1][Fytronix, IV/CV/GV characterization system, 2023, URL <https://fytronix.com>. Last accessed, January 27].



Şekil 3.1 (a,b). Hazırlanan Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au MIS tipi Schottky diyotun şematik görseli ve Kapasitans-voltaj (C-V) ve kondüktans/iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçüm sistemi



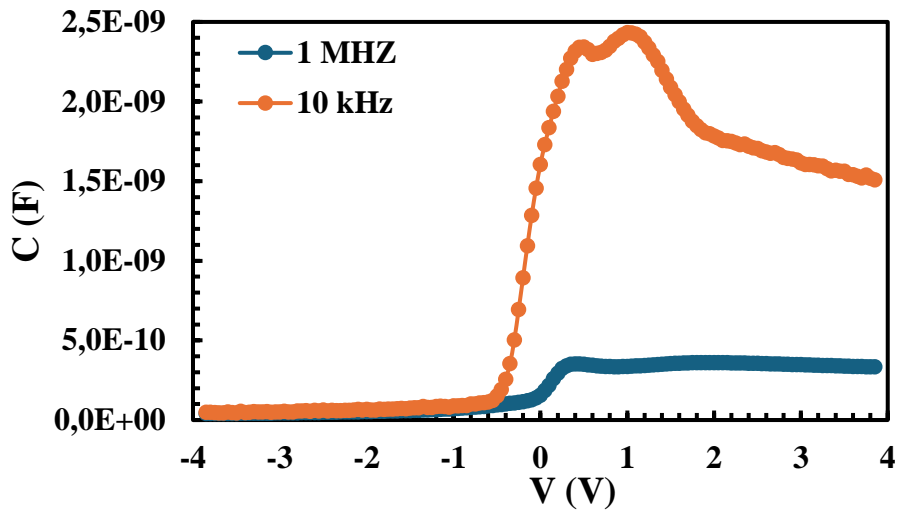
Şekil 3.2 Hazırlanan Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au MIS tipi Schottky diyotun enerji-bant diyagramı ve elektronik devresi.

4. DENEYSEL SONUÇLAR ve BULGULAR

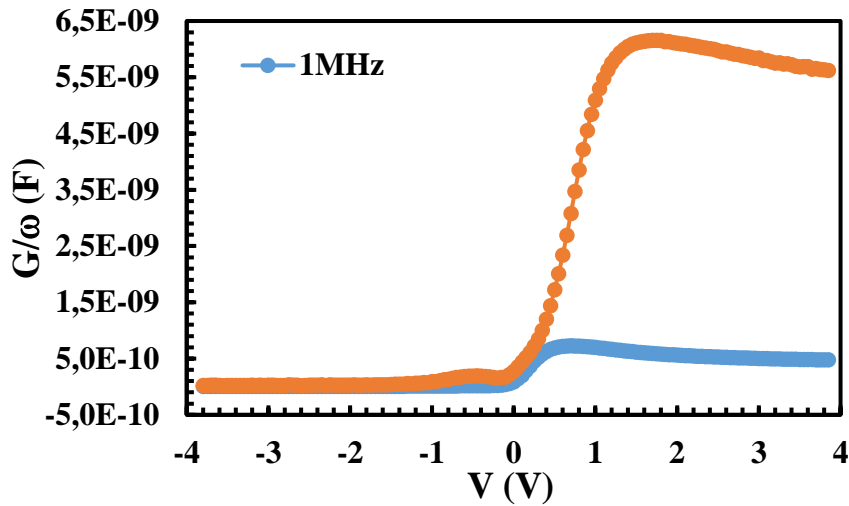
Şekil 4.1.a ve Şekil 4.1.b, 10 kHz ve 1MHz frekans değerlerinde, ± 4 V voltaj aralığında, oda sıcaklığında 50 mV' luk adımlarla üretilen Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au Schottky diyodun (SD) C-V ve (G/ ω)-V eğrilerinin ölçümlerini göstermektedir. Literatürde negatif voltaj bölgesi ters beslem; pozitif voltaj bölgesi ise doğru beslem olarak adlandırılır. Şekil 4a ve 4b' de görüldüğü gibi hem C-V hem de (G/ ω)-V eğrileri sırasıyla tersinim (negatif voltaj bölgesi), tükenim ($0 \leq V \leq 1.5$ V) ve yığılım/birikim ($V \geq 1,5$ V) olmak üzere üç farklı rejime sahiptir. Ancak bunların ileri doğru beslem bölgelerinde anormal bir tepe noktası vardır. Bu anormal tepe noktasının büyüklüğü ve konumu artan frekansla azalır ve ters sıfır doğru beslem voltajına doğru kayar. Bu tür davranışlar literatürde genellikle arayüzey durumlarının varlığı (Nss), gevşeme/yaşam süreleri (τ) ve seri dirence (Rs) atfedilir [1–6].

C'nin doğru besleme bölgesinde gözlemlenen piklerin yüksekliklerinin, artan frekansla birlikte azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, arayüzey durumlarının yaşam sürelerinin farklılık göstermesinden kaynaklanmaktadır. Düşük frekanslarda, arayüzey durumları dışarıdan uygulanan alternatif akım sinyalinin takip edebilir; çünkü bu durumda sinyalin periyot süresi, tuzaklardaki yüklerin zaman sabitinden daha büyüktür. Ancak frekans yükseldikçe, bu durum geçerliliğini yitirir ve arayüzey durumları sinyali izleyemez hale gelir. Bu davranış, arayüzey durumlarının frekansa bağımlılığı ile gevşeme süresi arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır. Düşük frekanslarda yapılan ölçümlerde, deneysel C ve G değerleri üzerinde yüzey durumlarından kaynaklanan katkıların etkili olduğu görülür. Bu katkılar, toplam kapasitansa ve kondüktansa ek bir kapasitans (Cex) ve kondüktans (Gex) sağlar. Doğru besleme C-V eğrilerindeki piklerin, Nss yoğunluk dağılımı, seri direnç (Rs) ve yüzey polarizasyonu ile ilişkili olduğu ifade edilmiştir [6-9]. Frekansın artmasıyla birlikte, Nss kaynaklı katkılar giderek azalır ve kapasitans değerleri sabit bir hale gelir. Özellikle 1 MHz'in üzerindeki frekanslarda bu katkıların tamamen yok olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, C-V ve G/ ω -V ölçümleri incelendiğinde, arayüzey durumlarının tersinim ve tükenim bölgelerinde etkili olduğu, seri direncin ise yığılıma bölgesinde baskın bir role sahip olduğu belirlenmiştir [1-10].

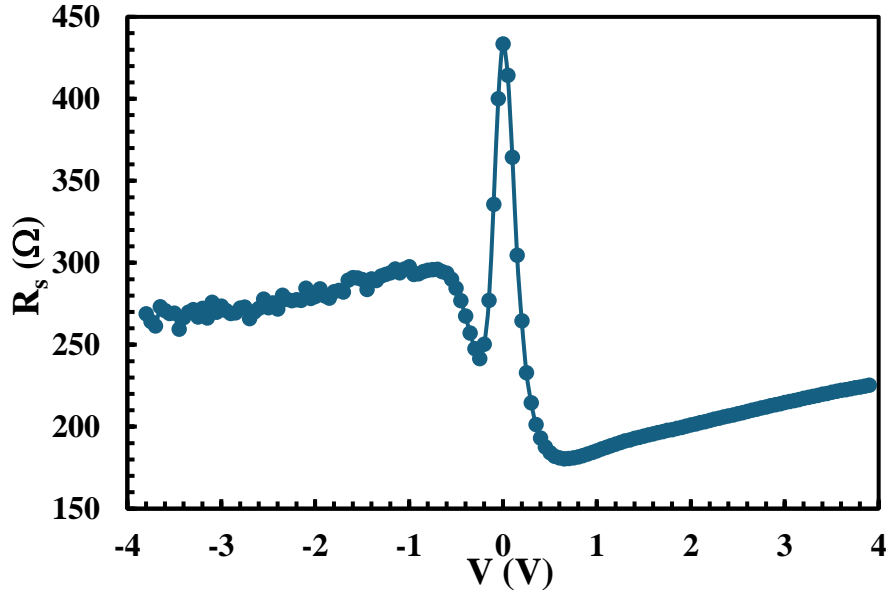
Şekil 4.1. a' da görüldüğü gibi numunenin özellikle düşük frekanstaki C-V eğrisinin tükenim bölgesinde (yaklaşık 0.5 ve 1.2V civarında) net iki pik göstermektedir. Bu piklerin varlığı, M-S arayüzeyinde ve yasak enerji aralığında yerleşmiş ara yüzey durumlarının özel bir dağılımına ve yaşam sürelerine atfedilir [1-5]. Yüksek frekansta (1MHz) C-V eğrisinde görülen bükülme ise seri direnç ve arayüzey tabakasının varlığı ile açıklanabilir. Benzer davranışlar Şekil 4.1.b' de görüldüğü gibi G/ω -V grafiklerinde de mevcuttur. Hazırlanan örneğin bu empedans ölçümleri üzerine etkisini belirlemek için, Nicollian-Brews [2,3] tarafından geliştirilen ve aşağıda verilen (4.1) eşitliği kullanılarak voltaja bağlı resistans grafiği (Ri-V)'de elde edilerek Şekil 4.2'de verildi.



Şekil 4.1.a Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD'nin 10kHz ve 1MHz' deki C-V eğrileri



Şekil 4.1.b Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin 10kHz ve 1MHz' deki G/ω -V eğrileri

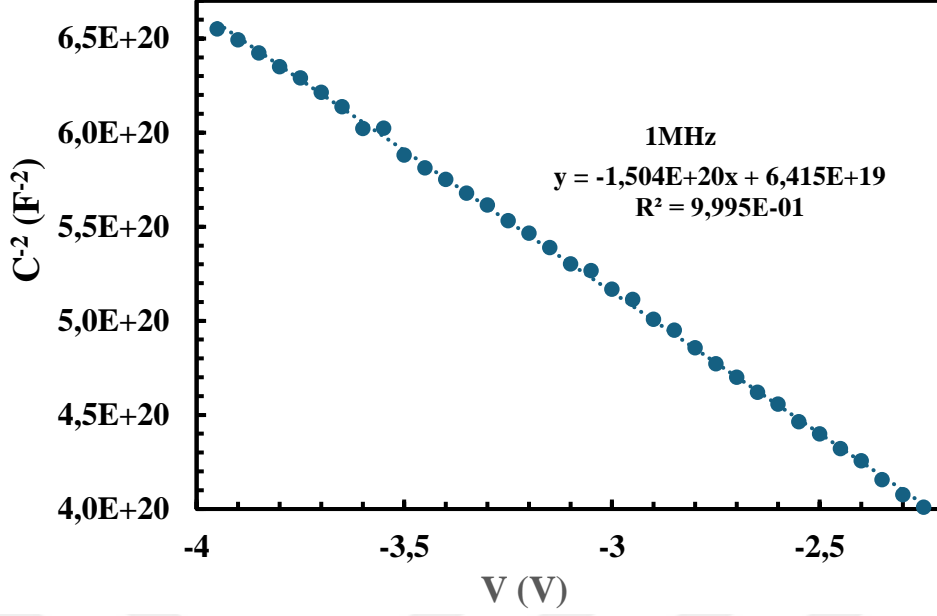


Şekil 4. 2 Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin 10 kHz'de R_s -V grafiği

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

Burada; C_i ve G_i herhangi bir voltaj değerinde ölçülen sığa ve iletkenlik değerleridir; ancak, hazırlanan yapıların gerçek R_s değeri, kuvvetli akümülyasyon bölgesine karşılık gelen C_{ma} ve G_{ma} değerleri kullanılarak elde edilir.

Nicollian ve Brews yöntemi [5], gerilime bağlı R_s değerlerini elde etmek ve ölçümler üzerindeki etkisini görmek için Eşitlik (4.1) ile uygulanmış ve elde edilen değerler Şekil 4.2 'de R_s -V eğrisi olarak gösterilmiştir [12-21]. Bu grafik R_s değerinin tepe davranışının SD için yaklaşık 0-0,03 V' ta meydana geldiğini göstermektedir. R_s ' nin bu tepe davranışı ara yüzey durumlarına atfen literatürde birçok benzer yapı için rapor edilmiştir [22-30].



Şekil 4.3 Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin 1 MHz' de ters beslem C^{-2} -V grafiği

C-V ve G/ω -V eğrileri verildi. MIS tipi SD yapılarında, diyotun tükenim-bölgesi sığası (C) değeri aşağıdaki gibi tanımlanır [1-3].

$$C = \frac{|\partial Q_{sc}|}{\partial V} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s\epsilon_0 N_A}{2(V_d - V - \frac{kT}{q})}} \quad (4.2)$$

Dolayısıyla, bir MS veya MIS tipi Schottky yapının ters beslem altında, C^{-2} ile V arasındaki ilişkisi aşağıdaki gibi verilir [1-10,21].

$$C^{-2} = \frac{2}{q\epsilon_s\epsilon_0 A^2 N_A} (V_0 + V_R) \quad (4.3)$$

Burada; ϵ_s ve ϵ_0 sırasıyla yarıiletkenin ve boş uzayın dielektrik sabitleri; A, Schottky kontağın alanı ve V_R diyot üzerine uygulanan ters beslem voltajı ve V_0 ise C^{-2} -V grafiğinde, C^{-2} eksenini (y-ekseni) sıfır iken voltaj eksenini kestiği noktadır.

$$V_0 = V_d - kT/q \quad (4.4)$$

$$V_D = V_0 + kT/q \quad (4.5)$$

$$E_F = kT/q \cdot \ln(N_V/N_A) \quad (4.6)$$

$$\Phi_B = V_o + \frac{kT}{q} + E_F \quad (4.7)$$

$$W_D = (2\varepsilon_s V_D / qN_D)^{0.5} \quad (4.8)$$

$$E_m = \left[\frac{2qN_D V_{bi}}{\varepsilon_s \varepsilon_o} \right]^{0.5} \quad (4.9)$$

Eşitlik (4.4), (4.5), (4.6), (4.7), (4.8) ve (4.9)' dan faydalanarak 1 MHz'de ters beslem C⁻²-V grafiğinden belirli diyot parametreleri elde edilmiş ve Çizelge 4.1' de sırasıyla verilmiştir. Bu parametreler alıcı katkı atomlarının yoğunluğu (N_A), Fermi enerjisi (E_F), difüzyon potansiyeli (V_D=V_o+kT/q), eklemde oluşan maksimum elektrik alan (E_m), tükenim tabakası kalınlığı (W_D) ve potansiyel engel yüksekliği (Φ_B(C-V)) ve seri direnç değerleridir. Şekil 4.2 göz önünde bulundurularak 4V' deki seri direnç değeri Çizelge 4.1' de 225.32 Ω olarak sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin 1 MHz' ters beslem C⁻²-V grafiğinden elde edilen bazı temel Schottky diyot parametreleri.

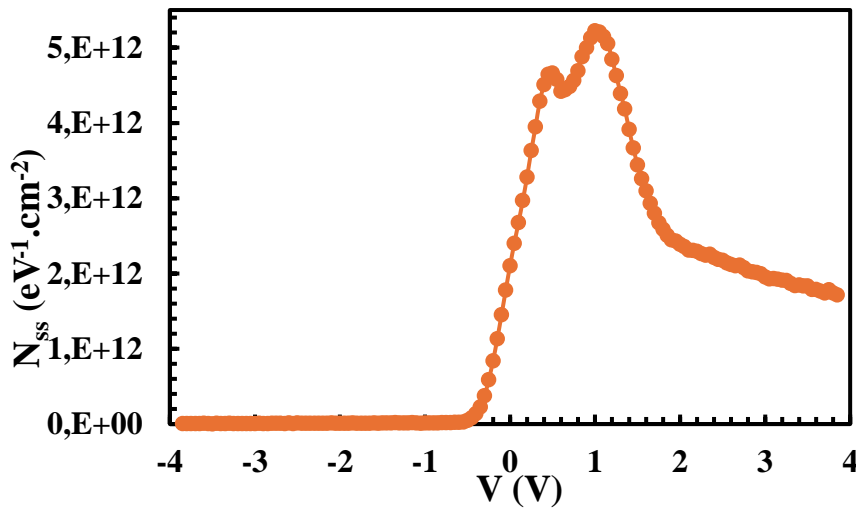
C⁻²-V (1MHz)	
Diyot parametreleri	
V_o (V)	0.43
V_d (eV)	0.46
N_A (cm⁻³)	1.29×10 ¹³
E_F (eV)	0.35
Φ_B (eV)	0.805
W_d (cm)	4.35×10 ⁻⁷
E_m (V/cm)	1.7×10 ⁶
R_s (Ω) (4V)	225.32

Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au numunesinin N_{ss} profilinin gerilim ve frekansa bağıllığı Eşitlik (4.10)' dan elde edildi ve Şekil 4.3' de gösterildi. Ara yüzey durumları tükenim bölgesinde C-V ve G/ω-V grafikleri üzerinde daha büyük etki gösterdiğinden kapasitans ve iletkenliğin artmasına neden olur. Şekil 4.10' da açıkça görülebileceği gibi, yüksek-

düşük frekans kapasitans yönteminden hesaplanan N_{ss} -V eğrisi, (Bi:ZnO)/p-Si arayüzeyi arasındaki yüzey durumlarının enerjileri ile Si yarı iletkeninin bant aralığı arasına karşılık gelen özel bir yoğunluk dağılımı nedeniyle tükenme bölgesinde iki belirgin tepeye sahiptir.

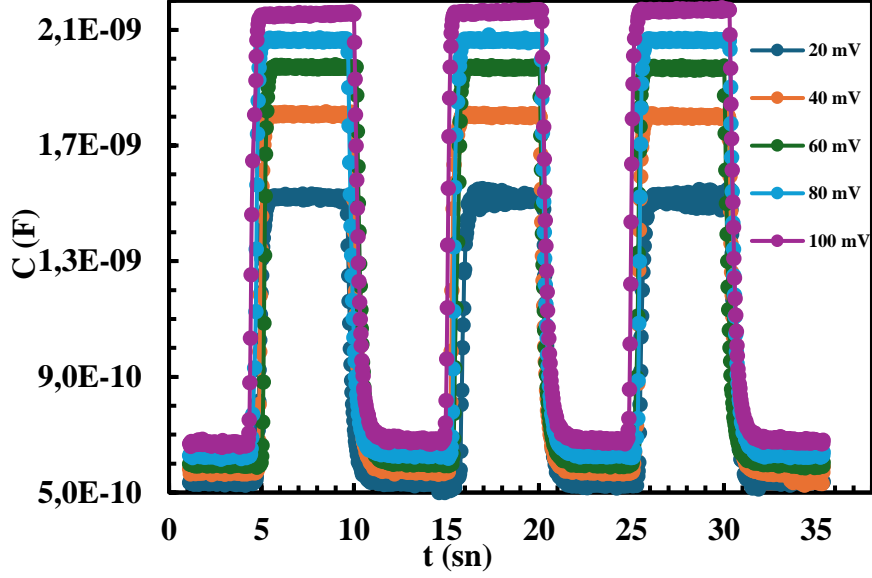
$$qAN_{ss} = \left[\left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} \right] \quad (4.10)$$

Burada C_i yalıtkan ara yüzeyin kapasitansı, C_{LF} (10kHz) düşük frekansta ölçülen kapasitans, C_{HF} (1MHz) yüksek frekansta ölçülen kapasitans, A doğrultucunun temas alanıdır.



Şekil 4.4 Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD'nin yüksek-düşük frekans kapasitans yönteminden hesaplanan N_{ss} -V eğrisi

Hazırlanan Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au diyodun sığa değerlerinin zamana bağlı tepkisi 0 ile 35 sn arasında Şekil 4.5' de verildi. Şekilden de görüldüğü gibi sığa değeri oldukça zamana bağlı olup ON/OFF değeri yaklaşık 4.2 kat artmaktadır. Üstelik değişim son derece düzgün ve neredeyse tam bir kare dalga şeklinde değişmektedir. Bu davranış hazırlanan Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin hem kalitesini hem de ışığa tepkisini oldukça iyi olduğunu göstermektedir.

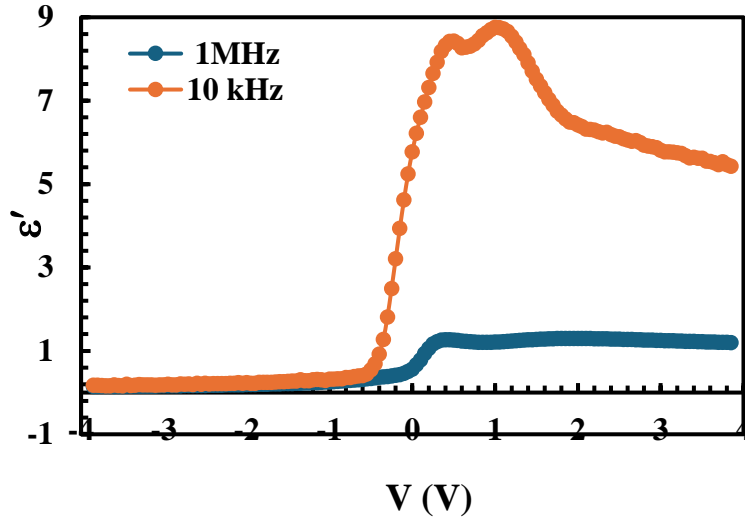


Şekil 4.5 Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' de sığanın zamana bağlı değişimi

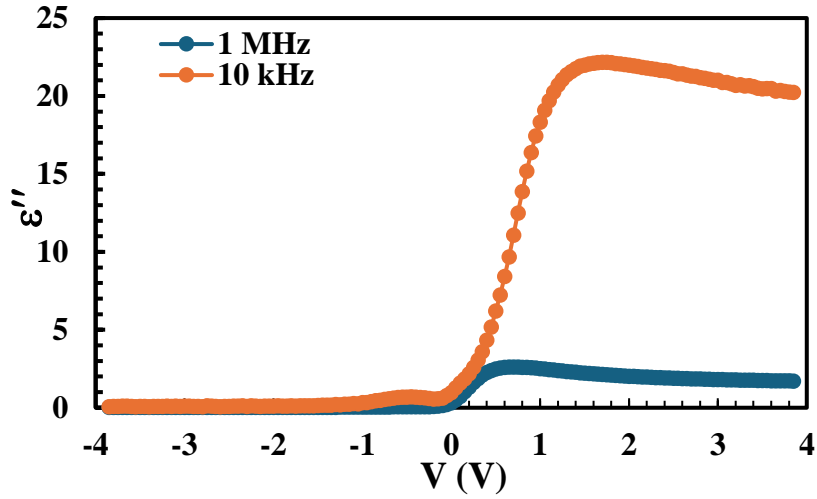
Kapasitans/iletkenlik (C/G-V) ölçümlerini içeren frekansa bağlı admittans tekniği genellikle kompleks dielektrik ifadesinin ($\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$) reel ve imajiner bileşenlerini hesaplamak için kullanılır. Bununla birlikte, elde edilen dielektrik veriler kompleks elektrik modülüsün ($M^* = M' + jM''$), kayıp açısı ($\tan\delta$) ve elektriksel iletkenliği (σ) analiz etmek için kullanılabilir. Bu çalışmada oda sıcaklığında C ve G' ye karşı V ölçümleri 10 kHz ile 1 MHz frekans değerlerinde $\pm 4V$ voltaj aralığında değerlendirilerek ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ ($=\epsilon''/\epsilon'$) değerleri aşağıdaki Eşitlik 4.11 bağıntısı kullanılarak çıkarılmıştır [12,16,24,26,31-33]. Dielektrik sabitinin reel kısmı ϵ' ile temsil edilir, boyutsuzdur ve bir malzemenin elektronik yükleri depolama kapasitesinin bir ölçüsüdür. Elektrik alan altında, dielektrik film kolayca polarize olabildiğinden bu durum iç sürtünme nedeniyle enerji kaybına neden olur. Bu enerji kaybı literatürde dielektrik kayıp (ϵ'') olarak adlandırılır. $\tan\delta$ ise elektrik alan altında ısı olarak enerji kaybını ölçmek için kullanılan bir başka parametredir.

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon'' = \left(\frac{C_m d_i}{A\epsilon_0}\right) - j\left(\frac{G_m d_i}{\omega A\epsilon_0}\right) = C_m/C_0 - j(G_m/\omega C_0) \quad (4.11)$$

Eşitlik 4.11' de $\frac{\epsilon_0 A}{d_i}$ boş kapasitörün sığa değeri (C_0), ϵ_0 ($8,85 \times 10^{-12}$ F/cm) serbest uzayın dielektrik sabiti, d_i ara yüzeyin kalınlığı, ω açısal frekanstır ($2\pi f$). C_m ve G_m/ω değerleri de sırasıyla ölçülen C ve G değerleridir. 10kHz ve 1MHz'de voltaja bağlı ϵ' -V, ϵ'' -V ve $\tan\delta$ -V profilleri sırasıyla Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8' de verilmiştir.

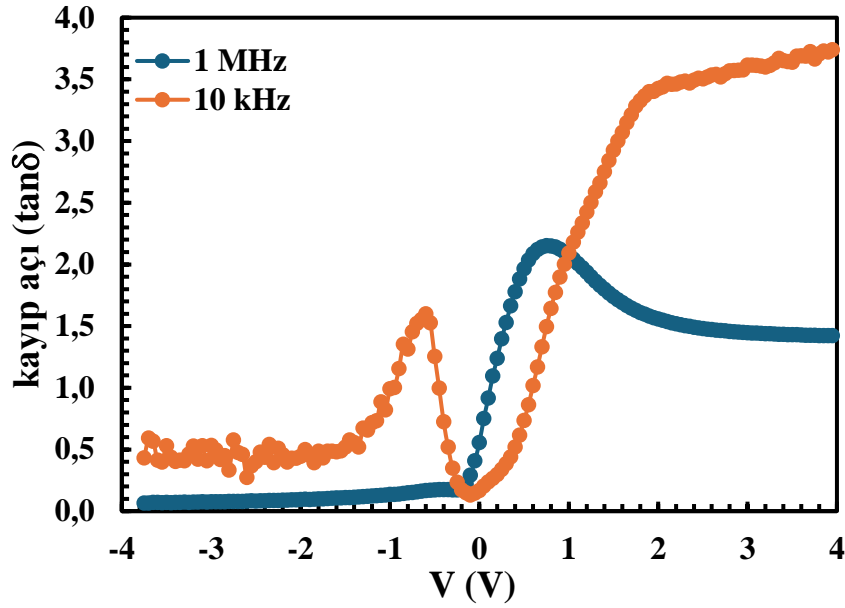


Şekil 4.6 Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin 10kHz ve 1MHz' deki ϵ' -V eğrileri



Şekil 4.7 Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin 10kHz ve 1MHz' deki ϵ'' -V eğrileri

Şekil 4.6 ve 4.7' de, hem ϵ' -V hem de ϵ'' -V eğrileri de C-V ve G/ ω -V eğrilerinde olduğu gibi yaklaşık -4,0/0,0V aralıklarına karşılık gelen tersinim (negatif voltaj bölgesi), tükenim ($0 \leq V \leq 1.5$ V) ve yığılım/birikim ($V \geq 1.5$ V) olmak üzere üç farklı rejim karakteristiğine sahiptir. Hem ϵ' hem de ϵ'' değerleri, tüm doğru beslem voltaj aralığında frekans azaldıkça artar. Tuzaklarda bulunan yükler, yaşam sürelerine (τ) bağlı olarak düşük frekanslarda aşırı bir polarizasyona neden olur. Bu katkı yeterince yüksek frekanslarda kaybolur çünkü periyot ($T=1/\omega$) τ 'dan daha düşük hale gelir [26,27].

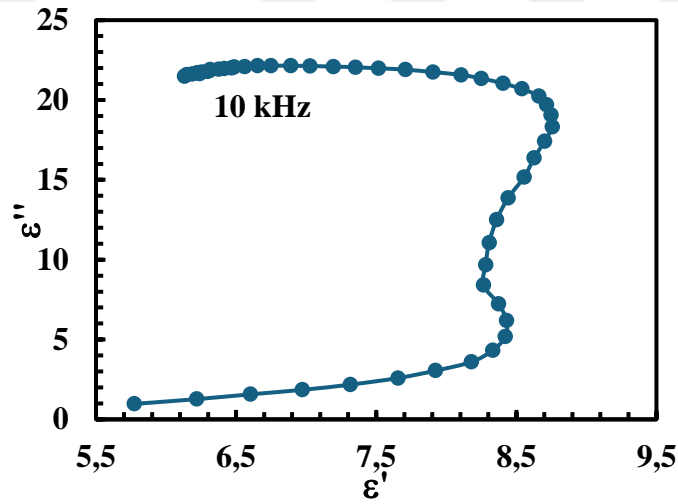


Şekil 4.8 Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin 10kHz ve 1MHz' deki $\tan\delta$ -V eğrileri

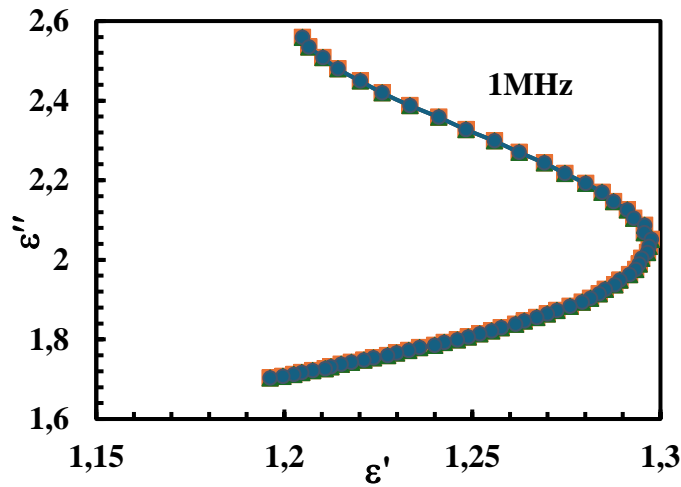
Tan δ -V eğrileri hem 10 kHz hem de 1 MHz için elde edildi ve Şekil 4.8' de verildi. Şekilden de görüldüğü gibi, her frekans için farklı tepe noktaları sergilemektedir. Her iki frekans için de net bir pik vermektedir. Ancak hem pik yüksekliği değeri hem de pozisyonları frekansla oldukça değişmektedir. Bu davranış, yarıiletken ile ara yüzey tabaka arasına yerleşmiş ara yüzey durumlarının özel bir dağılımına, onların yaşam süreleri ve Maxwell-Wanger polarizasyonuna atfedilebilir. Ayrıca bu arayüzey durumlarının uygulanan dış elektrik alan altında yeniden yapılanması ve düzenlenmesi ile de açıklanabilir [28,29].

Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8 sırasıyla, (Bi:ZnO) arayüzey ince filminin ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerlerinin hem tüketim hem de birikim rejiminde f ve V ' ye güçlü bir şekilde bağlı olduğunu göstermektedir. Daha yüksek ϵ' ve ϵ'' değerleri ince arayüzey tabakası, yüzey-dipol polarizasyonu ve arayüzey tuzaklarından kaynaklanmaktadır [29-33]. Dipoller, frekansa bağlı olarak elektrik alanının yönündeki değişime ayak uydurmak için yeterli zamana sahip olduğunda ($T=1/2\pi f$), bu frekanslarda ϵ' ve ϵ'' değerlerinde artışlar meydana gelir [26-37]. Bununla birlikte, tuzaklar arasında göçe izin verecek kadar uzun bir gevşeme süresine ($\tau \gg T$) sahip tuzaklarda lokalize olan yükler daha yüksek frekanslarda ϵ' ve ϵ'' değerlerine katkıda bulunamaz.

Cole-Cole eğrilerinin (ϵ' ve ϵ'') kullanılması, arayüzey tabakasının gevşeme sürecinin doğası hakkında önemli bilgiler sağlar. Bu nedenle, yapının 10 kHz ve 1 MHz'deki Cole-Cole eğrileri sırasıyla Şekil 4.9.a ve Şekil 4.9.b' de sunulmuştur. Burada 10 kHz için bu eğriler iki tane cole-cole eğrisi verirken, 1 MHz' de ise tek yarım çember özelliği sergilemektedir. Bu durum artan frekansla ara yüzey durumlarının uygulanan dış ac sinyali takip etme gücünün azaldığını göstermektedir. Başka bir ifadeyle polarizasyon etkisi de azalmaktadır veya ideal Debye davranışından sapmaktadır. Arayüzey katmanları veya dielektrik malzemeler için elektrik modülü eğrileri her zaman mükemmel daireler veya yarım daire şeklinde yaylar oluşturmaz; asimetrik de olabilirler. Cole-Cole eğrisinde 10 kHz'de gözlenen daha küçük yarım daire 1 MHz' de daha geniş bir yarım daire oluşturmuştur. Bu da malzemenin polarizasyonunun arttığını göstermektedir [38].



Şekil 4.9.a Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD'nin 10k Hz deki $\tan\delta$ -V eğrileri



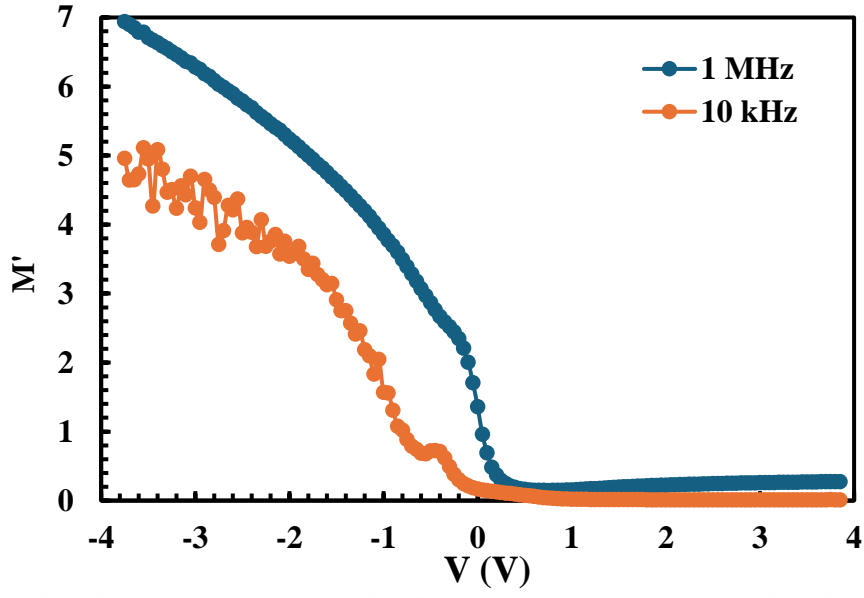
Şekil 4.9.b Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin 1MHz' deki Cole/Cole (ϵ' ve ϵ'') eğrileri

Kompleks elektrik modülünün reel ve imajiner formalizmi aşağıdaki ifade ile analiz edilebilir:

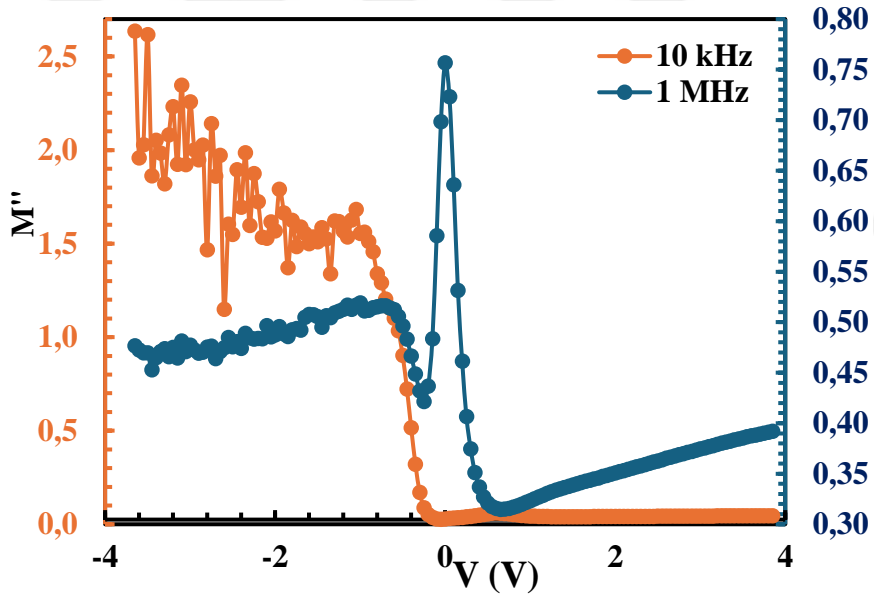
$$M^*(f) = \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} \right) + j \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} \right) \quad (4.12)$$

Eşitlik 4.12' den elde edilen deneysel M' ve M'' değerleri, 10 kHz ve 1MHz frekans değerleri ve uygulanan voltaj için sırasıyla Şekil 4.10 ve Şekil 4.11' de verilmiştir. Bu grafikler, uygulanan çeşitli dc beslem voltajı için hem dielektrik hem de elektrik modülü özellikleri üzerindeki polarizasyon ve arayüz tuzakları/durumları etkilerini görmek için gereklidir.

Gerilime karşı M' ve M'' grafikleri olan Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'in her ikisinde de $\omega\tau=1$ olduğunda sıfır doğru beslem civarında dielektrik kaybını gösteren bir artış olduğu görülmektedir. Bu artışlar ya da pikler, yük taşıyıcılarının hareketliliğiyle kısa mesafelerden uzun mesafelere geçişi göstermektedir. Ek olarak, frekans arttıkça tepe konumları pozitif voltaj değerlerine kaymaktadır. Tepe konumundaki bu kaymanın ana nedeni, dc elektrik alanı altında elektronik yüklerin ve dipollerin yeniden sıralanması ve yeniden yapılanmasıdır [30]. Hem frekans hem de voltaj ile M' nin gerçek ya da imajiner kısımlarında gözlenen önemli değişiklikler, arayüzey ince filmdeki lokalize yüklerin ve dipollerin sonucudur ve bunların böyle özel bir dağılımı genellikle düşük ve orta frekanslarda meydana gelen Maxwell-Wagner polarizasyonu (MWP) olarak adlandırılır [31-37]. Frekans arttıkça hem M' hem de M'' değerlerindeki azalma Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Bu, elektronik yüklerin kısa menzilli hareketliliğinin bir sonucudur. Frekansla birlikte ε^* ve M^* değerlerinin gerçek ve sanal kısımlarında gözlenen değişimin gevşeme olayları ve N_{ss} etkilerinden kaynaklandığı sonucuna kolayca varılabilir.



Şekil 4.10 Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin elektrik modülüsünün gerçek (M') kısmı



Şekil 4.11 Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin elektrik modülüsünün sanal (M'') kısmı

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada metal (Au) ile yarıiletken (p-Si) arasına hidrotermal metot ile büyütülen (%0,5 Bi-katkılı ZnO) ara yüzey tabakalı (MIS) yapıların hem sığa-voltaj (C-V) hem de iletkenlik-voltaj (G-V) ölçümleri düşük (10 kHz) ve yüksek (1 MHz) frekanslarda $\pm 4V$ aralığında 50 mV' luk adımlarla ölçüldü. C'nin doğru besleme bölgesinde gözlemlenen piklerin yüksekliklerinin, artan frekansla birlikte azaldığı belirlendi.

Ters beslem C^{-2} -V grafiğinin lineer bölgesinin voltaj eksenini kestiği noktadan (V_0) ve eğim ($d C^{-2}/dV$) değerlerinden faydalanarak yapının temel elektriksel parametreleri olan diffüzyon potansiyeli (VD) 0.455 eV, alıcı katkı atomlarının yoğunluğu (N_A) 1.29×10^{13} cm⁻³, Fermi-enerji seviyesi (EF) 0.35 eV, potansiyel engel yüksekliği (Φ_B) 0.805 eV, tükenim tabakasının kalınlığı (WD) 4.35×10^{-7} ve eklemde oluşan maksimum elektrik alan (E_m) 1×10^{-7} V/cm elde edildi.

Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au diyodun sığa değerlerinin zamana bağlı tepkisi 0 ile 35 sn arasında oldukça zamana bağlı olup ON/OFF değeri yaklaşık 4.2 kat arttı. Üstelik değişim son derece düzgün ve neredeyse tam bir kare dalga şeklinde değişti. Bu davranış hazırlanan Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au SD' nin hem kalitesini hem de ışığa tepkisini olabildiğince iyi olduğunu gösterdi.

Yüksek-düşük frekans kapasitans ($C_{HF} - C_{LF}$) metodundan arayüzey durumların (N_{ss}) voltaja bağlı dağılım profili; C ve G değerlerinden de yapının voltaja bağlı rezistans (R_i) profili Nicollian-Brews metodundan elde edildi.

Deneysel C-V ve G/ω -V verileri kullanılarak; kompleks dielektrik sabitinin ve elektrik modülüsün voltaja bağlı dağılım profilleri elde edildi. Buna ilave olarak kayıp tanjant ($\tan\delta$) değerleri de voltaja bağlı elde edildi. Polarizasyon etkisini görmek için ϵ'' - ϵ' (Nyquist) grafikleri çizildi.

Elde edilen tüm bu deneysel sonuçların hem frekansa hem de voltaja güçlü bir şekilde bağlı olduğu gözlemlendi. Dolayısıyla bu durum Al/(Bi:ZnO)/p-Si/Au MIS yapısının klasik

metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapılar yerine rahatlıkla kullanılabileceğini göstermektedir.



KAYNAKLAR

- [1] **Url-1** <https://fytronix.com>. Erişim Tarihi 02.12.2024 Fytronix, IV/CV/GV characterization system, (2024),
- [2] **S. M. Sze and K. Ng Kwok**,(2007). Physics of Semiconductor Devices 3rd ed. 2007 (New Jersey: John Wiley & Sons)
- [3] **B. L. Sharma**,(1984). Metal-semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications., Plenum Press New York,
- [4] **H.C. Card, E.H. Roderick**,(1971). Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes, Journal of Physics D: Applied Physics. 4 1589-1601.
- [5] **N.A. Al-Ahmadi** (2020). Metal oxide semiconductor-based Schottky diodes: a review of recent advances. Materials Research Express, 7 032001.
- [6] **Nicollian EH, Brews JR** (1982) Metal Oxide Semiconductor (MOS) Physics and Technology. Wiley, New York
- [7] **R.T. Tung**, (2014). The physics and chemistry of the Schottky barrier height. Applied Physics Reviews, 13 011304.
- [8] **W. Mönch, J. Vac.** (1999). Barrier heights of real Schottky contacts explained by metal-induced gap states and lateral inhomogeneities, Sci. Technol. B 17 1867.
- [9] **Sze SM** (1981) Physics of semiconductor devices, 2nd edn. Wiley, New York
- [10] **Nicollian EH, Goetzberger A** (1965) MOS conductance technique for measuring surface state parameters. Appl Phys Lett 7:216–219
- [11] **Paratap Reddy MS, Lee JH, Jang JS** (2013) Frequency-dependent series resistance and interface states in Au/bio-organic/n- GaN Schottky structures based on DNA biopolymer. Synth Met 185:167–171
- [12] **Çetinkaya HG, Feizollahi Vahid A, Basman N, Demirezen S, Şafak Asar Y, Altındal S** (2023) On the wide range frequency and voltage dependence of electrical features and density of surface states of the Al/(Cu:DLC)/p-Si/Au Schottky diodes (SDs). J Mater Sci: Mater Electron 34:822

- [13] **Ulusoy M, Badali Y, Pirgholi-Givi G, Azizian-Kalandaragh Y, Altındal Ş** (2023) The capacitance/conductance and surface state intensity characteristics of the Schottky structures with ruthenium dioxide-doped organic polymer interface. *Synth Met* 292:117243
- [14] **Ersoz G, Yuçedağ İ, Azizian-Kalandaragh Y, Orak I, Altındal Ş** (2016) Investigation of electrical characteristics in Al/CdSPVA/p-Si (MPS) structures using impedance spectroscopy method. *IEEE Trans Electron Devices* 63:2948–2955
- [15] **Erbilen Tanrıku E, Taşcıoğlu 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. *J Electron Mater* 52:2432–2440
- [16] **Akbas, AM, Cicek O, Altındal Ş, Azizian-Kalandaragh Y** (2021) Frequency response of C-V and G/ω -V characteristics of Au/(nanographite-doped PVP)/n-Si structures. *J Mater Sci Mater Electron* 32:993–1006
- [17] **Tan SO** (2019) Identification of the frequency- and voltage-dependent dielectric characterization of metal-Zn/PVA-semiconductor structures. *IEEE Trans Nanotechnol* 18:432–436
- [18] **Tan SO, Cicek O, Turk CG, Altındal Ş** (2022) Dielectric properties, electric modulus and conductivity profiles of Al/Al₂O₃/p-Si type MOS capacitor in large frequency and bias interval. *Eng Sci Technol Int J* 27:101017
- [19] **Şafak Asar YA, Feizollahi Vahid A, Basman N, Cetinkaya HG, 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
- [20] **Yuçedağ, İ.**, (2009). On the Anomalous Peak at Low and Moderate Frequency
Yuçedağ, İ., (2007). Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Yapılarda Elektrik ve Dielektrik Özelliklerinin Sıcaklık ve Frekansa Bağlı İncelenmesi.
- [21] **Ç. Ş. Güçlü, E. Erbilen Tanrıku, A. Dere, Ş. Altındal, Y. Azizian-Kalandaragh**,(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. *Mater Sci: Mater. Electron.* 34 1909. doi:10.1007/s10854-023-11302-z
- [22] **A. Altındal, A.F. Özdemir, A. Aydoğan, A. Turut**, (2022) Discrepancies in barrier heights obtained from current–voltage (IV) and capacitance–voltage

(CV) of Au/PNoMPhPPy/n- GaAs structures in wide range of temperature. *J. Mater. Sci.* 33, 12210–12223

- [23] **E. Erbilen Tanrikulu, A. Taşcıoğlu,**(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. *J. Electron. Mater.* 52, 2432–2440
- [24] **Özdemir, A.F., Türüt, A., Kökce, A.,** (2006). The Double Gaussian Distribution of Barrier Heights in Au/n-GaAs Schottky Diodes from I-V-T Characteristics. *Semiconductor Science and Technology*, 21(3), 298-302.
- [25] **Şahin, B., Çetin, H., Ayyıldız, E.,** (2005). The Effect of Series Resistance on Capacitance-Voltage Characteristics of Schottky Barrier Diodes. *Solid State Communications*, 135(8), 490-495.
- [26] **K. Prabakar, S.K. Narayandass,** (2003). D. Mangalaraj, Dielectric properties of Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te thin films, *Phys. Status Solidi (a)* 199 507-514.
- [27] **A.A. Sattar, S.A. Rahman,** (2003). Dielectric Properties of Rare Earth Substituted Cu–Zn Ferrites, *Phys. Status Solidi (a)* 200 415-422.
- [28] **S. Tewari, A. Bhattacharjee, P. P. Sahay,**(2009). Structural, dielectric, and electrical studies on thermally evaporated CdTe thin films, *J. Mater. Sci.* 44 534–540.
- [29] **B. John, S. Varadharajaperumal,** (2022). Comprehensive Review on CdTe crystals: Growth, Properties, and Photovoltaic Application, *TEPES* 2 180-196.
- [30] **L. M. Sheqna, R. S. Alnayli,** (2019). Effect of CdTe nanoparticles on linear and nonlinear optical property of polyvinyl alcohols PVA film, *Journal of Education for Pure Science- University of Thi-Qar*, 9 259-268.
- [31] **G. Kandhol, H. Wadhwa, S. Chand, S. Mahendia, S. Kumar,** (2019). Study of dielectric relaxation behavior of composites of Poly (vinylalcohol) (PVA) and Reduced graphene oxide (RGO). *Vacuum* 160 384-393.
- [32] **A. Ashery¹, M. A. Moussa, G. M. Turkey,** (2022). Enhancement of Electrical and Dielectric Properties of Graphene Oxide-nanoparticle Based Devices, *Silicon* 14 1913–1924.
- [33] **G. Fussell, J. Thomas, J. Scanlon, A. Lowman, M. Marcolongo,** (2005). The effect of protein-free versus protein containing medium on the mechanical properties and uptake of ions of PVA/PVP hydrogels *J. Biomater. Sci.* 16 489–503.

- [34] **Ç. Ş. Güçlü, Ş. Altındal, E. E. Tanrikulu**, (2024). Voltage and frequency reliant interface traps and their lifetimes of the MPS structures *Physica B: Condensed Matter* 677 415703.
- [35] **A. Feizollahi Vahid, S. Alptekin, N. Basman, M. Ulusoy, Y. Safak Asar, Ş. Altındal**, (2023). The investigation of frequency dependent dielectric properties and ac conductivity by impedance spectroscopy in the Al/(Cu-doped Diamond Like Carbon)/Au structures. *J. Mater. Sci: Mater. Electron.* 34 1118.
- [36] **A. Philip, S. Thomas, R. Nisha, K. R. Kumar**, (2015). Effect of frequency and bias voltage on the electrical and dielectric properties of atomic layer deposited Al/Al₂O₃/p-Si MOS structure at room temperature, *Indian J. Pure Appl. Phys.* 53 464–469.
- [37] **H. Bouaamlat, N. Hadi, N. Belghiti, H. Sadki, M. N. Bennani, F. Abdi, T. Lamcharfi, M. Bouachrine, M. Abarkan**, (2020). Dielectric Properties, AC Conductivity, and Electric Modulus Analysis of Bulk Ethylcarbazole-Terphenyl. *Hindawi Advances in Materials Science and Engineering*, 8689150 1-8.
- [38] **Ç. Ş. Güçlü, Ş. Altındal, M. Ulusoy, and A. Eroğlu Tezcan**, (2024). The study of the dependence of dielectric properties, electric modulus, and ac conductivity on the frequency and voltage in the Au/(CdTe:PVA)/ nSi (MPS) structures, *J Mater Sci: Mater Electron.* 35 1225. doi:10.1007/s10854-024-12921-w
- [39] **Antonio, T., Noushin, N., Hongjun, C., Anna, S.W. and Marco, R.** (2016). Ultra-rapid synthesis of highly porous and robust hierarchical ZnO films for dye sensitized solar cells, *Sol. Energy* 136:553–559.
- [40] **A. Göktas, and İ.H. Mutlu**, (2016). Structural, optical, and magnetic properties of solutionprocessed co-doped ZnS thin films, *J. Elect. Mater.* 45:5709–5720
- [41] **K. Ravichandran, K. Karthika and B. Sakthivel**, (2014). Tuning the combined magnetic and antibacterial properties of ZnO nanopowders through Mn doping for biomedical applications, *J. Magn. Mater.* 358:50–55.
- [42] **T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura, J. Cibert, D. Ferrand**, (2000). Zinc oxide as a dilute magnetic semiconductor: Theory and potential applications. *Science*, 287(5455), 1019–1022. <https://doi.org/10.1126/science.287.5455.1019>
- [43] **R. Ashraf, S. Riaz, M. Bashir, U. Khan, and S. Naseem**, (2014). Structural and magnetic properties of Mn/Fe co-doped ZnO thin films prepared by sol gel technique, *IEEE Trans.Magn.* 50:2401204.

- [44] **M. Sajid Shafiq, M. Furqan, S. Atiq, M. Saleem, S. Riaz, and S. Naseem**, (2016). Carriers mediated magnetic and impedance spectroscopic analysis of sol–gel synthesized $Zn_{0.95-x}Mn_xFe_{0.05}O$ ($0 \leq x \leq 0.05$) DMSs, *J. Sol-Gel Sci. Technol.* 79:535–542. *Sol-Gel Sci. Technol.* 79:535–542.
- [45] **M. Saleem, S.A. Siddiqi, S.M. Ramay, S. atiq, and S. Naseem**, (2012). Origin of ferromagnetism in Al and Ni co-doped ZnO based DMS materials, *Chin. Phys. Lett.* 29 (10):106103.
- [46] **M. Ashokkumar and S. Muthukumar**, (2015). Electrical, dielectric, photoluminescence and magnetic properties of ZnO nanoparticles co-doped with Co and Cu, *J. Magn. Magn. Mater.* 374:61–66.