



**DLC ARAYÜZEY TABAKALI METAL-  
YARIİLETKEN YAPILARIN ÜRETİLMESİ VE  
DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN FREKANS  
BAĞLI İNCELENMESİ**

**2024  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**Nuray URGUN**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Serhat Orkun TAN**

**DLC ARAYÜZEY TABAKALI METAL-YARIİLETKEN YAPILARIN  
ÜRETİLMESİ VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN FREKANSA BAĞLI  
İNCELENMESİ**

**Nuray URGUN**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Serhat Orkun TAN**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Ocak 2024**

Nuray URGUN tarafından hazırlanan “DLC ARAYÜZEY TABAKALI METAL-YARIİLETKEN YAPILARIN ÜRETİLMESİ VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN FREKANSA BAĞLI İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Serhat Orkun TAN .....  
Tez Danışmanı, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 24/01/2024

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Prof. Dr. Habibe USLU TECİMER (KBÜ)	.....
Üye : Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL (GÜ)	.....
Üye : Doç. Dr. Serhat Orkun TAN (KBÜ)	.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN .....  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Nuray URGUN

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### DLC ARAYÜZEY TABAKALI METAL-YARIİLETKEN YAPILARIN ÜRETİLMESİ VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN FREKANS BAĞLI İNCELENMESİ

Nuray URGUN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Serhat Orkun TAN

Ocak 2024, 99 sayfa

Bu çalışmada, ara katman olarak azot atomu (N) ile katkılanmış elmas benzeri karbon (DLC) ince filmin p-tipi Si alttaş üzerine elektrokimyasal yöntem ile biriktirilmesi ve ardından sırasıyla radyo frekansı manyetik püskürtmesi ile omik kontakın ve termal buharlaştırma biriktirmesi ile doğrultucu kontakın üretimi yapılmıştır. Üretilen Al/N:DLC/p-Si/Au Schottky Bariyer diyotun, SEM ve XPS ölçümleri ile yüzey özellikleri incelenmiştir. Kapasitans-voltaj ölçüm sonuçları kullanılarak yapıya ait kompleks dielektrik, kayıp tanjant, elektrik modülüs, iletkenlik, faz açısı ve empedans parametreleri ile yapının fonksiyonel dielektrik özellikleri incelenmiştir. Ölçümler (-3) V - (+4) V voltaj aralığı ve 1 kHz – 1 MHz frekans aralığı gibi geniş bir skalada gerçekleştirilmiştir. Üretilen MIS tipi Schottky diyot yapısının belirgin terslenim, tüketim ve birikim bölgelerine sahip olduğu ve artan frekans ve voltaj ile iletim özelliklerinin de artmasından dolayı frekans ve voltaja yüksek duyarlılığı olduğu

gözlemlenmiştir. Ayrıca üretilen bu yapının en düşük frekansta 407 gibi yüksek bir dielektrik sabitine sahip olması azot katkılı elmas benzeri ince filmin geleneksel arayüzey yalıtkanlarına oranla yaklaşık 104 katlık bir yalıtım oranı iyileştirmesi ile daha yüksek performanslı bir alternatif olabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Üretilen yapıda gözlemlenen bu yüksek yük depolama becerisi düşünüldüğünde bu yapının ara katmanının ultra-kapasitör uygulamalarında kullanılabileceği; cihaz parametrelerindeki olağan dışı çeşitli frekans ve voltaj hareketleri düşünüldüğünde ise uyarlandığı sistemde ayarlanabilir bir elektronik bileşen olabileceği konusunda umut verici sonuçlar ortaya koymaktadır.

**Anahtar Sözcükler :** Schottky Bariyer Diyot (SBD), Elmas Benzeri Karbon (DLC), Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS), N-katkılama.

**Bilim Kodu** : 90517

## **ABSTRACT**

**Master Thesis**

### **PRODUCTION OF DLC INTERFACE LAYERED METAL- SEMICONDUCTOR STRUCTURES AND FREQUENCY DEPENDENT INVESTIGATION OF DIELECTRIC PROPERTIES**

**Nuray URGUN**

**Karabük University**

**Institute of Graduate Programs**

**Department of Mechatronics Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Assoc. Prof. Dr. Serhat Orkun TAN**

**January 2024, 99 pages**

In this study, the diamond-like carbon (DLC) thin film doped with nitrogen atom (N) as an interlayer was deposited on the p-type Si substrate by electrochemical method, and then the ohmic contact was produced by radio frequency magnetic sputtering, and the rectifier contact by thermal evaporation deposition, respectively. Surface properties of the fabricated Al/N:DLC/p-Si/Au Schottky Barrier diode were examined using SEM and XPS measurements. The functional dielectric properties of the structure, such as impedance, phase angle, loss tangent, complex dielectric constant, electrical modulus, and conductivity, were examined using the calculations derived from capacitance-voltage measurement results. Measurements were carried out on a broad scale, such as (- 3) V - (+ 4) V voltage range and 1 kHz–1 MHz frequency range. It was observed that the produced MIS-type Schottky diode structure had distinct inversion, depletion, and accumulation regions, and due to the increase in conduction

properties with frequency and voltage, the structure had a high sensitivity to frequency and voltage. In addition, since this structure had a high dielectric constant of 407 at the lowest frequency, it has been concluded that the nitrogen-doped diamond-like thin film can be a higher-performance alternative to traditional interfacial insulators with an insulation ratio improvement of approximately 104 times. The device parameters have shown promising results that the intermediate layer of this structure, considering the high charge storage ability observed, can be used in ultra-capacitor applications and that it might serve as an adjustable electronic component in the system, given the unusual frequency and voltage movements.

**Key Word** : Schottky barrier diode (SBD), Diamond-like Carbon (DLC), Metal-Insulator-Semiconductor (MIS), N-doping.

**Science Code** : 90517



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda öncelikle bilgisini, desteğini ve çoğu zaman da sabrını esirgemeyen ve beraber yaptığımız diğer çalışmalarda da birçok kez bilgisine, ders notlarına, makalelerine ve süreçleri yönetmedeki tecrübesine başvurduğum sayın danışman hocam Doç. Dr. Serhat Orkun TAN'a tez sürecimin verimli ilerlemesine yaptığı katkı ve tüm desteği için en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması boyunca ve derslerde derin fizik bilgisiyle yarıiletkenler konusunda ufkumuzu açan ve çalışma gurupları oluşturmamızı sağlayan sayın hocam Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Ürettiğimiz yapıda katkısı olan ancak sonuçları görme fırsatı bulamayan, Hatay depreminde hayatını kaybeden Doç. Dr. Necati BAŞMAN'a Allah'tan rahmet diler ve teşekkürü borç bilirim, yine üretilen yapının hazırlanması ve ölçümlerinde katkısı bulunan Aylar FEİZOLLAHİ VAHİD'e katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Ve çalışmalarım süresince motivasyon desteğini esirgemeyen değerli arkadaşım Nurhayat'a ve bana olan emeklerinden dolayı sevgili aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

KABUL.....	Error! Bookmark not defined.
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiv
BÖLÜM 1 .....	1
LİTERATÜR .....	1
1.1. MS KONTAKLARIN PN EKLEMLERİNE ÜSTÜNLÜKLERİ.....	9
BÖLÜM 2 .....	12
TEORİK TEMELLER .....	12
2.1. METAL-YARIİLETKEN YAPILAR.....	12
2.1.1. Metal-Yarıiletken Kontak Türleri.....	12
2.2. METAL/YALITKAN/YARIİLETKEN YAPILAR .....	13
2.3. İDEAL MIS KAPASİTÖR .....	16
2.4. MIS YAPILARIN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ.....	19
2.4.1. Dielektrik Sabiti $\epsilon'$ Ve Dielektrik Kaybı $\epsilon''$ .....	25
2.4.2. Kayıp Tanjant Açısı.....	32
2.4.3. Elektrik Modülüs .....	33
BÖLÜM 3 .....	37
MATERYAL VE METOD .....	37
3.1. ELMAS BENZERİ KARBON (DLC).....	37
3.1.1. Arayüzey Tabakası ve İnce Film Teknikleri Açısından DLC .....	38
3.2. Si YARIİLETKEN ÖZELLİKLERİ .....	40

## Sayfa

3.3. Al/N:DLC/p-Si/Au SCHOTTKY BARIYER DIYOTUN HAZIRLANMASI .....	43
3.3.1. Azot Katkılı İnce Film Kaplama.....	43
3.3.2. Omik Alt ve Doğrultucu Üst Kontak Oluşumu .....	44
3.4. ÖLÇÜM YÖNTEMİ .....	47
3.4.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	47
3.4.2. X-Işını Fotoelektron Spektrometresi (XPS) .....	52
3.4.3. Empedans Analizörü.....	54
BÖLÜM 4 .....	56
ARAŞTIRMA BULGULARI .....	56
4.1. MALZEME YAPISI YÜZEY ANALİZİ.....	56
4.1.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (Sem) Analizi .....	56
4.1.2. XPS Analizi .....	57
4.2. KAPASİTANS-VOLTAJ VE KONDÜKTANS-VOLTAJ DEĞERLERİ....	59
4.3. DİELEKTRİK ÖZELLİKLER.....	62
4.3.1. Karmaşık Dielektrik Geçirgenlik Bileşenleri ( $\epsilon'$ , $\epsilon''$ ).....	63
4.3.2. Kayıp Tanjant Değeri ( $\tan\delta$ ).....	68
4.3.3. Karmaşık Elektrik Modülüs Bileşenleri ( $M'$ , $M''$ ) .....	71
4.4. AC İLETKENLİK ( $\sigma_{AC}$ ), FAZ AÇISI ( $\theta$ ) VE EMPEDANS ( $Z^*$ ).....	76
BÖLÜM 5 .....	84
SONUÇLAR .....	84
KAYNAKLAR .....	89
ÖZGEÇMİŞ .....	98

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1.1. Cu <sub>2</sub> O plakalarının eşdeğer devre şemaları .....	3
Şekil 1.2. İçinde yabancı bir atom bulunan doğrusal bir kafes içindeki enerji bantlarının gösterimi .....	4
Şekil 2.1. Malzeme seçim kriteri olarak iş fonksiyonu karşılaştırması.....	12
Şekil 2.2. Arayüzey eklenmiş MS yapılarının gösterimi. ....	14
Şekil 2.3. Yarıiletkenin p-tipi seçildiği bir ideal MIS kapasitörün ( $V=0$ ) denge durumundaki enerji-bant diyagramı.....	16
Şekil 2.4. İdeal MIS kapasitörün birikim, tükenim ve terslenim durumlarındaki bant bükülmeleri. ....	18
Şekil 2.5. Bant teorisinin kristal örgü yapısındaki farklı malzemeler için şematik gösterimi .....	19
Şekil 2.6. İdeal ve ideal olmayan dielektrik malzemedeki zamana göre yük değişimi .....	22
Şekil 2.7. Polarizasyon türleri ve frekansa göre etkin polarizasyon türü.....	23
Şekil 2.8. Paralel plakalı kapasitörün dielektrik ilavesiyle kapasite değişimi .....	25
Şekil 2.9. Dielektrik arakatman ilaveli yapının AC sinyal eşdeğeri .....	29
Şekil 2.10. MIS yapı ve eşdeğer devresi. ....	30
Şekil 3.1. Si atomunun yüzey merkezli kübik görseli.....	40
Şekil 3.2. Yarıiletken doğrudan ve dolaylı bant yapısında R-G etkileşim görseli... ..	42
Şekil 3.3. İnce film için hazırlık ve üretim aşamaları .....	43
Şekil 3.4. Radyo frekansı ile manyetik püskürtme (RF Magnetron Sputtering) biriktirme yöntemi ile omik alt kontak oluşumu ve sonrasında tavlama işlemi.....	45
Şekil 3.5. Vakum ortamında dirençli ısıtma yoluyla termal buharlaştırma yöntemi sonucu üst kontak oluşumu gösterimi.....	47
Şekil 3.6. Elastik ve elastik olmayan saçılma. ....	48
Şekil 3.7. Numune yüzeyi altındaki farklı derinliklerde yayılan farklı sinyallere göre oluşan elektron demetinin etkileşim hacmi görseli.....	50
Şekil 3.8. Taramalı elektron mikroskopuna (SEM) ait temel bileşenler ve sinyal işleme açısından oluşan sonuç sinyallerine genel bakış .....	51
Şekil 3.9. X - ışını Fotoelektron Spektrometresi (XPS) cihazı temel yapısı ve sinyalin işleniş sürecindeki hareket yolu .....	53
Şekil 3.10. Elektriksel ölçümler düzeneği. ....	55

## Sayfa

Şekil 3.11. Kullanılan ölçüm cihazları.....	55
Şekil 4.1. N:DLC filminin taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi.....	56
Şekil 4.2. XPS Spekturumunda C1 Pikleri.....	58
Şekil 4.3. XPS Spekturumunda N1 Pikleri. ....	58
Şekil 4.4. a) $C$ (nF) - $V$ (V) ve b) $G/\omega$ (nF) - $V$ (V). ....	61
Şekil 4.5. a) $\epsilon'$ - $V$ (V), b) $\epsilon'$ - $\ln(f)$ . ....	64
Şekil 4.6. a) $\epsilon''$ - $V$ (V), b) $\epsilon''$ - $\ln(f)$ . ....	67
Şekil 4.7. a) $\tan\delta$ - $V$ (V), b) $\tan\delta$ - $\ln(f)$ . ....	70
Şekil 4.8. a) $M'$ - $V$ (V), b) $M'$ - $\ln(f)$ .....	72
Şekil 4.9. a) $M''$ - $V$ (V), b) $M''$ - $\ln(f)$ . ....	74
Şekil 4.10. a) $M''$ - $M'$ , b) Lorentz eğrisi oluşturulmuş $M''$ - $M'$ .....	75
Şekil 4.11. a) $\sigma_{ac}$ - $V$ (V), b) $\sigma_{ac}$ - $\ln(f)$ , c) $\sigma_{ac}$ - $\log(f)$ Güç yasası uyumlanmış eğri, d) Güçlü ilekenlik bölgesindeki $\log(\sigma_{ac})$ - $\log(f)$ . ....	78
Şekil 4.12. a) $Z'$ - $V$ (V), b) $Z''$ - $V$ (V), c) $Z$ - $V$ (V), d) $Z''$ - $Z'$ . ....	81
Şekil 4.13. Faz açısı $\theta(^{\circ})$ - $V$ (V). ....	83

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 1.1. Farklı Üretim ve Katkılama Kompozisyonunda DLC Ara Katmanlar. . 39

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

- A : kapasitör plakası yüzey alanı /Schottky kontak yüzey alanı  
A : AC iletkenlikte sanal kısmın sıcaklık katsayısı  
A\* : Richardson sabiti  
a- : amorf/şekilsiz/kristal yapıda olmayan (amorphous)  
Ag : gümüş  
Al : alüminyum  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: alüminyum oksit  
Ar : argon  
Au : altın  
C : karbon  
C : kapasitans  
Cu : bakır  
CuO : bakır(II)-oksit  
Cu<sub>2</sub>O: bakır(I)-oksit  
DLC : elmas benzeri karbon (diamond-like carbon)  
E : elektrik alan  
E<sub>p</sub> : elektrik alana ters yönde kutuplama engelleyici elektrik alan  
E<sub>c</sub> : iletim bandı alt sınırı  
E<sub>f</sub> : Fermi enerji seviyesi  
E<sub>g</sub> : yasak enerji aralığı  
E<sub>v</sub> : valans (değerlik) bandı üst sınırı  
E<sub>i</sub> : özgül/saf Fermi enerji seviyesi  
ε\* : karmaşık dielektrik sabiti  
ε' : dielektrik sabiti, bağıl geçirgenlik, karmaşık dielektrik sabitinin gerçel kısmı  
ε'' : dielektrik kaybı ( karmaşık dielektrik sabitinin sanal kısmı)  
Fe : demir

$\Phi_S$  : yarıiletkenin iş fonksiyonu  
 $\Phi_M$  : metalin iş fonksiyonu  
 $\phi_p$  :  $E_F$  ile  $E_v$  arası Fermi potansiyeli  
 $G$  : kondüktans, iletkenlik  
GaAs: galyum arsenit  
GaN : galyum nitrür  
GO : grafen-oksit  
 $h$  : plank sabiti  
H : hidrojen  
He : helyum  
 $M^*$  : karmaşık elektrik modülüs  
 $M'$  : elektrik modülüsün gerçel kısmı  
 $M''$  : elektrik modülüsün sanal kısmı  
n-Si : çoğunluk yük taşıyıcısı elektronlar olan Si yarıiletken  
PVA : polivinil alkol  
p-Si : çoğunluk yük taşıyıcısı boşluklar olan Si yarıiletken  
Pd : paladyum  
 $\psi_{B_p}$  :  $E_F$  ile  $E_i$  arası Fermi potansiyeli  
Pt : platin  
 $R_s$  : seri direnç  
S : kükürt  
Se : selenyum  
 $\sigma_{ac}$  : AC elektrik iletkenlik  
 $s$  : AC iletkenlikte açısal frekansın kuvveti  
Si : silikon  
SiO<sub>2</sub> : silikon-dioksit  
T : kelvin (°K) cinsinden sıcaklık  
 $\tan\delta$  : dielektrik kayıp açısı, kayıp tanjant açısı  
 $\theta$  : faz açısı  
Ti :Titanyum  
TiO<sub>2</sub> : Titanyum dioksit  
 $\tau$  : tuzak ömrü  
 $\chi$  : yarıiletkenin elektron ilgisi



$\chi_i$  : yalıtkanın elektron ilgisi  
 $\omega$  : Açısal frekans  
Y : admitans  
Z : empedans

## KISALTMALAR

AFM : Atomik kuvvet mikroskobu (atomic force microscope)  
ALD : Atomik katman biriktirme (atomic layer deposition)  
BFOM : Baliga performans ölçütü (Baliga's Figure of Merit)  
BSED : Geri saçılan elektron dedektörü (back-scattered electron detector)  
CCD : Yük bağımlı cihaz (charge coupled device)  
C-V : Kapasitans-voltaj  
C-F : Kapasitans-frekans  
DOS : Yarı iletkenin tüm hacmi için belirli bir enerji seviyesinde elektronların işgal etmesine izin verilen farklı durumların sayısı (Density of States)  
DSSC : Boyaya duyarlı güneş hücresi (dye-sensitized solar cell)  
EDS : Enerji dağıtıcı dedektör (energy-dispersive detector)  
ETD : Everhart-Thornley Dedektörü  
Fe-SEM : Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (Field Emission Scanning Electron Microscope)  
G/ $\omega$ -V : Kondüktans- voltaj  
G/ $\omega$ -F : Kondüktans-frekans  
GAXRD : Bakış açısı X-ışını kırınımı (Glancing Angle X-ray Diffraction)  
HRS : Yüksek dirençli anahtarlama/durum (high resistance state)  
JFET : Birleşim yüzeyli alan etkili transistör (junction field effect transistor)  
LED : Işık yayan diyot  
LRS : Düşük dirençli anahtarlama/durum (low resistance state)  
MESFET : Metal-yarıiletken alan etkili transistör  
MFS : Metal-ferroelektrik-yarıiletken  
MS : Metal-yarıiletken  
MIM : Metal-yalıtkan-metal  
MIS : Metal-yalıtkan-yarıiletken

MPS	: Metal-polimer/organik-yarıiletken
MOS	: Metal-oksit-yarıiletken
MOSFET	: Metal-oksit-yarıiletken alan etkili transistör
MODFET	: Modülasyon katkılı alan etkili transistör
MOM	: Metal-oksit-metal
MMIC	: Tek yongalı mikrodalga entegre devre
Nss	: Arayüzey durumları, arayüzey durum yoğunluğu (interface states, density of interface states)
NVSM	: Geçici olmayan bellek
RTD	: Rezonans tünelleme diyotu
SBD	: Schottky Bariyer/Engel Diyot
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
ReRAM	: Dirençli rasgele erişimli bellek
(R-G)	: Arayüzey durumlarının yeniden düzenlenip-üretilmesi (recombination-generation)
TLD	: Lens içi dedektör (through the lens dedector)
XPS	: X-ışını fotoelektron spektroskopisi
WOS	: Web of Science veritabanı
WSTS	: Dünya Yarıiletken Ticari İstatistikleri (The World Semiconductor Trade Statistics)
Y	: Admitans
Z	: Empedans

## BÖLÜM 1

### LİTERATÜR

Küresel enerji ve kaynakların etkin kullanımı ihtiyacı her geçen gün artmakta ve gelişen teknolojiler bu ihtiyaca çözüm bulmaya çalışmaktadır. Dünya Yarıiletken Ticari İstatistikleri (WSTS) Kasım 2022 raporuna göre, yarı iletken sektörünün işlem hacminin 2023 yılı için 557 milyar dolar civarında olacağı tahmininden sonra, WSTS 2023 Kasım raporunda sunulduğu üzere 27 milyar dolar az bir farkla işlem hacmi gören yarıiletkenlerin, 2023'te önceki yıla göre yaşanan yüzde 9,4'lük gerilemenin ardından 2024'te tahmini yüzde 13,1 büyümeyle toparlanma yaşayacağı ve sektördeki en büyük büyümenin ise bellek segmentinde yaşanacağı öngörülmektedir [1-2]. Ayrıca Global Insights 2022 verilerine göre Güneş pili endüstrisinin 2028 yılında 37 milyar doları geçmesi beklenmektedir [3]. Bu istatistiklerin de ışığında elektrik-elektronik başta olmak üzere bağlantılı birçok alanının mihenk taşı olan metal-yarıiletken (MS) teknolojileri, sürekli değişen ihtiyaçlara cevap verme misyonunu yerine getirmek için devinimi bitmeyen önemli bir çalışma alanıdır. MS teknolojisinin belli başlı uygulamalarından biri de anahtarlamadan, enerji ve dolayısıyla bilgi depolamaya, ayrıca sensörlere kadar uzanan geniş çalışma skalasıyla Schottky Bariyer Diyot (SBD) yapılarıdır. Doğrultma davranışıyla çalışma prensibi özetlenebilecek bu yapılar MS kontaklar olarak bilinirken metal ve yarıiletkenin doğrudan temasından kaynaklı arayüz durumları gibi çeşitli cihaz performans problemlerini çözmek için genellikle cihaz parametrelerini çeşitli oranlarda iyileştiren katkılama atomu ve arayüzey kullanımı yöntemleriyle geliştirilebilmektedir [4-5].

MS yapılarının kullanım alanı ve kullanım şekli günümüz yarıiletken teknolojisinde yaşanan gelişmeler ışığında yalıtkan ara katmanlı yapı kullanımıyla iletim karakteristiğinin istenen şekilde manipüle edilmesine olanak tanıyarak yeni bir boyut kazanmıştır. Bu sebeple yarıiletken ve MS kontaklarını ilgilendiren gelişmelerden bazıları geçmişten başlayarak şöyle sıralanabilir.

Braun, kükürt (S) bazlı metallerde elektriksel iletkenlik davranışını araştırdığında bu metallerin dirençlerinin, akımın yönüne, yoğunluğuna ve süresine bağlı olarak değiştiğini keşfetmiş ve bu farkların toplam değerinin yüzde 30'unu oluşturduğunu vurgulamıştır. Ayrıca iyi biçimlendirilmiş kristallerden kaba parçalara kadar çeşitli doğal ve sentetik kükürt bazlı metallere ve örneklerle deneyler yapmış ve bir tür gümüş alaşımından (Neusilber, yenisilber) yapılmış zikzak şekilli bir tel kullanarak akımı kükürt bazlı metal numuneden geçirdiği örnekte tel ile numune arasındaki temasın ölçüm doğruluğu açısından kritik olduğu sonucuna varmıştır [6]. Nitekim bu çalışma, metal-yarı iletken bağlantılarının doğrultma davranışının ilk ancak tamamlanamamış bir açıklaması olarak bilinir. Bu tek yönlü akım akışı olgusu, çalışmalarında kullandıkları selenyum (Se) ile ayrıca Adams ve Siemens tarafından da doğrulanmıştır [7].

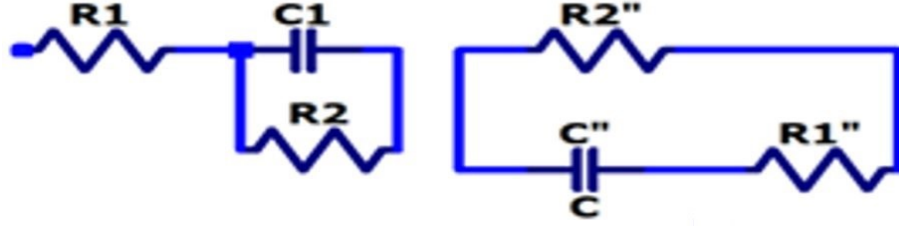
Kristalin iki ucuna 10 voltluk bir voltaj uygulayarak bir karborundum kristal taşının ürettiği sarımsı ışığı gözlemlediği ve elektrolüminesansın keşfedildiği Round'un çalışması, ışık yayan diyot (LED) teknolojisi gelişimi için temel teşkil etmiştir [8].

Bakır(I)-oksit ( $Cu_2O$ ) doğrultucu, ilk kez Grondahl tarafından keşfedilip patentlendikten sonra kendisi ve diğer birçok araştırmacı tarafından araştırılmaya devam edildi [9-10].  $Cu_2O$  ile başlayıp ilerleyen zamanlarda Se'den de üretimleri yapılan, bu yeni plaka tipi doğrultucular; galena, çinko (Zn), sentetik çinkoit, bornit, bakır (Cu)-piritler veya demir (Fe)-piritlerden üretilen ve Cat's whisker olarak da bilinen kristal doğrultucuların yerini almaya başlamıştır [7].

Grondahl, Cu'nun iş fonksiyonunun  $Cu_2O$ 'nunkinden daha yüksek olduğundan Schottky'nin "mesafeyi koruyan katman" etkisine karşın, akım iletim yönünün  $Cu_2O$ 'dan Cu'ya olacağını öne sürmüştür [10].

Bunu takiben, Schottky ve Deutschmann da, Grondahl'ın çalışması da dahil olmak üzere bakır oksit doğrultucular üzerine önceki çalışmaları incelediler ve farklı sıcaklık ve frekans değerlerinde empedansı belirlemek için bir ölçüm köprüsü kullandılar.  $Cu_2O$  ve Cu sınırı arasında bir ilişki tanımlamaya çalıştılar ve ardından Şekil 1.1'de gösterildiği üzere metal ve metal sülfid plakalardaki iletim mekanizması için iki farklı

eşdeğer devre önerdiler. Bilim adamları, sıcaklığa bağlı ölçüm sonuçlarının "zorlanmış elektron deşarj mekanizması" ile tutarsız olduğu ve inhibisyon (engelleme) bölgesinde iş fonksiyonunun aşılmasına neden olacak bir alanın varlığının kanıtlanamadığı sonucuna varırken bununla birlikte, aşırı miktarda elektron varlığının sınır tabakasındaki iletkenliği de önemli ölçüde azalttığını gözlemlədiler [10].

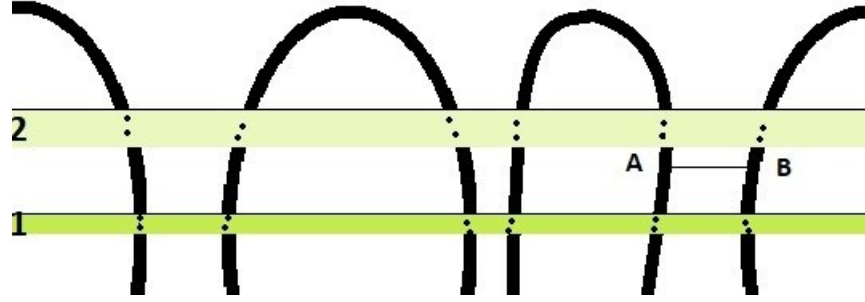


Şekil 1.1. Cu2O plakalarının eşdeğer devre şemaları [10].

Wilson, yarıiletkenlerin varlığının neye bağlı olduğunu açıklamak ve ayrıca bazı elementlerin metal veya yalıtkan olmaktan nasıl saptığını daha iyi anlamak için kuantum mekaniği yaklaşımlarından bazıılarını zamanının mevcut ve önceki teorilerine uygulamıştır. Bu nedenle hem iç hem de değerlik elektronlarının etkileri için temel bir kübik kristaldeki ilişkileri tanımlamak üzere serbest elektron yaklaşımı ve sıkı sıkıya bağlı elektronlar yaklaşımı ile enerji bantlarını karşılaştırmış ve hem neredeyse serbest olan hem de güçlü bir şekilde bağlı elektronlar için bazı bölgelerde enerjinin süreksiz olduğu sonucuna ulaşmıştır. Yalnızca belirli düşük sıcaklıklarda geçerli olan değiştirilmiş iletkenlik formülündeki sıcaklığa bağımlılık koşulları göz önüne alındığında, süreksizliğin mantıklı olduğunu öne sürmüştür. Ayrıca, daha önceki diğer araştırmacıların literatür çalışmalarına yaptığı atıflarda bahsettiği gibi, sıcaklığın daha büyük değerlerinde süreksizliğin önemli olmayacağını ileri sürdüğü için malzemenin metal gibi davranacağını kabul etmiştir. Böylelikle, bir yarı iletken ve bir yalıtkan arasındaki temel farkı, normal sıcaklıklarda yarı iletkenlerin, yalıtkanların aksine küçük ama yine de ölçülebilir bir iletkenliğe sahip olmalarıyla tarif etmiştir [11].

Ardından Wilson ve Fowler, yarı iletken olduğu varsayılan malzemeleri değişen safsızlık koşullarına bağlı davranışlarına göre üç alt gruba ayırıp; birinci grubu: bir madde saf olmadığında negatif sıcaklık katsayısı, kusursuz olduğunda ise pozitif sıcaklık katsayısı gösteriyorsa metaller olarak kabul etmiş ve bu önermeye örnek

olarak silikon (Si) atomunu vermişlerdir. Her zaman negatif bir sıcaklık katsayısına sahip olan metal sülfürleri ikinci tip bir malzeme kabul etmişlerdir. Ve bazen metaller grubuna bazen de yalıtkanlar grubuna ait olduğunu düşündükleri üçüncü sınıf için ise germanyum (Ge) atomu örneğini vermişlerdir. İkinci kategorideki maddelerin yarıiletken olduğunu düşünmüşler ve özellikle safsızlık oranı azaldıkça iletkenlikten önemli ölçüde sapan  $\text{Cu}_2\text{O}$  üzerinde araştırma yapmışlardır [12].



Şekil 1.2. İçinde yabancı bir atom bulunan doğrusal bir kafes içindeki enerji bantlarının gösterimi [12].

Wilson ve Fowler'e göre Şekil 1.2'deki 1. bandın onu dolduracak kadar elektrona sahip olması koşuluyla, ekstra atom kendi elektronunu mutlak sıfır sıcaklığında tutacağından, tüm yapı bir yalıtkan olacaktır ve mutlak sıfır'dan daha yüksek sıcaklık koşulları altında, AB enerji seviyesindeki elektronlar termal titreşimler yardımıyla saf maddenin komşu atomuna sıçrayabilmektedir. Dolayısıyla bu elektron ikinci seviye enerji bandına çıkabilerek serbest elektron olma özelliğine sahip olabilmektedir. Bu varsayım altında iletkenlik, 1. ve 2. bantlar arasındaki enerji seviyeleri yerine AB seviyesi ile 2. bant arasındaki enerji seviyeleri ile ilgili olan yabancı atomun elektron hareketini kolaylaştıran yeni bir üstel sıcaklık katsayısına sahip olacaktır. Bu nedenle, AB durumu ve üst bantlar gibi seviyeler arasındaki enerji farkları, normal bantlar arasındakinden oldukça küçük olacağından, termal titreşimler yalnızca yabancı atomun elektronunu uyarabilmektedir. Yabancı atomun elektronunun, kafesin termal titreşimleri yardımıyla önce saf maddenin bir atomuna doğru hareket etmesi gerekeceği için bu ekstra atom akım akışından doğrudan sorumlu olmamaktadır. Dolayısıyla bu çalışma, safsızlık değişkeninin öncelikle üst banttaki boşluklara olan elektron geçişini etkilediğini açıklamaktadır. Bunun yanı sıra saçılma etkisi, öncelik sırasına göre geçiş iletim etkisinden sonra gelen ikincil bir fonksiyondur. Bu varsayım

ile, bir safsızlık faktörünün varlığı durumunda bir elektronu bir banttan diğerine uyaracak enerji miktarı, saf maddenin bantları arasındaki enerji farkından daha küçük olduğundan, yalıtkanlardan farklı olarak yarı iletkenlerde düzenli sıcaklıklarda iletkenliği ölçmenin mümkün olabileceğini bildirmişlerdir. Bu varsayımlarından ek olarak, serbest elektronların dağılım fonksiyonundaki değişimini hem termal titreşimlere hem de uygulanan bir elektrik alanın etkisine bağlı olması açısından hesaplamışlardır. İletkenliği hesaplamak için klasik yöntemler ve kuantum mekaniği yöntemleri kullanıldığında, ilkinin sonucunun ortalama serbest yol için herhangi bir veri vermediğini ve kuantum yönteminin ise, ortalama serbest yolun  $1/T$  ile orantılı olacak şekilde Debye sıcaklık kriteriyle değiştiğini öne sürerek klasik yoldan ayrıldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca kuantum yönteminin hesaplamalarda kullanmak üzere türettikleri bazı formüller dikkate alındığında klasik yöntemle çelişmediğini ileri sürmüşlerdir. Bunun yanı sıra, klasik yöntemin, safsızlık içeren veya içermeyen veya iletkenliği iç kuvvetlerden kaynaklanan veya kaynaklanmayan bütün yarı iletkenler için geçerli olduğu, kuantum yönteminin ise yalnızca iletkenliği içsel olan maddeler için geçerli olduğu sonucuna varmışlardır.  $Cu_2O$  üzerindeki teorilerini test etmek için Hall etkisi yaklaşımını kullanmışlar ve “iletkenlik” ve “Hall etkisi katsayısı” için modifiye ettikleri denklemleri önererek sonuçların deneylerle uyumlu olduğunu öne sürmüşlerdir. Son olarak, yarı iletkenlerdeki akım akış mekanizmasının safsızlıklara bağlı olduğu ve içsel olmadığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca serbest elektronların sayısının rastgele olmadığını ve bunların bir kafes atomlarındaki enerji seviyeleri tarafından kontrol edildiğini öne sürmüşlerdir [12].

Mott, kristal doğrultucularla ilgili çağının çeşitli çalışmalarını karşılaştırmış ve doğrultma yönünü belirlemek için yeni bir yaklaşım önermiştir. Mott, daha önceki çalışmalarda doğrultucu kontaklarındaki akım iletim mekanizmasının doğru olduğunu ancak yönünün tamamen ters yönde olduğunu iddia etmektedir. Ayrıca Mott, metalden yarı iletkene elektron akışı için farklı olarak metal ile yarı iletken arasındaki potansiyel engelin üstesinden gelmek için metalden yarı iletkene tünelleme yapmak yerine termal olarak uyarılmadan etkilendiğini öne süren bir yaklaşımda bulunmuştur [13].

İlgili referanslarda belirtildiği gibi, birçok bilim insanının çalışmaları bu gelişmeleri takip etmiştir. Bu gelişmeler, noktasal temaslı transistörün icadı, ardından p-n eklemi

ve çift kutuplu transistörün üretilmesi; tristörün yapımı; eklemli iki kutuplu hızlı transistörün üretimi; yüksek katkılı p-n eklemelerinde negatif direnç karakteristiğinin gözlemlenmesi; Si üzerine termal olarak SiO<sub>2</sub>'nin büyütülmesiyle metal-oksit-yarıiletken alan etkili transistör (MOSFET) üretimi; ilk yarı iletken lazerin yapımı; modern hetero yapıdaki lazerlerin temellerinin atılması; Gunn diyodu yapımı; metal-yarıiletken alan etkili transistör'ün (MESFET) keşfi, geçici olmayan belleğin (NVSM) icadı; sinyalleri dijitalleştiren yük bağlaşımlı cihaz (CCD) yapımı; rezonans tünelleme diyotunun (RTD) yapımı ve modülasyon katkılı alan etkili transistörün (MODFET) geliştirilmesi süreçleri olarak sıralanabilmektedir [8,14].

MS kontakların ilk gelişiminden itibaren yapılan araştırmalara sıklıkla konu olan bakır oksit temelli metal-oksit-metal (MOM) yapısı bir başka çalışmada dirençli rasgele erişimli bellek (ReRAM), MOM yapısına uygun ve anahtarlama sürecinde belirleyici olan bir elektro-şekillendirme voltajının ( $V_F$ ) uygulanmasıyla başlatılan ve dirençte büyük bir değişikliğe neden olan dirençli anahtarlama hususunda ele alınmıştır. Yazarlar bu çalışmada Si alttaş üzerine arka kontak olarak ince film bakır elektrodu yerleştirmişlerdir. Daha sonra bu elektrodun üzerine ayrı ayrı Cu<sub>2</sub>O ve CuO (bakır(II)-oksit) tabanlı ince film katmanların biriktirilmesinden sonra oksit yüzeye üst kontak olarak termal buharlaştırma tekniği ile Ti, Ag, Au ve Pd gibi metalleri biriktirip üst elektrodu oluşturmuş ve oluşturulan bu yapı ile ReRAM'lerde dirençli anahtarlama özelliklerini ve akım-voltaj karakteristiklerini incelemiştir. İnce film biriktirilmesi için RF-magnetron püskürtme yöntemi, yapısal inceleme için bakış açısı X-ışını kırınımı (GAXRD) metodu, bileşim analizleri için x-ışını fotoelektron spektrometresi (XPS), ince filmin optik özellikleri için spektroskopik elipsometri ve ince filmin yapısal görüntüleri için AFM kullanmışlardır. AFM analizi sonucu araştırmacılar, saf argon gazı altında Cu<sub>2</sub>O biriktirilirken yüzeydeki oksijen konsantrasyonu azlığına ve yüzeyde bulunan ekstra atomların yüzey atomlarına kıyasla yüksek enerjisi nedeniyle sebep olduğu hareketlilik nedeniyle daha pürüzsüz bir yüzeye sahip olduğunu gözlemlerken; ortamdaki oksijen konsantrasyonunun arttırılmasıyla ortaya çıkan CuO'dan kaynaklı azalan hareketlilik nedeniyle yüzey pürüz miktarının arttığı ancak yüzeyin yataydaki genişliğinin azaldığını gözlemlemiştir. Ayrıca arttırılan oksijen konsantrasyonu ile oksijenin etkisine bir nevi denetim getiren argon konsantrasyonunun azalması ile tepkimelerin arttığı, püskürtme veriminin düştüğü ve



film kalınlığının azaldığını gözlemlenmişlerdir. Bunlara ek olarak, film kalınlığının, anahtarlama parametrelerini etkilese dahi dirençli anahtarlama üzerindeki etkisinin bulunmadığından bahsetmişlerdir. I-V karakteristiklerini incelediklerinde, alt elektrot metali Cu'nun Cu<sub>2</sub>O ile birleşim bölgesinde iletimin lineer ve simetrik davranış sergileyip omik kontak oluşturduğunu ve yine Cu'nun CuO ile birleşim bölgesinde Schottky (doğrultucu) kontak oluşturduğunu gözlemlenmiş ve bunun, metalin (Cu) ve p-tipi yarıiletken katmanın (Cu<sub>2</sub>O ve CuO) iş fonksiyonlarına göre Schottky kontak teorisine uygunluğunu belirtmişlerdir. Cu<sub>2</sub>O ve üst elektrodunda Au veya Pd bulunan kombinasyonlarının birleşiminde ortaya çıkan omik davranıştan sapma eğilimini ise yarıiletken yüzeyi ve üst metal kontak arasındaki arayüzey etkileşimlerinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Bunu takiben, iş fonksiyonu düşük olan Ti ve Ag metalleri içeren yapı kombinasyonlarının Schottky modeline göre ara temasta bir doğrultucu bariyer oluşturması beklenmekte iken bu tip metallerin oksijen varlığında kararlı bir oksit oluşturma eğiliminde olduğunu ve Cu<sub>2</sub>O'nun CuO'ya daha kolay indirgenmesi ile temas bölgesinde benzer ancak farklı bir bariyer oluşumun varlığının gözlemlendiğini ve bu yapılarda iletimin beklenen aksine lineer özellik gösterdiğini öne sürmüşlerdir. CuO'nun bahsi geçen tüm malzeme (Ti, Ag, Au, Pd üst kontaklar ve Cu alt kontak) kombinasyonunda hep Schottky kontak oluşumuna sebep olan doğrultucu iletim davranışı sergilemesini Schottky kontak modeline uyum ile açıklamışlardır. Genel olarak omik kontak özelliği sergileyen tüm Cu<sub>2</sub>O tabanlı yapıların, tek kutuplu dirençli anahtarlama davranışı gösterirken, istisnasız tüm kontaklarda Schottky kontak oluşturan CuO için bu iletim davranışının bulunmadığı belirtmişlerdir. Dolayısıyla dirençli anahtarlama davranışı için hem alt hem de üst kontakların omik kontak oluşumu durumunda söz konusu olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca, V<sub>F</sub>'nin, Cu<sub>2</sub>O içeren yapılarda arayüzeyde katkılama atomu olarak iş fonksiyonu düşük metal kullanımının dirençli anahtarlama da daha düşük voltaj aralığında çalışmaya olanak sağladığını göstermişlerdir. Ayrıca düşük sıcaklıklardaki düşük dirençli anahtarlama sürecinde (LRS) Cu<sub>2</sub>O'da iletim lineer ve omik özellik gösterirken yüksek dirençli anahtarlama sürecinde (HRS) yarıiletken davranışı göstermesinin çoklu akım mekanizmalarına bağlı olduğunu bildirmişlerdir. Metal-Cu<sub>2</sub>O-metal bellek hücrelerindeki dirençli anahtarlamanın bakır iyonlarından oluşan elektriksel ipliksi filamentlerin birleşip kopması durumlarından kaynaklandığını öne sürmüşler ve sonuç olarak anahtarlama parametrelerinin, elektrot malzemesinin iş

fonksiyonu ve metal-oksit temasının doğası ile ilişkili olduğunu gözlemlemişlerdir [15].

Bir başka çalışmada araştırmacılar, Ag alt elektrotu, iki adet PVA tabakası arasına GO (grafen-oksit) katmanı ve Ag üst elektrotu kullanarak MIS tipi bir hetero yapı oluşturmuşlardır. Bu yapıdaki C-V, C-F,  $G/\omega$ -V,  $G/\omega$ -F eğrilerinin analizi ile MIS yapıda oluşan terslenim, tüketim ve birikim varlığını doğrulamışlardır. Bu sayede üretilen yapının bir Schottky engel diyotu davranışı sergilediğini belirtmişlerdir. Yazarlar bu çalışmada yalıtım tabakasına ikinci bir ek katman olarak, grafenin aksine neredeyse her tür alttaşa uygulanabilen grafen-oksiti seçmelerinin sebebini, GO'nun grafene göre daha maliyetsiz oluşuna, üretim kolaylığına ve GO'nun cihaz kararlılığını artırma ihtimaline bağlamışlardır. Arayüzey durumları ( $N_{ss}$ ) hesapları için Hill-Coleman metodu kullanmış olup frekans artışıyla ters orantılı bir kapasitans değişimi gözlemlemiş ve kısa devre direncinin uygulanan öngerilim ve frekansa bağlı karakteristiğini incelemişlerdir.  $N_{ss}$  ve seri direncin ( $R_s$ ) cihaz performansı üzerinde oldukça etkili olduğunu, ara katman kullanımı ile ideal MIS yapısından sapmalara sahip iletim karakteristiğini ve negatif kapasitans etkisini gözlemlemişlerdir. Ayrıca ürettikleri numunenin Fe-SEM (alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu) analizi ile yapısal görüntüsünü incelediklerinde hem arayüzey durumlarına sebep olabilecek bazı tuzakları hem de hetero-katmanlı yapının iletim ve blokajını da içeren fiziksel çıktılarını vurgulamışlardır [16].

Bir çalışma grubu, 1.5 A.M.'lik foton enerji aralığından yalnızca yerkabuğunda değil su altında da yararlanabilmek için su altı fotovoltaik yapılarının kullanımı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Hazırladıkları cam alttaş ile üretime başlayıp üzerine  $TiO_2$ , Pt, kaplanması, gümüş iletim çizgilerinin basılması, elektrod deliklerinin açılması, çeşitli tavlama ve yıkama, bekletme ve reçinemsiz malzeme ile kapsülleme gibi fiziksel ve kimyasal işlemleri gerçekleştirmişlerdir. Bu süreç içinde duyarlılık özelliği Z907 hidrofobik boya ile geniş bant aralıklarına çıkarmaya çalıştıkları DSSC'leri (boyaya duyarlı güneş hücresi) denemişlerdir. Bunun için güneş simülatörünün ışık çıkışını su altında belli derinliklerde bulunan yapı üzerine düşürmüş ve 0'dan 20cm'ye kadar derinlik değişimine göre maksimum güç yoğunluğundaki düşüm miktarını, maksimum akımı, güç dönüştürme verimliliğini (PCE), açık devre voltajını ve dolum faktörü gibi

değerleri gözlemlemiştir. Ayrıca bu yapının karakteristiklerini mono-Si, poli-Si ve a-Si'den yapılan güneş pilleriyle karşılaştırmışlardır. Bu analiz sonucunda yazarlar ürettikleri DSSC yapısının 20 cm derinlikle sadece % 40,68 oranında bir güç düşümü ile monokristal ve polikristal silikon bazlı güneş pillerine kıyasla çok daha az bir güç düşümüne uğrayıp PCE açısından % 42,02 düşüş sergileyen a-Si bazlı pillere kıyasla az da olsa daha verimli olduğunu tespit etmişlerdir. Bu tespitlerini, deniz altında daha çok mavi spektrum bileşenlerinin bulunması ile geniş bant aralıklı Z907 boyanın, emiliminin görülebilir bölgenin üzerinde yoğunlaşmasından ötürü dağınık, düşük, yansıyan ışıkların altında daha yüksek güç dönüşüm verimliliği sağlamasına bağlamışlardır [17].

### **1.1. MS KONTAKLARIN PN EKLEMLERİNE ÜSTÜNLÜKLERİ**

Hem metal hem de yarıiletken bileşenleri olan MS yapıların, çoğunluk taşıyıcı yapılar olmaları nedeniyle bu bileşenler arası kontakta iş fonksiyonu farklılığıyla bükülen iletim bantlarının cihazın iletim seçiciliğini değiştirmesinden kaynaklı yüksek frekanslarda hızlı anahtarlama ve düşük öngerilimleme olanaklarıyla da kontaklar arasında çok daha iyi bariyerler oluşturma etkinlikleri bilinmektedir [8,18].

P-N eklemleri, depolanan fazla azınlık yükünün eklem bölgesinden uzaklaştırılması gerekliliği nedeniyle ileri polarizasyondan ters polarizasyona geçiş sırasında depolama süresi ile sınırlandırılmıştır [19]. Dolayısıyla bu depolama süresi, P-N bağlantılarındaki anahtarlama hızında sınırlayıcı bir faktördür. Schottky diyotlar ise tek kutuplu cihazlar olduğundan hızlı anahtarlamanın üstesinden daha iyi gelebilmektedirler.

Dijital devrelerdeki PN eklemlerinden oluşan transistörlerdeki doyum akımını sınırlandırmak için kullanılan Schottky diyotun beyz-kollektör arası bağlanması da transistörde oluşacak bu yük birikiminin dolayısıyla gecikmeli anahtarlamanın önüne geçmek için oluşturulmuş bir çözüm örneğidir [20-21].

SBD'lerin P-N eklemlerine göre daha etkin olmasının yanı sıra kendi aralarında da çeşitli hız ayarlamaları ve farklılıkları bulunmaktadır. Bu durumla ilgili çalışmalardan

birinde araştırmacılar, üç anotlu ve düzlemsel geometrili SBD'leri karşılaştırmış ve üç anotlu SBD'nin anahtarlama mekanizmasının düzlemsel olandan daha hızlı olduğunu gözlemlenmişlerdir [22].

İdeallik faktörü ( $n$ ), bir diyot davranışının ideal üstel akım-gerilim ilişkisine ne kadar yakınsak veya ıraksak olduğunu gösterir. Bu katsayı “1” değerindeyken idealdir ve Schottky diyotlarının farklı tasarım varyasyonlarıyla bu değere yaklaşılabilir, bu da neredeyse ideal bir voltaj-akım üstel ilişkisine sahip oldukları anlamına gelir. İlgili çalışmalarından birinde araştırmacılar, altı adet elmas SBD'yi yüksek güçlü frekans çoklayıcı tasarımındaki potansiyel önemini göstermek için ele aldılar ve üretilen SBD'lerin ideallik faktörlerinin, çalışmalarında verdikleri I-V grafiğinde neredeyse “1” değerine ulaştığını göstermişlerdir [23].

Bir MS türü olarak SBD'lerin bir diğer avantajı da tasarımlarında metal parça bulundurmaları nedeniyle  $R_S$ 'i düşürmeleridir. Bu özellik, iletken fazdayken güç kaybının azaltılmasına olanak tanıyacağından birçok uygulamada fayda sağlayabilir. Ayrıca geliştirilen teknikler veya bunların farklı kombinasyonları ile  $R_S$  etkisi ortadan kaldırılabilmektedir. Çalışmalarda  $R_S$  her zaman doğrudan  $R_S$  olarak belirtilmeyebilir ve bazen spesifik direnç ( $R_{ON, SP}$ ) de dahil olmak üzere çeşitli adlarla ifade edilip cihazın genel direnç davranışının bir parçasını teşkil edebilir.

Bir çalışmada araştırmacılar, GaN tabanlı yanal SBD'ler için anot-katot mesafeleri (LAC) 5  $\mu$ m'den 25  $\mu$ m'ye kadar değişen SBD'leri karşılaştırmışlar ve LAC = 15  $\mu$ m değeri için üretilen cihazın genel çalışma koşulları üzerinde iyi bir dengeye sahip olduğunu gösteren düşük  $R_{ON}$  değerıyla, sundukları ( $R_{ON, SP}$ ) – kırılma gerilimi ( $V_{BR}$ ) grafiğindeki GaN limitine yakın bir noktaya erişilebileceğini göstermişlerdir. Ayrıca elde ettikleri en yüksek  $V_{BR}$  değerine ise kırınımdan önceki maksimum güç tüketimine karşılık geldiğinden, BFOM'a göre iyi bir dayanıklılık sağlayacak kadar yüksek olduğunu vurgulamışlardır [24].

Ancak SBD'ler aslında yukarıda bahsedilen iyi özelliklerinin yanı sıra zayıf bir karakteristik olarak düşük  $V_{BR}$ 'leri ile de bilinirler. Bu nedenle, kırınımdan önce P-N diyotları kadar yüksek ters öngerilim voltajlarına dayanamazlar. Bu bir dezavantaj gibi

görünse de, daha düşük bir arıza voltajının istendiği uygulamalarda bir avantaj olabilmekte olup diyot bu kriterlere göre tasarlanabilmektedir.

Ayrıca, son çalışmalardan birinde araştırmacılar, mevcut tasarıma bir ara katman eklenerek kırınım noktasının, ( $R_{ON}-V_{BR}$ ) grafiğinde SBD'lerini karşılaştırdıkları farklı çalışmalarda üretilen MESFET, MOSFET, JFET (birleşim yüzeyli alan etkili transistör) gibi yapılara kıyasla elmas, GaN ve Si sınırına daha yakın bir yere kadar artırılabilceğini de göstermiştir [25].

Bir diğer çalışmada ise araştırmacılar, 1  $\mu\text{m}$  şerit genişliğine sahip oluklu yapıdaki bir Schottky bariyer diyotu incelediğinde, daha büyük şerit genişliği değerlerine sahip diğer SBD'lere kıyasla, kırılma geriliminin şerit genişliğinin azalma etkisine bağımlı olarak arttığını da gözlemlemişlerdir [26].

Beş bölümden oluşan bu tezin birinci bölümü seçilmiş örneklerle MS kontakların kısa tarihçesi ve PN bağlantılarına üstünlüklerini anlatırken birçok verinin aslında başlangıç noktası olarak şu anki teknolojide basit gözükse ancak zamanın farklı bakır oksitli yapılarının incelenmesiyle ortaya çıktığını da göstermektedir. Ayrıca bu çalışmada, Schottky ve Mott, Bardeen ve Wilson'ın bu alanda yaptığı uyarlamalar ile enerji bant aralıklarına getirdikleri bakış açısı ile öne çıkan ilgili alandaki diğer çalışmaların MS kontak alanındaki değişkenleri anlamaya ve geliştirmeye katkısı referanslarda ayrıntılı olarak verilmiştir.

İkinci bölümde MS ve MIS yapılar konusunda MS kontaklar, MIS kapasitörü, katılarda temel bant teorisi, dielektrik polarizasyon, dielektrik sabitleri, dielektrik kayıpları ve AC iletkenlik hakkında genel bilgiler ilgili literatür ışığında aktarılmıştır.

Üçüncü bölümde materyel metod başlığı altında çalışmada kullanılan malzemelerden bahsedilmiş, diyot üretim süreci detaylı görsellerle desteklenip açıklanmış ve kullanılan ölçüm sistemleri yine detaylı şekilde tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde araştırma bulguları literatür eşliğinde açıklanmıştır. Son olarak beşinci bölüm olan sonuç bölümünde ise çalışmanın alana katkısı ve gelecekte bu çalışma ışığında yapılabilecekler özet halinde verilmiştir.

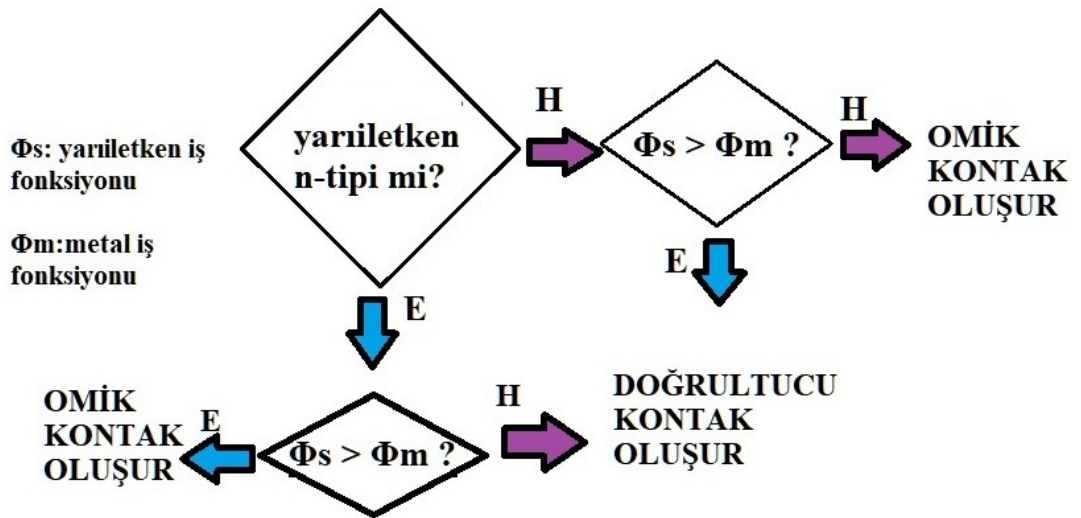
## BÖLÜM 2

### TEORİK TEMELLER

#### 2.1. METAL-YARIİLETKEN YAPILAR

##### 2.1.1. Metal-Yarıiletken Kontak Türleri

MS kontaklarda kullanılan yarıiletken malzemenin kendisine ilave edilen katkı atomunun periyodik tablo gurubundaki değerlik atom numarasına göre verici ya da alıcı tipteki davranışı sonucu yarıiletkendeki azınlık ya da çoğunluk taşıyıcı yüklerinin n-tipi/p-tipi malzeme tipin belirlenmesine neden olurken bu malzemelerin metallere sıkı kontak yapması durumunda oluşacak bariyerlerin durumuna göre omik ve doğrultucu olarak da kategorize edilebilir. Verimli bir diyot ya da doğrultucu özellik taşıyan herhangi bir MS kontak bileşeni üretimi, temelde iş fonksiyonları nedeniyle bükülen bantların uyum içinde olduğu koşulda mümkün olabilmektedir ve bu nedenle bir SBD diyot oluştururken gerekli kriter Şekil 2.1’de verilmiştir [27].



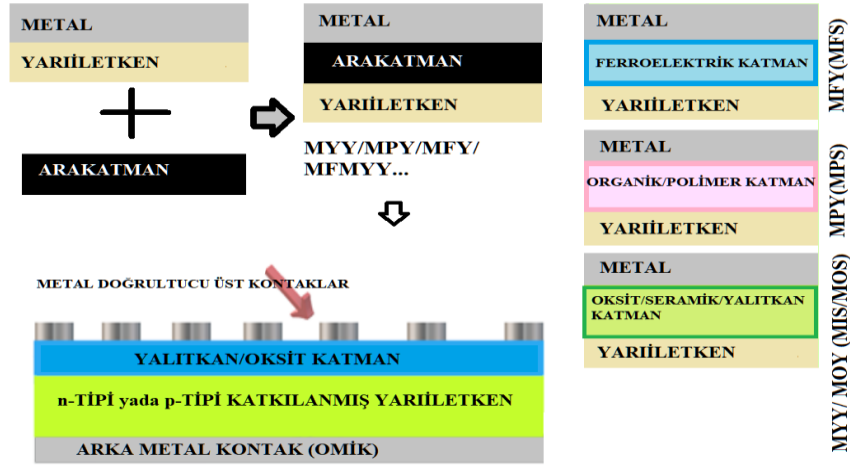
Şekil 2.1. Malzeme seçim kriteri olarak iş fonksiyonu karşılaştırması.

Bu şekildeki kontrol değişkenine ulaşmamızı sağlayan metal ve yarıiletken parametre değişimleri, benzer çalışmalarda ve temel kaynaklarda da bulunabilmektedir [8,19]. Ancak bir MS kontağı oluştururken hesaplamalardan farklı olarak pratik sonuçlarda bu iş fonksiyonları arasındaki potansiyel farkın kullanılan metalden bağımsız olarak beklenenden az veya çok olduğu yüzey kaynaklı durumlar da söz konusu olabilir [28]. Bardeen bu durumu metal ile yarıiletken arasında oluşan yüzey yük dağılımının varlığı ile açıklamış ve bu yük dağılımının ortaya çıkan potansiyel farkını değiştiren bir etkileşim olarak çift katmanlı yüzey yükü tanımıyla açıklamıştır [29]. Dolayısıyla doğrultma davranışını bir kontak için ele alırken tek başına iş fonksiyonları yeterli olmayıp bu sıkı kontağı oluşturan parçaların temas yüzeyinin yük dağılımı ve bu dağılımın şekillenmesini değiştirecek kristal yönelimi, yüzey oluşturma yöntemi, sıcaklık ve benzeri birçok değişkeni de dikkate almak gerekmektedir.

## **2.2. METAL/YALITKAN/YARIİLETKEN YAPILAR**

Önceki bölümde detaylı şekilde cihaz performansındaki iyileştirmelere katkısı bahsedilen MS yapıların, metal ve yarıiletken arayüzündeki doğrudan bir temasın varlığı, endüktif bileşenler, eddy akımları nedeniyle gürültülü bir çıkış sinyalinde ideallikten sapmalara ve doğrultma oranı (RR), bariyer yüksekliği (BH) gibi parametrelerde yüzey durumları etkisi nedeniyle düşük kazanç değerleri gibi cihaz performans kayıplarına sebep olabilmektedir. Bu zorluklara bir yanıt olarak, MS kontaklara yapılacak ek ara katmanlar, arayüz durumlarının etkisini azaltarak ve genel cihaz performansını artırarak güçlü ve stratejik bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Uygun ara katman malzemelerinin dikkatli seçimi ve kullanılan katman kalınlıklarının hassas kontrolü, araştırmacıların temel cihaz parametrelerini belirli performans hedeflerini karşılayacak şekilde uyarlamasına olanak tanımaktadır.

MS kontak yapıları bir yalıtkan ara katman, polimer ya da ferroelektrik bir katman ile birlikte kullanıldığında, MS yapı tipleri Şekil 2.2’de gösterildiği gibi Metal/Yalıtkan/Yarıiletken (MIS), Metal/Polimer/Yarıiletken (MPS) ya da Metal/Ferroelektrik/Yarıiletken (MFS)’e dönüşmektedir.



Şekil 2.2. Arayüzey eklenmiş MS yapılarının gösterimi.

Örneğin bir çalışmada araştırmacılar, kapton ve kağıt alt tabaka üzerine tüm kontaklar için mürekkep püskürtmeli baskı gibi yeni bir teknik kullanarak üç farklı SBD üretmişlerdir. Araştırmacılar, yazdırılabilir ve giyilebilir elektronikler için yüksek esneklik özelliklerine ve malzeme bükülmesine göre tersinir yapı davranışına sahip olmasının yanı sıra, düşük maliyetli bir üretim yöntemi için uygun bir alttaş olarak özellikle kapton'u seçmişlerdir. Yarı iletken malzeme olarak karbon ağını (CNT) kullanırken hem omik hem de doğrultucu metal kontakları elde etmek için gümüş, grafen ve PEDOT:PSS kombinasyonlarını kullanmışlardır. Schottky bariyer yüksekliklerinin kullanılan metalden bağımsız oluşunu ise, MS kontak arayüzünde Schottky limiti yerine Bardeen limitinin etkin olduğu arayüzey durumlarından kaynaklı Fermi seviyesi ( $E_F$ ) sabitlenmesinden kaynaklandığını gözlemlemişlerdir. CNT'nin kesin bir Richardson sabitine ( $A^*$ ) sahip olmayan karmaşık bir yapıya sahip olmasından dolayı termoiyonik emisyon yaklaşımı bu malzemeyi açıklamakta yeterli olmayacağından Schottky bariyer yüksekliği (SBH) ile tavlama sıcaklığı (TA) arasında, artan TA'nın SBH azalmasından sorumlu olduğunu ortaya koyan başka bir ilişkiyi önermişlerdir [30].

Önceki çalışmada da gözlemlendiği gibi, MS yapıları için gerçekçi perspektif zaten doğal bir ara katman veya ara katman varlığına işaret eden bir yapı davranışını içermektedir. Bu durum Bardeen'in yaklaşımını ön plana çıkarmaktadır çünkü bu yapılar sadece MS kontaklar olarak üretilmiş olsalar dahi metal ve yarıiletken kontaklar arasında yadsınamaz bir yüzey etkileşimi bulunmaktadır. Bununla birlikte



bu MS kontaklar, performans üzerinde belirgin bir etkiye sahip olan özellikle MIS tipinde üretilmiş yapılarla karşılaştırıldıklarında, bunların MIS yapılarına kıyasla arayüz durumları indirgenmesinde göz ardı edilebilecek kadar küçük bir etkiye sahip oldukları hatta tersine bu net ek arayüze sahip olmayışları ile cihaz performans problemlerine konu oldukları söylenebilmektedir.

Örneğin özel olarak ek ara katman kullanan çalışmalardan birinde araştırmacılar, süper iletken kübitlerin performansının, kuantum bilgisinin ömrünü daha uzun tutabilmek için kusurlara büyük ölçüde bağımlı olduğundan yalıtım katmanı kalınlığının hassas kontrolünü sağlayabilmek, biriktirme parametrelerini ayarlamak ve metaller ile yalıtkan arasındaki arayüzlerdeki kusurların yanı sıra yalıtkanın hacmi boyunca olabilecek kusurları da en aza indirmeyi sağlamak için termal oksidasyon ile biriktirme tekniğini atomik katman biriktirme (ALD) tekniği ile değiştirmeyi amaçlamışlardır. Sonuç olarak  $Al_2O_3$  ve  $Al_2O_3+SiO_2$  ara katmanlı MIS kapasitörler üreterek kontaklar arasında kusurlardan arınmış bir arayüzey için halen ileri çalışma adımlarının gerekliliği sonucuna ulaşmışlardır. Ancak yine de bu yöntemin, süper iletken MIM kapasitörlerinin üretiminde başarılı olacağı ve kuantum hesaplamayla ilgili alanlar için umut verici olacağı sonucuna varmışlardır [31].

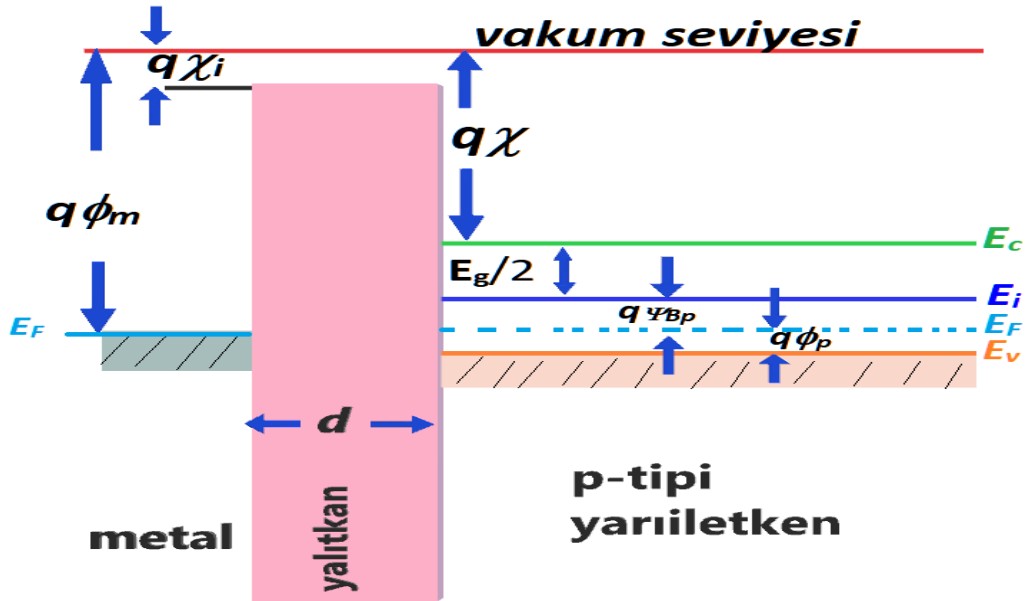
Bir başka ara katmanlı çalışmada araştırmacılar, MS temas noktalarına organik ve inorganik ara katmanların eklenmesini karşılaştırmışlardır. MIS tipi SBD'nin, MPS tipi SBD'ye göre daha düşük bir idealite faktörüne ve daha yüksek doğrultma oranına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir [32].

Literatür çalışmaları göstermektedir ki ara katman ilaveli MIS/MPS/MOS yapıların incelemesi ve geliştirilmesi; üretim süreci, kullanılan elektrodlardaki metallerin iş fonksiyonları, elektrodları arası yalın yarıiletkenin ya da çok eklemli yapının katkılanma oranı, sıcaklık, frekans, besleme voltajı, kullanılan katman sayısı ve çeşidi ve kalınlığı, ortam atmosferine duyarlılık, indirgenme tepkimelerine yatkınlık ve arayüze durumları gibi parametrelerin yansırı aydınlatmaya şiddetine bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir [33].

### 2.3. İDEAL MIS KAPASİTÖR

Üretilen MIS yapının idealden saptığı noktalarda ürettiği sonuçları anlamak için ideal kabul edilen MIS kapasitörün genel kabul kriterlerine başvurmak gerekmektedir. Kontak oluşumu kriterlerinden kapasitans değerlerinin belirlenmesine kadar birçok noktada karşılaştırma parametresi olarak ideal yapının tanımlanması gerekmektedir. İdeal bir MIS kapasitörü tanımlanırken ilk kabul, herhangi bir arayüz tuzağı veya herhangi bir oksit yükünün bulunmayışı ve var olabilecek yüklerin sadece yarıiletkenin içindeki veya herhangi bir öngerilim koşulu altında yapıda bulunabilen yüklerin yalnızca yarı iletkendeki ve yalıtkanın hemen bitişiğindeki metal yüzeyde bulunan yarıiletken ile eşit ancak zıt işaretli yükler olabileceği durumları göz önüne alınması gerektiğidir. Dolayısıyla yalıtkan-yarıiletken yüzeyinde de yük bulunmaması gerekmektedir. Yine bu ideal yapılar için ikinci bir kabul ise yalıtkanın direncinin DC beslem esnasında sonsuz olması ve yalıtkan boyunca DC beslemde ne yarıiletkenden ne de metalden herhangi bir taşıyıcı geçişi olmaması gerektiğidir. [34].

İdeal MIS yapı için enerji bant durumları metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları farkı sıfır olması kabulü altında p-tipi ara katmanlı bir MIS yapı için Şekil 2.3'te verilmiştir.



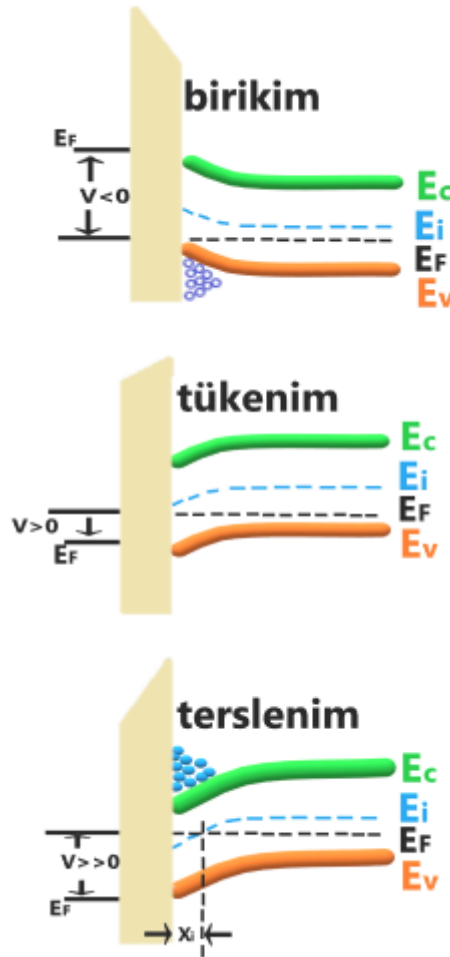
Şekil 2.3. Yarıiletkenin p-tipi seçildiği bir ideal MIS kapasitörün ( $V=0$ ) denge durumundaki enerji-bant diyagramı [34].

Burada  $\chi$ , yarıiletkenin iletim bandı ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkı olarak *yarıiletkenin* elektron ilgisi;  $\chi_i$  yalıtkanın elektron ilgisi;  $E_g$ , yasak enerji aralığı;  $E_c$ , iletim bandı alt sınırı;  $E_v$ , valans (değerlik) bant üst sınırı;  $E_i$ , özgün Fermi enerji seviyesi  $\psi_{Bp}$  ve  $\phi_p$  ise p-tipi yarıiletkende orta aralık ve bant sınırlarına göre Fermi potansiyeli olarak adlandırılmaktadır. Şekildeki enerji konumları ve ideal MIS yapı kabullerinden yararlanılarak p-tipi bir yarıiletkenden ile oluşturulmuş ideal MIS yapının kaynak voltajı sıfır iken metal-yarıiletken iş fonksiyon farkı ( $\phi_{ms}=\phi_m-\phi_s$ ) bağıntısı Eşitlik 2.1 ile verilmiştir [34].

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left( x + \frac{E_g}{2q} + \psi_{Bp} \right) = 0 \quad (2.1)$$

Kabüle dayalı şekilde görülüşü üzere uygulanan bir gerilim olmayınca metal ve yarıiletken iş fonksiyonları farkı da sıfırdır, yapıda herhangi bir yük geçişi olmaz ve hem metalin hem de yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi eşittir ve düz bant durumu oluşmaktadır. Bu MIS yapısına negatif veya pozitif voltaj uygulandığında yarıiletken yüzeyi için 3 farklı bölge karakteristiği oluşmaktadır. Bunlardan ilkinde örneğin p-tipi yarıiletken içeren bir MIS yapı için doğrultucu kontağa negatif gerilim uygulandığında yalıtkan-yarıiletken arayüzünde fazlalık pozitif yük taşıyıcılar (deşikler) indüklenmektedir. Yarıiletken yüzeyine yakın bantlar yukarı yönlü bükülmekte olup değerlik bandı Fermi seviyesine yaklaşır ancak ideal MIS/MOS yapıda uygulanan voltaj değerinden bağımsız şekilde akım akışı olmayacağından yarıiletkenin Fermi seviyesi düz bant durumunu korumaya devam eder. Ayrıca yarıiletkendeki taşıyıcı yoğunluğu da  $E_F$  ve  $E_i$  bantları arası enerji farkının üstel bir fonksiyonu olduğundan arası açılıp bükülen bu bantların artan enerji farkı nedeniyle yarıiletken-yalıtkan yüzeyinde “birikim” olarak adlandırılan duruma yani taşıyıcı yoğunluğu artmasına bir başka deyişledeşiklerin birikmesine neden olur. Eğer üst metal kontağa sıfırdan farklı ufak bir pozitif beslem uygulanırsa yarıiletken tarafındaki bantlar bu kez de aşağı yönlü bükülür ve  $(E_i-E_F)$  farkı azalacağındandeşiklerin birikim bölgesinden dağılması durumu oluşur yani “tüketim” durumu ortaya çıkar. Son olarak eğer yapıya daha da büyük bir pozitif voltaj uygulanırsa bantlar yarıiletken tarafında tüketimde olduğundan daha aşağı bir noktaya eğilir bu eğilim nedeniyle  $E_F$  ve  $E_i$ ’nin kesiştiği hatta  $E_i$  seviyesinin  $E_F$ ’nin de aşığına inmesiyle yapı artık  $(E_i-E_F)$  farkının bir üstel

fonksiyonu olarak yük dağılımını değiştireceğinden uzaklaşan deşikler yerine yarıiletken-yalıtkan arayüzünde bu kez elektronlar yoğunlaşır ve böylece yarıiletken-yalıtkan yüzeyinde azınlık taşıyıcı elektronların yoğunluğu çoğunluk taşıyıcı deşikliklerine göre fazla olacağından yüzey terslenir ve terslenim durumu oluşur. Ancak bu yarıiletken yüzeyinde yoğunlaşan elektronların miktarı az olduğundan başlangıçta bu yüzey polarite değişimi zayıf terslenime tekabül eder. Bantların aşığı yönlü bükülmesi arttıkça iletim bant sınırı seviyesine daha da yaklaşır ve elektron konsantrasyonu katkılama seviyesine ulaştığında güçlü terslenim meydana gelir. İdeal MIS/MOS kapasitörün bu bant bükülme bölgeleri p - tipi yarıiletken için Şekil 2.4'te verilmiştir.

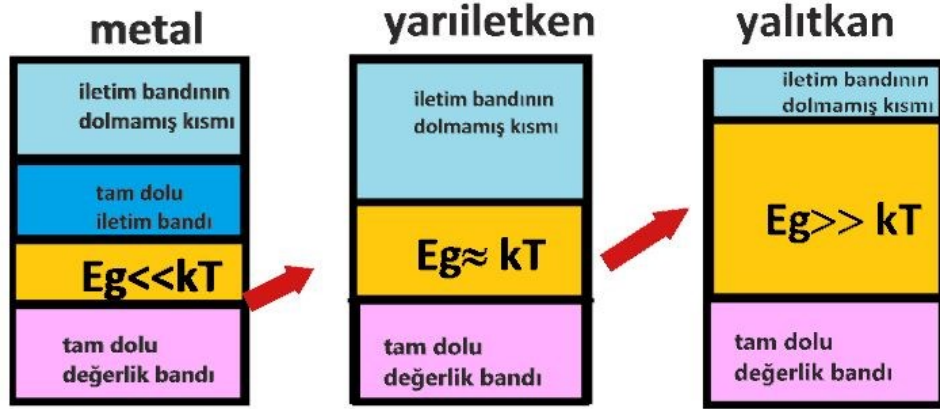


Şekil 2.4. İdeal MIS kapasitörün birikim, tükenim ve terslenim durumlarındaki bant bükülmeleri.

## 2.4. MIS YAPILARIN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ

Dielektrik malzemeler, MIS yapılarında sıklıkla deneysel ve tasarımsal alanda arayüzey mühendisliğine konu olan bir malzeme türüdür. Genel olarak ideal bir dielektrik, yalıtkan davranışı gösteren, DC akımı iletmemesi gereken ve harici elektrik alan karşısında yüzeyinde kutuplaşan yükler nedeniyle malzemede bir yük biriktirici gibi yani bir kapasite elemanı gibi davranan malzemelerdir.

Dielektriklerin, iletken ve yarıiletkenlerden katılardaki temel bant teorisi ile karakteristik olarak ayırımı Şekil 2.5'te verilmiş olup teoriye konu olan orbital-enerji seviyesi ile ilgili dalga denklemlerine bir örneği verilmiş olan birçok temel kaynaktan ulaşılabilir [35].



Şekil 2.5. Bant teorisinin kristal örgü yapısındaki farklı malzemeler için şematik gösterimi [35].

Metalden yalıtkana doğru oklar yönünde yasak bant aralığındaki artış yük geçişi ihtimalinin azalmasını anlatmaktadır. Ancak bu gösterim kristal örgü yapısı temel alınarak malzemeleri sınıflandırdığından düzensiz yapıdaki bir malzeme söz konusu olduğunda enerji bantları arası keskin ayırım, örgü düzensizlikleri nedeniyle bu bantlar arasında daha geçişken bir hal alabilmektedir. Bu durum düzensiz örgü yapısındaki bir dielektriğin çakışan bant uzantıları nedeniyle yarıiletken gibi davranması olasılığı olarak ortaya çıkmaktadır [35]. Şekil 2.5'te görüldüğü üzere kristal tipi katılarda malzeme metal ise termal uyarılmaya göre yasak bant enerji aralığı  $E_g$  çok küçük bir değer almaktadır. Bu durumda değerlik bandından iletim bandına elektron atlama

için gereken enerji küçük olurken, yalıtkan malzemede ise bu aralık termal uyarılmanın yeterli gelemeyeceği kadar büyük olur ki bu da bantlar arası geçişteki artan zorluğu ifade etmektedir.

Temel bant teorisi,  $2N$  sayıda kalın satırdan oluşan çizgili bir defter sayfasında daha küçük aralıklar ve  $N$  sayıdaki daha ince dikey çizgilerle oluşturulan bir kareli sayfaya benzetilebilir. Bu benzetmeye göre sütun çizgilerinin sık çizilmesi malzemedeki birbirine fazlasıyla yakın  $N$  sayıda izole atomdan ileri gelirken ince çizilmesi ise aynı enerji seviyesindeki bileşenlerin birbirleri ile etkileşiminin farklı enerji seviye etkileşimlerinden göreceli olarak düşük enerji gerektirmesinden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla burada çizilen  $N$  sayıda dikey çizginin satırlar üzerinde oluşturduğu kesişimlerin katı maddede bulunan atomların her bir enerji seviyesi için kendi aralarındaki etkileşimlerini ve  $2N$  sayıda satırın ise farklı enerji seviyelerini ifade ettiği varsayılabilir. Ve bu kesişimler o enerji seviyesinde bir bütünsel etki olarak ele alınabilir. Göreceli sonuca bakıldığında yatay çizgilerin gözlemlenebilir olması daha belirgin olup aynı enerji seviyesindeki etkileşimlerin tümü bir bütün satır gibi diğer bir deyişle her bir izole enerji seviyesinin dikeyle kesişimleri bütünü için tek bir enerji seviyesi sonucu gibi sisteme katkı vermektedir. Aynı yaklaşım değerlik, yasak bant ve iletim bandı ayrışması için de geçerlidir. Böylelikle örneğin birbirine çok yakın değerlik enerji seviyelerinin hepsi tek bir değerlik bandı olarak kabul edilerek iletim ve yasak enerji bandından ayrılabilen ve malzeme yük hareketleri incelenmesinde kolaylık sağlamaktadır.

İdeal dielektrik özellikleri düşünüldüğünde akla ilk gelen bu malzemelerin dayanım kriterlerinin gerek elektrik gerekse elektronik skalada hangi değişkenlerle şekilleneceğidir. Bu değişkenlerden dielektrik dayanım kırımını iki alan için de önemlidir.

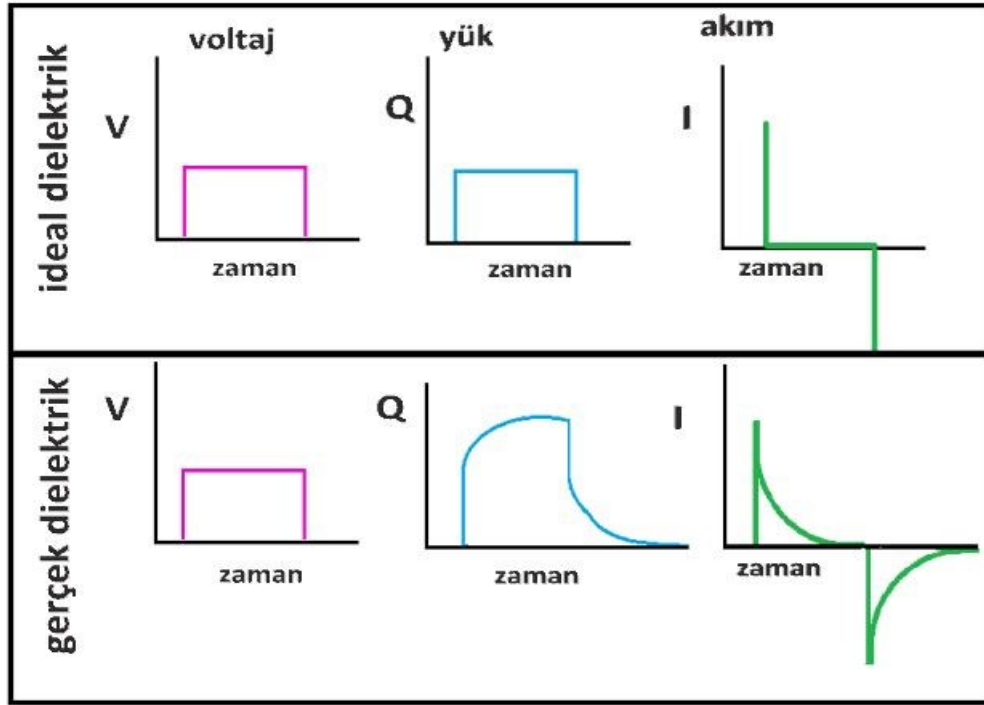
Elektronik uygulamalarda genellikle katı formu tercih edilen dielektrik malzemelerin dielektrik kırınım mukavemeti, genellikle malzemenin yoğunluğuyla birlikte artacağından katı yalıtkanlardaki dielektrik mukavemetinin, dielektrik kaybının ve dielektrik geçirgenliğin de gaz yalıtkanlarındakinden yüksek olduğu temel bir kaynaktan daha önce açıklanmıştır [36]. Yine aynı kaynak, yüzey etkileşimi kısmına atıf yapılan

Miller'ın 1993'teki çalışmasını, vakum ortamındaki yalıtkan malzemeler için ortam gazının limitli kırınım mukavemeti kaynaklı sınırlı etkileşimi sebebiyle yalıtkan bir malzemenin yükünü boşaltamayacağı ve yüzeyde biriktireceği şeklinde açıklamaktadır. Bu yüzey birikim durumu da uzay yüklerinin dielektrik malzemedeki önemini vurgulamaktadır. Miller'ın bu çalışmasında dikkat çekici bir diğer nokta ise silikonda kırınımın, malzemenin içinde üç aşamalı olarak dielektrik malzemelerden farklı gerçekleştiğini vurgulamasıdır. Son olarak bu çalışmada dielektrik sabitinin malzemeler arası seviyeli olarak kullanılması yoluyla yalıtım performansının arttırılabileceği vakum-dielektrik-elektrot eklemi ve alan etkisi altında gösterilmiştir [37].

Malzeme geometrisi dielektrik davranışını değiştirebilmektedir. Bartnikas'ın açıklamalarına göre bir yalıtıkanda dielektrik bozulma olayı kusur varlığı ile desteklenip kolaylaşır çünkü dielektriğin kalınlık ve yüzey alanı büyütüldükçe dielektrik hacmi büyüyeceğinden bu hacimde kusurlarla karşılaşma olasılığı da artacak ve dielektrik bozulma malzemede hacmin tümü ile karşılanacağından daha düşük voltajlarda meydana gelebilecektir. Tersine, ince inorganik film nokta elektrotlarda yüksek dielektrik dayanımının ortaya çıkışı da bu olasılığın azalmasıyla açıklanmıştır [36]. Dielektrik malzemelerin yalıtkanlık davranışını değiştiren bir diğer unsur da doğal safsızlıklar veya katkılamadır [38]. Dielektrik içindeki kusurlar arttıkça malzeme ideallikten uzaklaşabilmekte ancak belli durumlarda bu artan safsızlıklar malzemenin içinde kullanıldığı özel geometride malzeme davranışını farklı açılardan geliştirebilmektedir.

İdeal ve ideal olmayan gerçek dielektrik malzemelerdeki yük biriktirme, boşaltma durumlarını zaman ekseninde karşılaştıran karakteristik Şekil 2.6'da görselleştirilmiştir [38].

Şekil 2.6'da görüldüğü üzere yük biriktirme ve geri bırakma esnasında ideal dielektrik, zamanla değişen akımda darbe gibi ani cevap üretirken ideal olmayan dielektrik zamana yayılmış bir yük biriktirme ve sönümlenme cevabı üretmektedir.



Şekil 2.6. İdeal ve ideal olmayan dielektrik malzemede zamana göre yük değişimi [38].

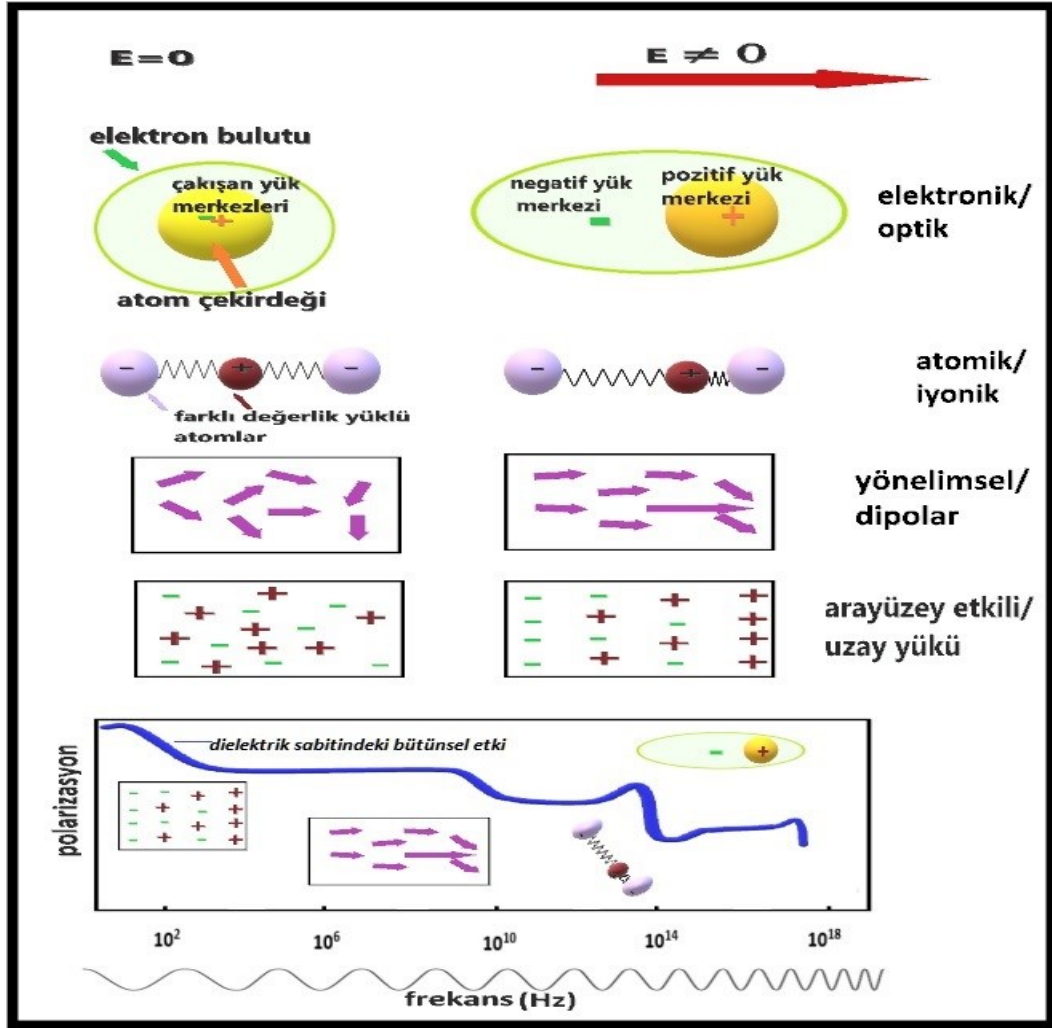
Bir dielektrik malzemenin harici bir elektrik alan altındaki davranışını incelerken malzemenin hangi frekans aralıklarında hangi kayıp ve iletim davranışıyla ilişkili oluşu, o frekans aralığında diğerlerine göre tek başına veya diğerlerine göre daha etkin olan polarizasyon mekanizmalarıyla yakından ilgilidir. Polarizasyon mekanizmalarında temel süreç, mekanizma türüne göre oluşan farklı dipol oluşumlarının moment vektörlerinin toplam etkisinin elektrik alan vektörüne göre ters yönde oluştuğunda alan etkisini azaltmak aynı yönde olduğunda ise alanın etkisini arttırmak olarak açıklanabilir. Dipolün bu hizalanmasının elbette elektrik alan ile her koşulda birebir aynı yönde olması beklenmez ancak oluşan net dipol momentine bağlı olarak alan vektörü yönünde elektrik alan şiddetiyle orantılı şekilde dipol hizalanmasına, yük merkezlerinin arasının açılmasına ve dolayısıyla yük birikim davranışına sebep olur.

Bir dielektrik malzemenin polarizasyonu elektronik/optik, yönelimsel/dipolar, atomik/iyonik ve uzay yükü/arayüzey olarak 4 kategoride sınıflandırılabilir [35]. Bir dielektrik malzemede oluşabilecek bu polarizasyon türlerinin elektrik alan uygulanmadan önce malzeme içindeki dağınık dağılımı veya atomik ölçekte üst üste binen merkezleri vb. başlangıç durumları ve alan vektörüne tabi tutulduktan sonraki



hizalanma, bağıl yer değiştirme davranışları ve dielektrik sabitinin bunlara nasıl tepki verdiği Şekil 2.7’de görselleştirilmiştir [35,38,39].

Şekil 2.7’de verildiği üzere dielektrik malzemelerde bütün polarizasyon türlerinin görülme ihtimali vardır ancak belli frekans aralıklarında bu mekanizmaların etkin olduğu aralıkta uygulanan elektrik alanın malzeme içinde gevşemesi gözlemlenebilir.



Şekil 2.7. Polarizasyon türleri ve frekansa göre etkin polarizasyon türü [35,38,39].

Spektrumdaki frekans aralığına bakıldığında elektrik alanını en hızlı takip edebilen kutuplaşma mekanizması elektronik polarizasyondur ve dolayısıyla uygulanan sinyalin malzemeye etkisinin piklerinin en zor gözlemlenmesi bu mekanizmada olur. Çünkü bu mekanizma, şayet uygulanan alanın frekansı optik frekanslardan ( $\approx 10^{15}$  Hz) düşükse gevşeme piki vermeyecektir ancak daha yüksek ise bu sefer de elektronların

hızı alan periyoduna yetişemeyecek ve pik verecektir. Benzer şekilde düşük frekanslarda en kolay gözlenen mekanizma ise arayüzey etkili polarizasyondur.

Şekil 2.7'deki frekansa bağlı polarizasyonun, dielektrik sabiti üzerindeki etkisini gösteren mavi eğri aslında ayrı ayrı gösterilmese de dielektrik sabitine katkıda bulunan bütün katkıları içermektedir ve bu nedenle devamlı bir eğri formu oluşturmuştur. Ancak belirtmek gerekir ki bu eğri, malzeme türüne, frekansa, sıcaklığa ve devreye giren polarizasyon mekanizmalarına göre her test örneği için farklı pikler verebilir ve sabit değildir ve ilgili aralık dahilindedir. Dolayısıyla incelenen örnek materyal için hangi kutuplama, iletim, kayıp vb. mekanizmalarının etkin olacağı uygulanan yapıya ve deney şartlarına göre şekilde verilen farklı frekans sınırları dahilinde değişecektir.

Örneğin bu tez çalışmasına konu olan SBD'nin ölçümleri 1 kHz-1 MHz aralığında ve normal oda koşullarında sabit sıcaklıkta yapıldığından ve  $10^5$  Hz altındaki kutuplanmalar deşarjda çözülürken ilgili referansa göre, yerel elektriksel ve kimyasal tuzak ve bariyerlere takıldığından bölgesel yük birikimlerine sebep olacağından ve gevşemeyi engelleyeceğinden ve malzemece şarj-deşarj edilen dinamik alanı makroskobik ölçekte bozduğundan veya bir dielektrik içine gömülü olması olası çeşitli rastgele dağılımlı küresel varsayılan iletkenlik merkezleri/kirlilikleri nedeniyle malzemenin içsel karmaşıklığından dolayı genel olarak Maxwell-Wagner mekanizmalarına atfedilebileceğinden, dielektrik sabitlerinde veya iletkenlik davranışında ortaya çıkan değişimlerde ilk bakışta en çok arayüzey etkili/uzay yükü polarizasyon katkısının gözlenmesi beklenebilir [39].

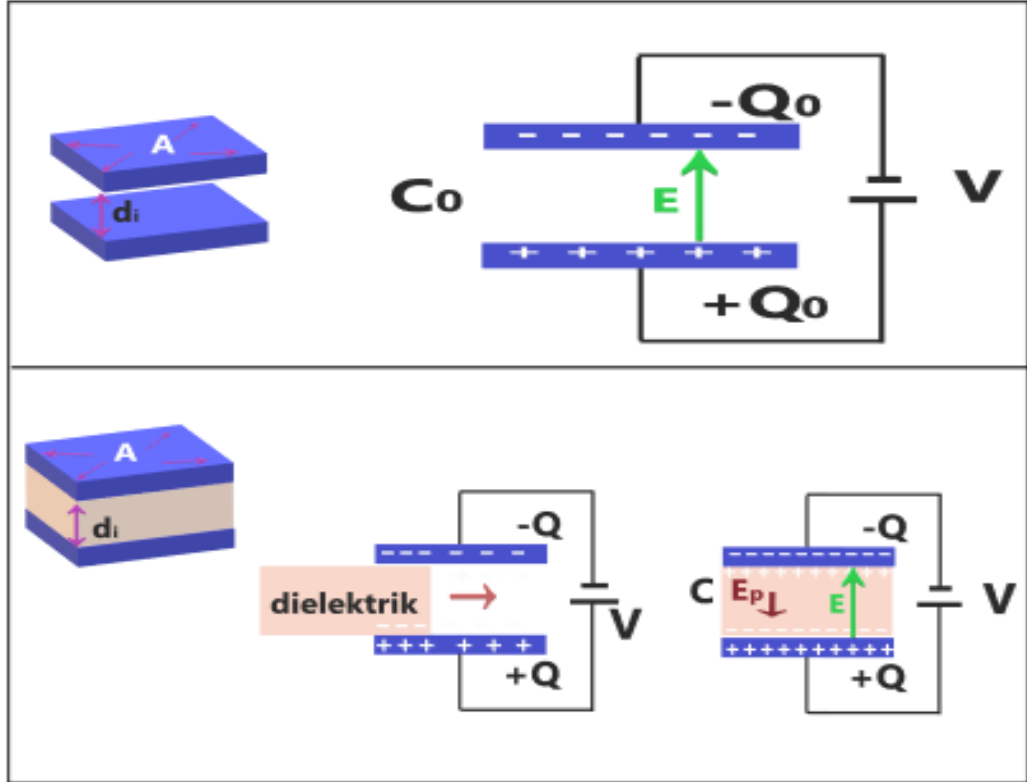
Ancak yapının kullanıldığı diğer sandviç yapısı bileşenlerinin bariyer değişimi ve ara katman dielektriğinin olası içsel moleküler dönüşümleri kaynaklı yeni dipol etkileşimleri, kendine özgü malzeme yapısı ile ele alındığında birden fazla mekanizmanın katkısı veya dolaylı etkileşim etkisi de ihtimaller dahilindedir.

Daha önce de değinildiği üzere dielektrik malzemeler yük dağılımını yüzeyinde biriktirme fonksiyonu ile bilinirler. Bu özellik onların bir kapasite elemanı olarak incelenmesine olanak tanımaktadır. Çünkü metallerdeki akımı iletme fonksiyonu görselleştirmek adına dielektriklerde alanı iletme hatta uygulanan alanı malzeme

yapısına göre büyüklük olarak bükme fonksiyonu olarak değerlendirilebilir. Dolayısıyla dielektrik sabitleri devam eden başlıklarda kapasitör davranışı ve kutuplamanın kapasitansa katkısı ile açıklanabilir.

#### 2.4.1. Dielektrik Sabiti $\epsilon'$ Ve Dielektrik Kaybı $\epsilon''$

Paralel plakalı kapasitör yaklaşımı ile dielektriksel özellikleri incelemek için dielektriksiz ve dielektrik ilaveli kapasitörün kapasite değişimi polarize yüklerin etkisini görselleştirmek için Şekil 2.8'de verilmiştir [40].



Şekil 2.8. Paralel plakalı kapasitörün dielektrik ilavesiyle kapasite değişimi [40].

Şekil 2.8'deki dielektriksiz ve plakaları arası metalden metale elektron atlamasını engelleyecek bir  $d_i$  mesafesine sahip ideal bir kapasitörün uçları bir DC kaynağa bağlanırsa, kapasitörün karşılıklı plakaları zıt yüklerle yüklenir ve kapasitör plakaları arası elektrik alan şiddeti ve potansiyel farkı sırasıyla Eşitlik 2.2 ve Eşitlik 2.3'teki gibidir. Burada  $E_0$ , Newton/Coulomb cinsinden elektrik alan şiddeti;  $V_0$ , volt cinsinden gerilim;  $d_i$ , metre cinsinden plakalar arası mesafe;  $\sigma$ , plakalardan her biri üzerindeki

birim alana düşen  $C/m^2$  cinsinden yüzey yük yoğunluğu ve  $\epsilon_0$ , boş uzayın dielektrik geçirgenliğidir ( $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  Farad/metre).

$$E_o = \frac{\sigma}{\epsilon_o} \quad (2.2)$$

$$V_o = E_o \cdot d_i \quad (2.3)$$

Plakaların arası vakum ile dolu iken, bu ara bölgede birbiriyle ya da alan vektörüyle etkileşime girecek yük olmayacağından ve ara bölgede kutuplaşmaya sebep olacak dipol yönelimi oluşmayacağından bu şartlarda elektrik alanın bu ara bölgedeki yoğunluğunun ifade eden elektrik akı yoğunluğu ( $D$ ), karşılıklı metal plakalardan her birinde birikmiş bu zıt kutuplu serbest yüzey yüklerinin yoğunluğuna bağlı şekilleneceğinden  $\sigma$ 'ya eşit değerde kabul edilmektedir. Elektrik akı yoğunluğu Eşitlik 2.4'teki gibi ifade edilmektedir [41].

$$D = \sigma = \epsilon_o E_o \quad (2.4)$$

Kapasitans değeri ise, sırasıyla önce Eşitlik 2.3'ün Eşitlik 2.4'te kullanılması ve sonra da plakaların her biri için toplam yük miktarı  $Q_o$ 'a denk gelen  $\sigma \cdot A$  değerinin  $Q_o$ 'da yerine yazılıp gerekli sadeleştirmelerin yapılmasıyla Eşitlik 2.5 ile hesaplanmaktadır. Burada  $A$ , metrekare cinsinden iletkenin yüzey alanı ve  $C_o$ , paralel plakaları arası vakumla dolu kapasitörün Farad cinsinden sığası ve  $Q_o$ , her bir plaka için Coulomb cinsinden yük miktarıdır.

$$C_o = \frac{Q_o}{V_o} = \frac{\epsilon_o A}{d_i} \quad (2.5)$$

Dikkat edilirse bu vakum dolgulu kapasitörde elektrik alanın tek bir bileşeni vardır o da kaynağın oluşturduğu  $E_o$ 'dır ve net elektrik alanıdır.

Eğer bu kapasitörün plakaları arasındaki boşluk, dielektrik sabiti  $\epsilon'$  olan bir yalıtkan malzeme ile değiştirilirse Şekil 2.8'de görüldüğü üzere dielektrik malzeme içinde kutuplaşma bileşenlerinin alanla paralel hizalanmasını engelleyen ve elektrik alanla

aynı doğrultuda ancak ters yönde bir kutuplanma engelleyici elektrik alanı ( $E_p$ ), oluşmaktadır. Buna göre net elektrik alan vektörü ve bunun büyüklüğü sırasıyla Eşitlik 2.6 ve Eşitlik 2.7 ile verilmiştir.

$$\vec{E} = \vec{E}_o + \vec{E}_p \quad (2.6)$$

$$E = E_o - E_p \quad (2.7)$$

Eşitliklerdeki  $E_p$ , malzemenin bütününde homojen kutuplama dağılımlı ve lineer bir ideal dielektrik için ele alınmış olup Eşitlik 2.6, Eşitlik 2.7’de doğrudan skaler farka dönüşmüştür. Gerçek bir dielektrikte ise malzeme yapısından kaynaklı etkin polarizasyon türünün farklı doğrultularda veya rotasyonel yönelimine göre veya alternatif kaynaklı devrelerdeki değişken gerilime göre bu vektörlerin farklı katkıları da olabilmektedir ve daha detaylı çözüm gerektirebilir. Ancak basitlik açısından 2 eksenli varsayılmıştır.

Eklenen yalıtkan nedeniyle polarizasyon etkileşimi, paralel plakalar arasındaki gerilim farkını  $1/\varepsilon'$  çarpanı kadar azaltma etkisi gösterirken elektrik alanın malzemeden geçişine de aynı oranda etki eder [42]. Değişen elektrik alan ve potansiyel fark Eşitlik 2.2 ve Eşitlik 2.3’ün, yalıtkan malzemenin dielektrik sabitine bölünmesi ile sırasıyla Eşitlik 2.8 ve Eşitlik 2.9’deki gibi elde edilmektedir.

$$E = \frac{E_o}{\varepsilon'} \quad (2.8)$$

$$V = \frac{V_o}{\varepsilon'} \quad (2.9)$$

Ayrıca Eşitlik 2.7 ele alındığında bileşke elektrik alanı azaltan  $E_p$ ’nin de tıpkı Eşitlik 2.2’deki  $E_o$ ’ın her bir metal plaka yüzeyinde oluşan  $\sigma'$  ya olduğu gibi birim alan başına düşen bir yük yoğunluğuna bağlı olması gerekir ki bu da kutuplanma etkisiyle yalıtkan yüzeyinde oluşan kutuplanma yüzey yük yoğunluğu  $\sigma_p$ ’dir. Bu durumda polarizasyon kaynaklı elektrik alan şiddeti Eşitlik 2.10’daki gibi olurken net alan Eşitlik 2.11’deki gibidir.

$$E_p = \frac{\sigma_p}{\varepsilon_0} \quad (2.10)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} - \frac{\sigma_p}{\varepsilon_0} \quad (2.11)$$

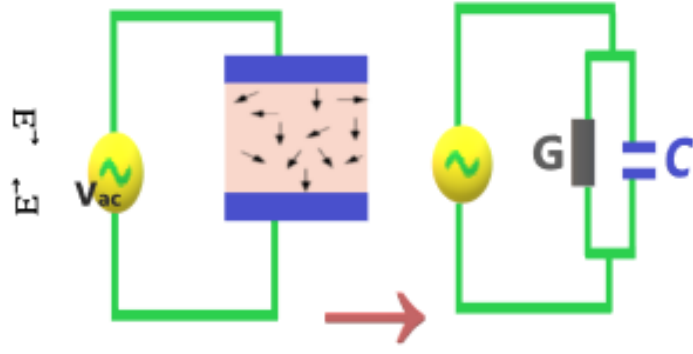
Bu eşitliğe göre eğer bir vakum dolgulu kapasitörün ortasındaki vakum, bir dielektrik ile değiştirilirse kapasitörün kapasitansı Şekil 2.4'te plakalardaki + ve – işaretli sıklaşan serbest yük sayısı ile görselleştirildiği gibi artmaktadır. Bu durumun temel sebebi polarize yalıtkanın yüzeyindeki plakalardakine göre zıt işaretli yüklerin, buldukları bölgedeki plaka yüklerini sabitlemesi yani bir bakıma varsayımsal olarak nötrlemesi ve metal plakaya yeni serbest yükler için hareket alanı açılması ile kaynaktan plakaya doğru akıp vakum kapasitörüne kıyasla  $\varepsilon'$  çarpanı kadar artan daha fazla yük akışıdır.

Böylece dielektrik eklenmesiyle kapasitör sığası  $\varepsilon'$  çarpanı oranında artarak Eşitlik 2.5'teki  $C_0$  değerinden Eşitlik 2.12'deki  $C'$ 'ye dönüşecektir [43].

$$C = \varepsilon' C_0 = \frac{\varepsilon' \varepsilon_0 A}{d_i} \quad (2.12)$$

DC gerilim kaynağı Şekil 2.4'deki gibi periyodik bir alternatif dalga üreticiyle değiştirildiğinde elektrik alanın ileri geri yön değiştirmelerinin polarizasyonda elektrik alanı yakalamak için ortaya çıkan değişimleri ve plakalarda biriken yük işaretinin periyodik değişmesi nedeniyle bu yeni düzendeki dielektrik bileşenleri DC sinyaldeki gibi statik değil karmaşık dinamik bileşenlere dönüşmektedir ve malzemenin dielektrik katsayısı karmaşık dielektrik geçirgenlik ( $\varepsilon^*$ ) olarak adlandırılmakta olup Eşitlik 2.13'deki gibi verilmiştir.

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2.13)$$



Şekil 2.9. Dielektrik arakatman ilaveli yapının AC sinyal eşdeğeri [40].

Bu oluşan karmaşık dielektrik geçirgenliğin gerçel kısmı, dielektrik sabitine ( $\epsilon'$ ) tekabül eder ve bir dielektriğin, frekans etkisi altındaki bir elektrik alan varlığında boş uzaya kıyasla yük depolama kapasitesinin bir oransal ölçüsü olup birimsiz bir niceliktir.  $\epsilon''$  ise,  $\epsilon^*$ 'nin sanal bileşenidir ve malzemedeki dinamik kayıpları anlatmaktadır. Şekil 2.9'da AC kaynak uygulandığında dielektrik kapasitörü, kayıpsız ideal bir kapasitör ile bu kapasitöre paralel bağlı bir kondüktanstan oluşan bir eşdeğer devre olur ve bu devrenin admitansı Eşitlik 2.14'teki gibi yazılabilir [40].

$$Y = j\omega C + G \quad (2.14)$$

Burada  $Y$ , Siemens (S) cinsinden kapasitörün karmaşık admitansı veya diğer bir deyişle karmaşık elektriksel iletkenliği;  $j$ , sanal operatör;  $\omega$ , etkisinde kalınan alanın hertz (Hz) cinsinden açısal frekansı ( $\omega = 2\pi f$ ),  $C$ , Farad (F) cinsinden kapasitans ve  $G$ , S cinsinden kondüktansı ( $G = 1/R$ ) yani iletkenliğidir.

Eşitlik 2.14'te, Eşitlik 2.13'ün kullanılmasıyla admitansın gerçel ve sanal bileşenleri Eşitlik 2.15'teki gibi elde edilmektedir.

$$Y = (G + \omega\epsilon''C_0) + j\omega C_0\epsilon' \quad (2.15)$$

Empedans ise admitansın tersi olduğundan Eşitlik 2.16'daki gibi verilmektedir.

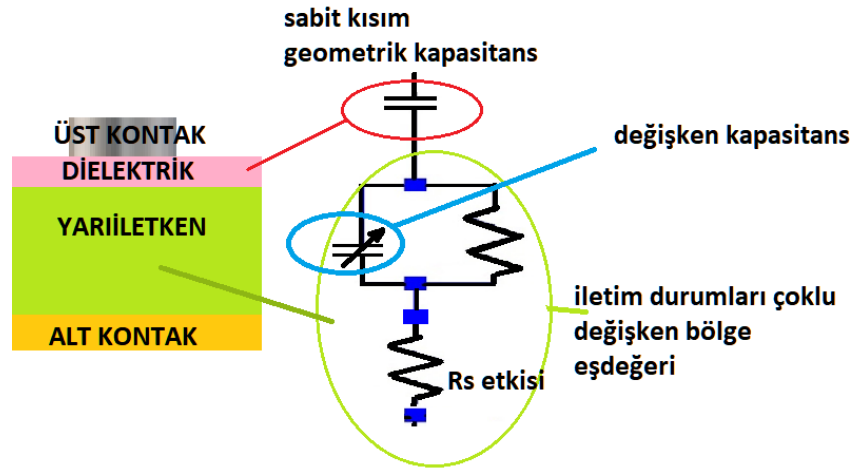
$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{j\omega C + G} \quad (2.16)$$

Bu denklemlerin gerçel ve sanal kısımlarından yararlanılarak ara işlemler sonucu  $\varepsilon'$  ve  $\varepsilon''$  çekilerek Eşitlik 2.17'de  $\varepsilon'$  ve Eşitlik 2.18'de  $\varepsilon''$  elde edilmektedir.

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_0} \quad (2.17)$$

$$\varepsilon'' = \frac{G}{\omega C_0} \quad (2.18)$$

Bir MIS yapıdaki SBD ele alındığında ortasındaki dielektrik malzemenin kapasitif davranışına ilave olarak yeni yüzey durumları etkisi de eklenir çünkü artık sadece metal plaka-dielektrik yüzey birleşimi değil ayrıca orta bölgede bir yarıiletken-dielektrik ve arka kontakta bir metal-yarıiletken bağlantısı da oluşmaktadır. İdeal bir MIS yapı birbirine seri bağlı 2 kapasitör ile ifade edilebilir.



Şekil 2.10. MIS yapı ve eşdeğer devresi.

MIS yapının iletiminde istenmeyen iletim kayıpları da vardır. Dolayısıyla yarıiletkenin bariyer değişimi de yapının etkin kapasitansında değişikliğe sebep olacaktır. Bu sebepten eşdeğer devre kapasitansına bunların da bütünleşik katkısı, dielektrik kaynaklı geometrik kapasitans yanında dahil olmaktadır. Bu eşdeğerin basit genel gösterimi Şekil 2.10'da verilmiştir. Dielektrik kapasitans, geometrisiyle sınırlı davranış gösterdiğinden değeri belirlidir ve diğer kapasitif etkilere doğrudan eklenecektir. Ancak uzay kapasitansı da denen değişken kapasitans birikimden



terslenime kadar yarıiletkenin oluşturduğu bariyer genişliğinin değişmesi ile değişmektedir.

Önceki paragrafta değinildiği üzere MIS yapıdaki etkin kapasitans değişimi toplam kapasitansı etkiler dolayısıyla alan varlığında  $\epsilon'$  oranında gerçekleşen bu değişim oranı yapının kapasitif kalitesini gösteren bir parametredir ve kutuplama etkisinden faydalanmaktadır.

Tek tip atomdan oluşan kutupsuz moleküllerin, elektronik kutuplanması meydana gelirken dinamik elektrik alandaki malzeme atomlarında elektron bulutunun çekirdekten uzaklaşmasıyla net momenti değiştirmese dahi mesafe kateden kısmi serbestlikteki elektronlar kinetik-potansiyel enerji farkı üretebilmektedir. Bunun yanında kristal yapıdaki kutuplu moleküller aralarında molekül yapısını koruyan iyonik bağlardan kaynaklı bağıl bir yer değişimi oluşturan, malzemenin tamamı için elektrik alana bağımlı bir net ya da ortalama dipol momenti oluşturabilmektedir. Diğer bir malzeme türü olarak iyonik polarizasyon da gösterebilen iki kutuplu moleküller, malzeme doğasında halihazırda var olan kalıcı dipol momentlerini dinamik alan varlığında yönelimsel kutuplamayla yeniden şekillendirebilip moment vektöründe değişiklik yapabilmekte ve uygulanan alan kaldırılrsa dahi yeni bir alan uygulanana kadar bu durumu sürdürebilmektedirler. Ayrıca malzemeler arası yüzey kusurlarında yük biriktirmeyle veya farklı malzeme yüzeyleri sınırlarında veya aynı maddenin farklı fazları arası sınırlarda yük biriktirmesiyle arayüzey türü kutuplanmanın oluşturduğu çeşitli dipol bariyerleri yüzünden malzemelerdeki kutuplamalar çeşitli ısıl değişikliklere sebep olabilmektedir [38,40,44]. Özetle dielektrik malzemeler polarizasyon etkisiyle dipollerin oluşumu, bağıl yer değiştirmesi ve hizalanması nedeniyle malzeme içinde bu harekete karşı gelen alan mekanizması sebebiyle enerji harcayabilmekte ve bunu da ısı olarak dönüşüme sokabilmektedirler.

Bir malzemedeki dielektrik sabiti, depo edilen enerjiyi anlatırken dielektrik kayıp bu enerjinin harcanmasını anlatmaktadır. Dolayısıyla ısıl değişiklikler dielektrik kayıplarını vermektedir. Ancak her dielektrikte bütün polarizasyon türleri etkin olmadığından ayrıca elektronik kutuplama gibi malzeme üzerinde etkisi frekansa bağılı çok az miktarda dielektrik kaybı farkı oluşturan bileşenler ilgisiz frekanslarda ihmal

edilebileceğinden her dielektrik malzeme için dielektrik kaybının ana bileşeni aynı olmamaktadır. Örneğin elektronik polarizasyon etkisinin kendinden bir önceki frekans aralığında etkin olan atomik polarizasyona katkı olarak eklenebileceği durumundan bahsedilmektedir [40]. Bu sebeple alanın frekans aralığı ve çalışılan malzemenin moleküler yapısına göre etkin kutuplama bileşeni kaynaklı dielektrik kayıpları değişiklik gösterebilmektedir. Sonuçta, gerçel ( $\epsilon'$ ) ve sanal ( $\epsilon''$ ) bileşenleri, karmaşık dielektrik geçirgenliği ( $\epsilon^*$ ) meydana getirmekte olup dinamik şartlarda sistem cevabını frekans bağımlılığı kapsamında incelemektedir.

#### 2.4.2. Kayıp Tanjant Açısı

Önceki kısımda dielektrik malzemelerin yük depolama sabiti ile kayıp parametresinden bahsedilmişti. MIS cihazlarda ve birçok başka uygulamada yüksek kapasitans, cihaz için istenen bir kriterdir. Ancak bu yüksek kapasitansın beraberinde ne kadarlık bir kayıp getireceği cihazın performansını belirlemek için önem arz etmektedir. Bu sebeple cihazda oluşan dielektrik kaybını ölçmeye yarayan diğer parametre ise kayıp faktörü, kayıp tanjant açısı, dielektrik tanjant açısı ya da tanjant kaybı olarak adlandırılan dielektrik kayıpların yoğunluğunun bir ifadesi olan  $\tan\delta$  parametresidir. Tanımına bakılacak olursa ne kadarlık bir enerji depolamanın ne kadarlık bir enerji kaybına karşılık geleceği kriteri ile kayıp faktörü Eşitlik 2.19'daki oranla verilebilir.

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{G}{\omega C} \quad (2.19)$$

Bu parametrenin büyüyen değerleri karşılık gelen dinamik alana göre kayıpların oranının arttığını göstermektedir. Ayrıca malzeme biliminde elektronik uygulamalarda yüksek öneme sahip olan malzeme ölçeklerinden biri olan kalite faktörü ( $Q=1/\tan\delta$ ) de bu tanjant kayıp faktörünün tersiyle değerlendirilmektedir [39].

### 2.4.3. Elektrik Modülüs

Karmaşık elektrik modülüs ( $M^*$ ), tıpkı kayıp tanjant açısı gibi dielektrik malzeme hakkında hem ısı kaybı hem de yük depolama yeteneğinin bütünsel bilgisini içinde barındıran bir diğer parametredir. Ancak  $M^*$ , elektrik alanın malzeme içinde nasıl zorlandığını açıklamaktadır. Yine diğer dinamik parametreler gibi lineer ve sanal kısımlardan oluşur ve  $\epsilon^*$ 'nin ilgili sadeleştirilmesiyle Eşitlik 2.20'deki gibi reel ( $M'$ ) ve sanal ( $M''$ ) bileşenler elde edilmektedir [45].

$$M^* = \frac{1}{\epsilon^*} = M' + jM'' = \frac{\epsilon'}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} + j \frac{\epsilon''}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} \quad (2.20)$$

Eşitlik 2.20'de görüldüğü üzere  $M^*$ , karmaşık dielektrik geçirgenliğin tersi olduğundan bir dielektrik malzemenin uygulanan alan altında enerjii nasıl depolayıp depolayamadığını diğer bir deyişle bu alana karşı malzemenin bir tür direnç tepkisini yani enerjii depolayıp boşaltırken malzemenin bu dinamik alana olan frekansa bağlı şekilde karşı koyuş biçimini anlatmaktadır.

### 2.4.4. AC İletkenlik, Faz Açısı ve Empedans

AC iletkenlik bir dielektriğin elektrik alan karşısında gevşemesinin farklı bir incelemesidir. Bu parametre malzemenin dinamik elektrik alan karşısında elektrik akımını nasıl taşıdığıнын bilgisini yani bu dinamik alanı malzemede nasıl taşıyıp nasıl serbest bıraktığını ve yüklerin hareketini anlatmaktadır.

Jonscher, katılarda dielektrik gevşemeyi incelediği çalışmasında dinamik alan ortadan kaldırıldığında yönelimsel kutuplamanın geri dönüşümlü bir sürece sebep olup malzemede alan deşarjında bir etkisi olmazken yük hareketlerinin ise deşarj esnasında malzemede kalıcı sonlu bir etki bıraktığından bahsetmektedir. Bu iki farklı gevşeme hareketini zaman eksenindeki sınırlılığı ve ıraksamasıyla ile incelemiştir. Bu durumlar zaman ortamından frekans ortamına aktarıldığında, tersinir sistemler yani yönelimsel kutuplamalar kayıp piklerine sahipken, geri döndürülemez sistemlerde yani yüklerde bu piklerin görülmeyip düşük frekanslara doğru bir artış göstereceğinden

bahsetmektedir. Bu durum DC iletimin olduğu sabit akım ve deşarj sırasında herhangi bir akımın olmayışı olarak bildirilmektedir [46].

Debye, frekansta görülen bu kayıp noktasını bir  $\tau$  gevşeme süresinde ortaya çıkan tek bir pik ile ele almıştır. Ancak dielektrik malzemelerin geneli bu gevşemeleri bir dağılım olarak gösterdiği için, birçok araştırmacı Debye model ve Maxwell denklemlerinin bileşenleri ile çeşitli modifikasyonlar ve farklı modeller altında bu gevşeme davranışını açıklamışlardır [46-48]. Bunlardan temelde en çok sisteme ve değışkene uygulanabilen bir model olarak Jonscher'in farklı malzemelerdeki farklı davranışları tek bir ortak denklemlle özellikle de dielektrik gevşeme davranışında ele almasıyla elde edilen ve literatürde farklı versiyonları bulunmakla beraber genel kabul gören en basit hali Eşitlik 2.21' de verilmiştir.

$$\sigma(\omega) = \sigma_{DC} + A\omega^s \quad (2.21)$$

Eşitlik 2.21 ve çeşitli varyasyonları literatürde Jonscher'in güç yasası, Global dinamik cevap (Jonscher's Power Law, Universal Dynamic Response) olarak birbiri yerine kullanılmaktadır [45,46]. Burada  $A$  bir sıcaklık parametresi,  $\omega$  açısal frekans,  $s$  ise frekans değışimi için 0 ile 1 arası değer alan bir üstel değışkendir. İlk terim  $\sigma_{DC}$ , frekanstan bağımsız ve sıcaklığa bağımlı bir bileşen olup elektrik yükü taşıyıcıların sürüklenmesinden kaynaklanır [45]. Dolayısıyla düşük frekanslarda geçerli olmak kaydıyla, yük taşıyıcıların rastgele yer değıştirmeleri ve sürüklenmeleriyle bir bakıma arayüz durumlarıyla frekanstan bağımsız sabit bir eğimle ilettime katkıda bulunmaları nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Ancak literatürde bu frekansın üstel katsayısının dağınık yapılı malzemelerin 1 MHz'e kadar olan ölçümler için 1'den büyük olarak bulunduğunun örneklerinden de bahsedilmiştir [48].  $A\omega^s$  ise AC iletkenliğe ( $\sigma_{AC}$ ) denk gelir hem sıcaklığa bağılı hem de frekansa üstel olarak bağımlıdır ve frekansla değışen iletim hareketinden kaynaklanmaktadır. AC iletkenliğin frekansa bağılı değıştiği bilindiğinden ve bu iletim esnasında da iletim kayıpları ortaya çıkacağından AC iletkenlik hesaplamalarda kayıp tanjant açısı yardımıyla da Eşitlik 2.22'deki gibi ifade edilebilmektedir [45].

$$\sigma_{AC} = \omega \cdot C \cdot (\tan \delta) \cdot \left(\frac{d_i}{A}\right) = \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon'' \quad (2.22)$$

Buradaki A değeri, önceki dielektrik denklemlerinde geçen  $m^2$  cinsinden kontak yüzey alanıdır ve Eşitlik 2.21'deki sıcaklığa bağlı parametre ile karıştırılmamalıdır.

Özetle AC iletkenlik parametresi, düşük frekanslarda sistemin doğru akım benzeri sabit değerli düzlemsele çok yakın tepkisini vermektedir. Artan frekans etkisiyle sinyaldeki üstel değişimi düşük frekanslarda iletim yoluna katkıda bulunan tuzak yükü hareketlerinin üst üste binip DC benzeri bir akım oluşturmasına bağlanabilmektedir. Ancak yüksek frekanslarda bu durum, dipolar kutuplama gibi şarjdan-deşarja geçişte geri döndürülebilir etkiye sahip mekanizmaların alan sinyalini ilk uygulandığında ve ortadan kalktığına sırasıyla enerjisi doldurması ve boşaltması doğrultusunda üstel olarak artan bir etki ile açıklanmaya çalışılmaktadır.

Eşitlik 2.16'da daha önce verilmiş olan empedansın gerçel ve sanal bileşenleri bu bölümde verilen denklemlerin birbiri içinde kullanılmasıyla Eşitlik 2.23 ve Eşitlik 2.24'teki gibi bulunmaktadır.

$$Z' = \frac{\epsilon''}{2\pi f C_o (\epsilon'^2 + \epsilon''^2)} \quad (2.23)$$

$$Z'' = \frac{\epsilon'}{2\pi f C_o (\epsilon'^2 + \epsilon''^2)} \quad (2.24)$$

Burada  $Z''$ , kompleks empedansın sanal kısmı olarak denklemindeki dielektrik sabiti içeriğinden de anlaşılacağı üzere malzemenin alan etkisindeki yük depolama becerisiyle bağlantılıyken; sanal bileşen olan  $Z'$  ise yine içeriğindeki dielektrik kaybı bileşeninden ötürü malzemedeki direnç benzeri iletim kayıplarından ileri gelmektedir. Ve bu iki bileşenin arasındaki gecikme ilişkisi açısal olarak ifade edilebilir. Dolayısıyla sistemde bütün bu kutuplanma, iletim ve kayıp olayları gerçekleşirken dikkate alınması gereken bir diğer parametre ise faz açısı ( $\theta$ )'dır. Faz açısı eşitlik 2.25'teki gibi verilmiştir.

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{Z''}{Z'} \right) \quad (2.25)$$

Bu açı sayesinde malzemenin dinamik alan altındaki enerji depolama harcama durumları iletim davranışının reaktif ve dirençsel bileşenleri kapsamında açı büyüklüğüne göre gözlemlenebilir.

## BÖLÜM 3

### MATERYAL VE METOD

#### 3.1. ELMAS BENZERİ KARBON (DLC)

Çeşitli kimyasal, optik ve tribolojik özelliklerinden dolayı DLC filmleri, MS yapılarında ara katman olarak seçilebilecek eşsiz malzemelerdir [49,50]. DLC filmleri, soğuk katot alan yayıcılarında, güneş hücrelerinde, a-C/c-Si hetero yapılarda ve ayrıca optik camlar, manyetik depolama diskleri gibi koruyucu kaplamalarda ve mikro elektromekanik cihazlarda kullanılabilir [49,51-55]. DLC film özellikleri, doping malzemeleri, biriktirme teknikleri, kafes bozukluğu gibi faktörlerden ve ayrıca H ve  $sp^2$  ve  $sp^3$  hibrit bağlarından oluşan içeriğinden önemli ölçüde etkilenmektedir [50-57]. DLC, sertlik, direnç, dielektrik dayanım ve kimyasal inertlik gibi yüksek derecede özelliklere sahip olmasına rağmen, elektriksel özelliklerini geliştirmek için katkı maddelerine ihtiyaç duyabilmektedir [52,55,58-60]. DLC filmlerinin yüksek iç gerginliği ve zayıf yüzey yapışması gibi bazı olumsuz özellikleri, bilim camiasındaki pratik uygulamalarını kısmen sınırlamıştır. Bazı çalışmalar DLC filmlerine metalik elementlerin eklenmesinin yapışmayı artırabileceğini ve yüksek boyutlu stresi serbest bırakabileceğini belirtmiştir [55,61]. Ayrıca eklenen üçüncü elementin tipine ve konsantrasyonuna bağlı olarak, DLC filmlerinin elektriksel özelliklerinin Co, Ni, Au, H ve N gibi çeşitli katkı maddeleri ile doping etkisine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği öne sürülmüştür [62]. Ayrıca  $SiO_2$  gibi geleneksel izolatörlerin daha büyük enerji bant aralığı ( $E_g$ ) değerlerindeki koşullarda, DLC filmin  $E_g$ 'sinin, filmdeki N içeriği modifikasyonu ile azaltılabileceğinden bahsedilmiştir [56,63]. Başka bir çalışmada, DLC filmlerine % 7'ye kadar N eklenmesiyle optik bant aralığının 0,45 eV'lik bir değişiklik ile artırılabilir rapor edilmiştir; ki bu da artan azot akışı ile değişen bant aralığındaki değişimin pasifleştirilen sarkan bağlarına tekabül eden başlangıçtaki azot içeriği ölçümlerinden daha büyük bir değerdir [64]. Azot ve karbon

atomları birbirleriyle güçlü kovalent bağlar oluşturmaktadırlar [65]. N katkılı karbon malzemeler katalizörlerin hem aktivitesini hem de dayanıklılığını artırır [66].

Nitrojen atomu komşu karbonu pozitif yüklü hale getirmekte ve pozitif yük yoğunluğunun artmasına yol açmaktadır. Bu durum katalitik aktiviteyi iyileştirmekle beraber elektron hareketliliğini de arttırmaktadır [67,68]. Bu durum göz önüne alındığında DLC filmlerine N atomu katkılanarak elektriksel özellikleri artırılabilir. Kütle seçimli iyon ışın biriktirme, magnetron püskürtme, mikrodalga plazma destekli biriktirme, plazma destekli kimyasal buhar biriktirme, darbe lazer biriktirme, filtrelenmiş katodik vakum ark deşarjı gibi farklı fiziksel ve kimyasal yöntemler DLC film biriktirme için kullanılabilir [53]. Ayrıca bu çalışmada kullanılan elektrokimyasal yöntem de bir alternatif bir yöntemdir. Daha basit ekipmanlarla ve daha düşük maliyetle düşük sıcaklıkta biriktirme sağlayan elektrokimyasal biriktirme tekniği de birçok çalışmada başarıyla kullanılmıştır [69-71].

### **3.1.1. Arayüzey Tabakası ve İnce Film Teknikleri Açısından DLC**

Web of Science (WOS) veri tabanındaki DLC malzemelerle ilgili literatür Aralık 2023 çalışmalarını da içerecek şekilde ayrıntılı arama filtreleri ile incelendiğinde genel DLC film kaplama çalışmaları ve arayüzey olarak DLC film kullanılan çalışmalarının her ikisi için de en çok kullanılan yöntemler sırasıyla kimyasal buhar biriktirme (CVD), saçtırma, plazma-destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD), fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve darbeli lazer biriktirme (PLD) olarak bulunmuştur. Yine bu yöntemler fiziksel kimyasal ve hibrit/diğer kategorisinde incelendiğinde DLC film oluşumunda en çok çalışmanın fiziksel biriktirme ardından yakın bir fark ile kimyasal biriktirme ve bunlara kıyasla daha az sayıda hibrit yöntemle üretildiği bilgisine WOS veri tabanında kullanılan bu yöntemler ile yapılan çalışmaların ilgili tarih aralığında aratılarak ulaşılabilir. Kristal yarı iletken malzemeleri vakum altında büyütme için kullanılan ve çok yönlü biriktirmeye olanak tanıyan standart CVD tekniğinde genelde alttaşlar üzerinde aktif ve homojen ince filmler üretmek için iki farklı malzeme arasında bir aracı gazın varlığında kimyasal tepkime oluşumu ile gerçekleşir [72]. Çizelge 1.1'de literatürde farklı üretim teknikleri ile üretilen çeşitli DLC ara katmanlı



veya DLC yüzey kaplamalı yapıların üretilen yapıda ortaya çıkan belirgin sonuçları referans çalışmalar ile listelenmiştir.

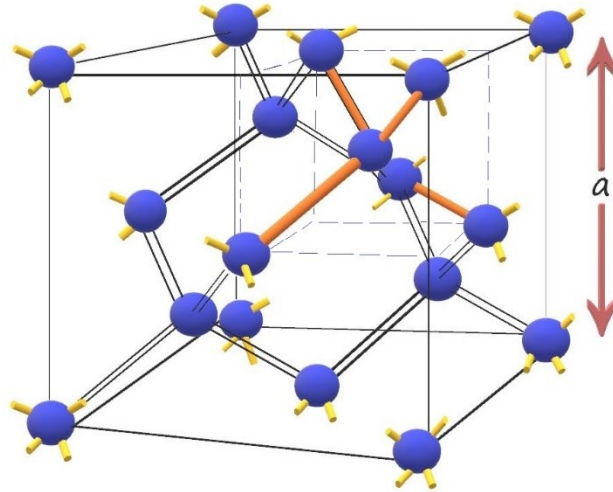
Çizelge 1.1. Farklı Üretim ve Katkılama Kompozisyonunda DLC Ara Katmanlar.

Katkı	Yapıya Özel Bulgular	Özel Ortaya Çıkan Bazı Bulgular	Yapı Türü/Ürün	İnce Film Biriktirme Tekniği	Referans Çalışma
<b>N</b>	Düşük güç biriktirme zamanında oluşumu, sp <sup>3</sup> miktarında genel bir düşüş, ek olarak cihaz yüzeyinin oluşu	güç yoğunluğunda gerçekleştirirken aynı Yüksek sp <sup>3</sup> içeriği artışıyla genel bir düşüş, ek olarak argon gazı kullanımıyla daha hidrofilik oluşu	DLC (a-C) ve azot katkılı amorfus karbon (a-C:Nx) filmler	DC Manyetik Püskürtme	[53]
<b>Si</b>	Si katkısıyla sp <sup>3</sup> bağlarında artış, 180 V gibi düşük bir voltajda başarılması, cihazda iyi davranış gözlemi, RR=1000, (n)=16,99, (BH)=0,61eV	Si katkısıyla film biriktirmede artış, sp <sup>3</sup> bağlarında artış, biriktirmenin 180 V gibi düşük bir voltajda başarılması, cihazda iyi doğrultucu davranış gözlemi, R <sub>s</sub> =5k, RR=1000, idealite faktörü (n)=16,99, bariyer yüksekliği (BH)=0,61eV	Ag/Si-DLC/p-Si MIS SBD	Elektro-Kimyasal	[70]
<b>Yok</b>	Frekans artışında düşüş ve değerlerinde artış	Frekans artışıyla: R <sub>s</sub> , N <sub>SS</sub> , N <sub>A</sub> değerlerinde düşüş ve W <sub>D</sub> , Φ <sub>B</sub> değerlerinde artış	Al/(DLC)/p-Si/Au MIS SD	Elektro-Kimyasal	[71]
<b>Cu</b>	SiO <sub>2</sub> 'dan 156 kat büyük varlığı	SiO <sub>2</sub> 'dan 156 kat büyük ε <sub>r</sub> değeri varlığı	Al/(Cu-DLC)/p-Si/Au MIS SD	Elektro-Kimyasal	[73]
<b>Yok</b>	Biriktirme sürecinde ilavesiyle MIS yapının pasifleştirme etkisinde yalıtkan tarafındaki azalış	Biriktirme sürecinde Ar ve H gazı ilavesiyle MIS yapının oynak yük pasifleştirme etkisinde gelişimi ve yalıtkan tarafındaki tuzaklarda azalış	/DLC/n-Si MIS	Plazma	[74]
<b>P</b>	DLC filmlerde artan sp <sup>2</sup> Saf DLC'nin band artışıyla 2,61 eV'tan 2,31 eV'a çıkışı	DLC filmlerde fosfor etkisiyle artan sp <sup>2</sup> Saf DLC'nin band aralığının fosfor artışıyla 2,61 eV'tan 2,31 eV'a çıkışı		Kapasitif Eşleşmiş Plazma CVD	[75]
<b>Zn</b>	Tane ve tane sınırı sıcaklığın artmasıyla azalması, sp <sup>3</sup> fazlarının UV ışığı dönüşümü, Zn-DLC filmleri için ışığa duyarlılık özelliği ve bariyer yükseklik değerleri kullanımda olan mevcut cihazlara çok yakın çıktı.	Tane ve tane sınırı sıcaklığın artmasıyla azalması, sp <sup>3</sup> fazlarının UV ışığı dönüşümü, Zn-DLC filmleri için ışığa duyarlılık özelliği gözlenmesi ve bariyer yükseklik değerleri kullanımda olan mevcut cihazlara çok yakın çıktı.	Ag/Zn-DLC/Si	Manyetik Püskürtme	[76]

### 3.2. Si YARIİLETKEN ÖZELLİKLERİ

Atom numarası 14, bağlı bulunduğu periyodik tablo gurubu 4A, örgü sabiti 300 (°K)'de 0,5431 nm, erime noktası 1687 (°K) olan Silikon (Si) doğada en çok bulunan elementlerden biri olarak dikkat çekmektedir. Si, atomlar arası kovalent bağı ve Czochralski tekniği ile tekli kristal olarak büyütüldüğünde içinde çok miktarda safsızlık bileşeni içeren bir elementel yarıiletken olarak bilinmektedir. Bunların yanı sıra kristal örgüsündeki fazla atomdan kaynaklanan kristal kusuru bileşeni olarak oksijen milyonda 20 ve karbon ise milyonda 3 safsızlık oranıyla, sırasıyla Si örgüdeki safsızlık atomlarında 1. ve 2. sırayı paylaşmaktadırlar [77].

Silikon ayrıca elmas tipi Bravais kristal örgü yapısına sahip olup birim hücresinde Şekil 3.1'deki genel gösterimdeki kesikli hacimde de vurgulandığı gibi 8 atomu bulunan yüzey merkezli kübik kristal ailesindedir. Si kristalleri 5. grup elementleriyle katkılama yapıldığında n-tipi olup, 3. grup elementleriyle katkılama yapıldığında p-tipi olduğu bilinmektedir. Ayrıca katkılama atomu oranı Si için  $10^{13}$  ile  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  arasında normal kabul edilirken  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  üzeri ise yoğun katkılama olarak ele alınmaktadır [8,19].



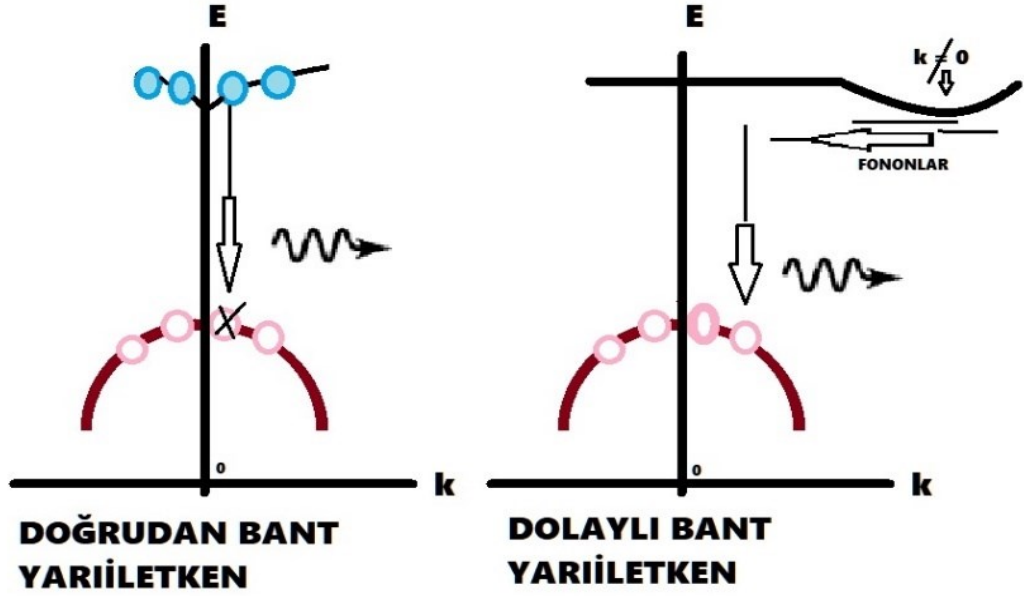
Şekil 3.1. Si atomunun yüzey merkezli kübik görseli [19].

Si ve B ile yapılan bir çalışmada araştırmacılar, hesaplamalarında saf silikon ve saf silikona yapılan farklı oranlardaki bor atomu katkısıyla, katkı atom yüzdesi arttıkça

örgü sabitinin ve tekrarlayan en küçük hücre hacminin küçüldüğünü gözlemlemişlerdir. Ayrıca MS kontak performansı için dolaylı ancak kritik bir parametre olan belirli bir enerji seviyesinde elektronların işgal etmesine izin verilen farklı durumların sayısının (DOS) da bor yüzdesi arttıkça değiştiğini, bant aralığının düştüğünü ve dolaylı bant enerjisi değerlerinin varlığını gözlemlemişlerdir [78].

Yarıiletkenlerde elektron etkileşimlerinde foton dalga vektörü büyüklüğünün elektron dalga vektörü büyüklüğünün yanında göreceli olarak ihmal edilebilir küçük bir değer olduğu ve bu nedenle olası bir foton-elektron etkileşiminde oluşacak yeni dalga vektörünün neredeyse değişmeyeceği çıkarımıyla doğrudan bant aralığına sahip yarıiletkenlerde yalnızca dikey geçişler olduğu vurgulanmaktadır. Bu tarz geçişlerin, dolaylı bant aralığına sahip bir yarıiletkende ancak fononlar ile sağlanabilecek 3 parçalı bir etkileşim süreci ile gerçekleşmesi ve dolaylı bant aralığından dolayı bu yük geçişinin olma olasılığının düşmesinden bahsedilmektedir [43].

Bunu detaylandırmak gerekirse temel kaynaklar katı bir maddedeki elektronun momentum ve bant enerjisini beraber değerlendirmeyi daha doğru bir yaklaşım olarak vurgulamaktadır [8,43,79]. Bu kaynaklardan Pieret'in ilgili literatür tabanlı açıklamalarında belirli safsızlık atomları için izin verilen enerji seviyelerini bir yarı iletkenin orta aralık bölgesinde oluşturabileceğinden ve safsızlık atomlarıyla özel olarak oluşturulmuş kristal kusurlarının, derin seviye durumlarına yol açabileceğinden bahsederken ancak bu şekilde oluşturulan elektron-deşik birleşmesi ve üretilmesi (R-G) süreçlerinden, hangisinin bir yapıda baskın ve en yüksek hızda olduğunun belirlenmesinin önemini vurgulanmıştır. Dolaylı geçişlerin üretildiği R-G merkezlerinde süreç karakteristiğinin ışınımsız olup ısı enerjisi açığa çıktığı ve buna karşılık eşdeğer kafes titreşimleri (fonon) üretildiği gözlemlenmiştir [79]. Valans bandı maksimum noktasıyla iletim bandı minimum noktasının  $k=0$ 'da iken direk bant yapılı GaAs gibi yarıiletkenler için aynı yerde; Si, Ge gibi farklı  $k$  değerlerinde bulunuşu Şekil 3.2' de gösterilmiştir [79].



Şekil 3.2. Yarıiletken doğrudan ve dolaylı bant yapısında R-G etkileşim görseli [79].

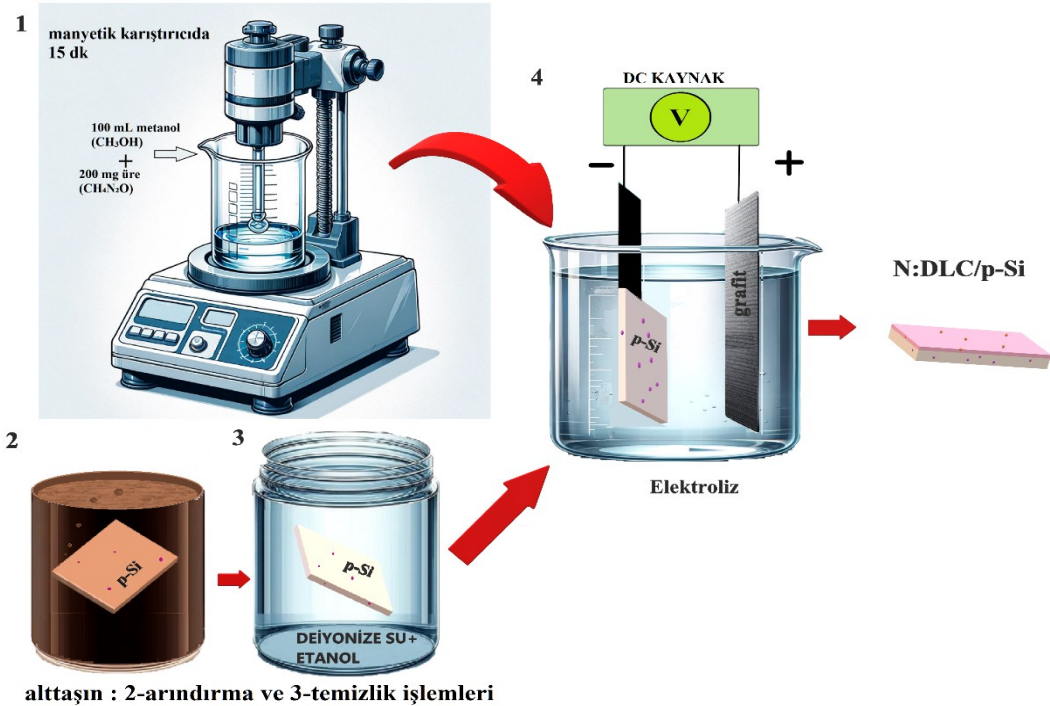
Yük geçişlerinin dolaylı bant aralığına sahip p-tipi silikon yarıiletkende kademeli geçişler sırasında ışık yerine titreşim ve ısı çıkışı ürettiği bilgisi, bu tez çalışmasında da bor katkılı silikon kullanıldığından yük hareketleri nedeniyle yarıiletken hacminde ve özellikle yarıiletken yüzeyindeki geçişlerde ısı değişimlere sebep olacak bir etmen olduğu düşünülebilir. Bir başka deyişle kafes titreşimlerini dolayısıyla sürtünmeyi arttırıcı bir etmen olduğu dolayısıyla malzeme davranışını etkileyecek bir değişken olduğu düşünülebilir.

Bu bilgilerin yanı sıra bazı güç elektroniği cihazlarını detaylı inceleyen güncel bir çalışmaya göre de silikonun uygulamaları, diyot olarak: güç kaynağı, doğrultucu ve koruyucu geri dönüş diyotlarında (Flyback, Kickback, Freewheeling, Snubber, Clamp); MOSFET olarak: anahtarlama mod güç kaynağı, aydınlatma, ses yükseltici ve otomotiv uygulamalarında; yalıtımlı kapılı çift kutuplu transistör (IGBT) olarak motor sürücüsü, yenilenebilir enerji sistemleri, kesintisiz güç kaynakları (UPS) ve elektrikli araçlarda olarak sayılabilmektedir [80].

### 3.3. Al/N:DLC/p-Si/Au SCHOTTKY BARIYER DİYOTUN HAZIRLANMASI

#### 3.3.1. Azot Katkılı İnce Film Kaplama

Diyot katmanlarının hazırlanmasında ve ince film oluşturulmasında önceki çalışmalardaki ilgili adımlar takip edilmiştir [49,69]. N-katkılı DLC nanokompozit filmi elde etmek için (100 ml) metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$  Sigma Aldrich) (% 99,5 saflıkta) ve (200 mg) üre 15 dakika manyetik bir karıştırıcı kullanılarak karıştırılmıştır. Biriktirme işleminden önce doğal oksit tabakasını ortadan kaldırmak için silikon alttaşlar, %5'lik bir hidroflorik asit (HF) çözeltisine daldırılmıştır. Sonrasında etanol ve deiyonize su içinde alttaşın ultrasonik temizliği yapılmıştır. Negatif elektrotun üzerine  $< 100 >$  yüzey hizalamasına ve 300  $\mu\text{m}$  derinliğe sahip Bor katkılı p-tipi Si alttaş yerleştirilirken, karşı elektrot olarak ise grafit bir plaka kullanılmıştır. Bu elektrotlar 4 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. Elektroliz/Elektro-kimyasal (ECD) biriktirme tekniği kullanılarak elde edilen ince film, iki saatlik film oluşturma sürecinde p - tipi silikon alttaş üzerine biriktirilmiştir. Adımlar normal oda koşullarında gerçekleştirilmiştir. İşlem adımları Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. İnce film için hazırlık ve üretim aşamaları [49].

Adımlar sırasıyla, film için gerekli kimyasal tepkimenin oluşması için malzemelerin karıştırılması, alttaşın oksit içeren yüzey elementlerinden arındırılması, alttaşın ultrasonik temizliğinin yapılması, elektroliz yöntemiyle likit karışım içeriği ve grafitin ince film olarak alttaşın yüzeyine biriktirilmesi olarak sıralanabilir. Bu aşamadan sonraki adımlar şekil içindeki takip eden adım numaralarıyla diğer işlem basamaklarında verilmiştir.

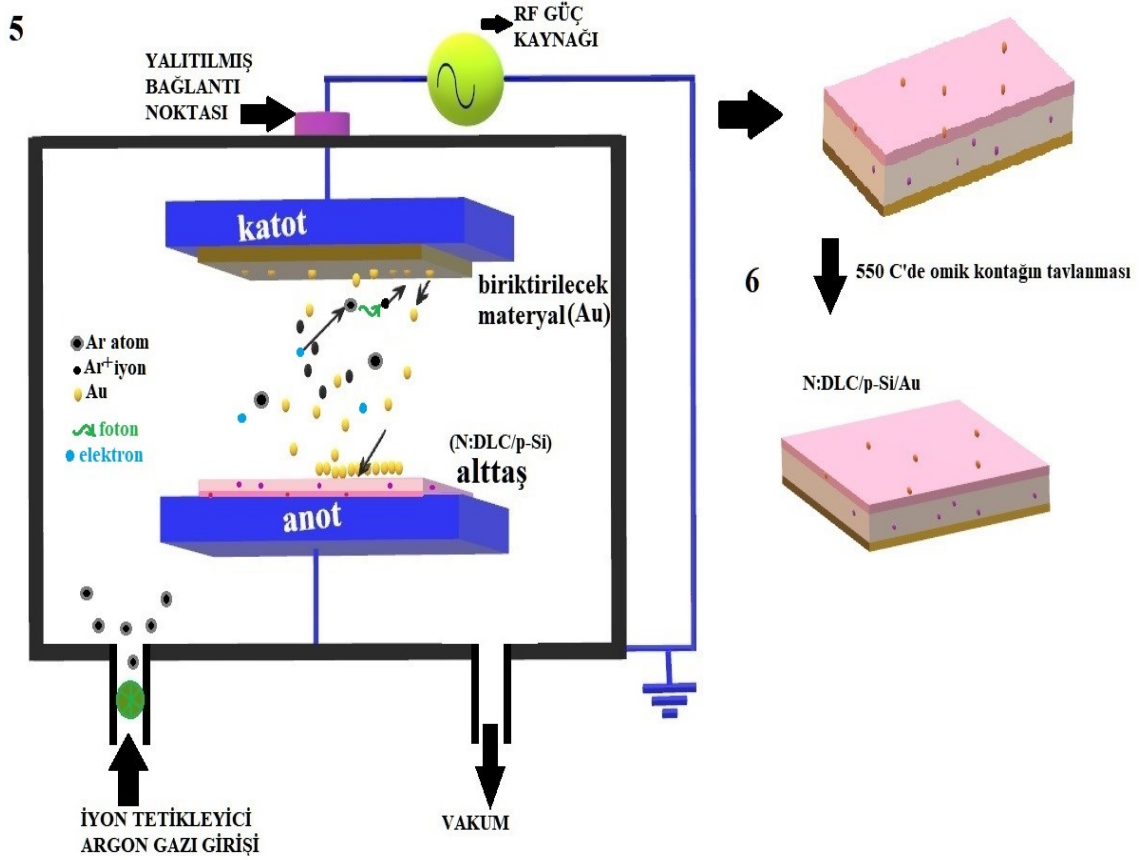
### 3.3.2. Omik Alt ve Doğrultucu Üst Kontak Oluşumu

Bir Schottky diyotta anahtarlanmanın istenen çalışma aralığında yapılabilmesi için her iki kontak kısmının da dolgu malzemesi dielektrik kısmıyla temasta kendi özelliğine uygun iş fonksiyonlu metallere seçilmesi ve üretim sürecinin doğru ilerlemesi gerekmektedir. Aksi takdirde üretilen yapının doğrultma özelliği bulunmayan verimsiz bir ürün ile sonuçlanması kaçınılmazdır. Örneğin omik kontakta beklenti akım iletimini en kolay şekilde yapması için doğrultucu kontakta ise yalıtkan katmanla arasındaki genişleyen zorlayıcı bariyerler aşıldıktan sonra iletme geçmesi tercih edilmektedir. Bu sebeple omik ve doğrultucu kontak oluşumu için önceki bölümde bahsedilen iş fonksiyonu ilişkileri göz önünde bulundurularak malzeme seçimi yapılmalıdır. Bu çalışmada da bu kriter göz önüne alınarak omik kontak Au ve doğrultucu kontak Al seçilmiştir.

Radyo frekansı ile manyetik püskürtme biriktirme tekniği için çalışma prensibi gösterimi önceki çalışmalarda örnek gösterimlerden bu tez konusundaki malzemelere uyarlanarak yeniden çizilmiştir [81]. N:DLC ince filmin oluşturulmasından sonra, Şekil 3.3'te görselleştirildiği üzere, p-Si alttaş ve biriktirme malzemesi olan Au plaka karşılıklı elektrodla yerleştirilmiştir. Hedef kontak malzemesindeki atomları indüklemek için Ar gazı kullanılarak önce RF magnetron püskürtme yoluyla Au alt kontak oluşturulmuş ve sonrasında iyi bir alt omik kontak elde etmek için önceki adımı takiben bu omik yüzey 550 °C'de tavlansmıştır.

Burada kullanılan gaz vakum ortamını ayarlanmış düşük bir basınç seviyesinde ( $\approx 10^{-6}$  Torr) tutmaktadır. Bununla birlikte dengeli güç ayarı ve anot-katod davranışında yapılan değişiklik sayesinde gaz atomlarının manyetik alan kaynaklı hareketiyle

elektronlar uyarılmaktadır. Bu sayede atomların  $Ar^+$  iyonuna ayrılıp hedef malzeme atomuna çarpması ve kinetik enerji aktarımı yapmasıyla oluşturduğu elektron koparma etkisiyle biriktirme malzemesinden ayrılan atomların vakum ortamına yayılmasını sağlamaktır [81-82]. Ancak bu yayılma tam anlamıyla gelişigüzel gerçekleşmez. Kimyasal biriktirme yönteminin aksine bir PVD yöntemi olan RF magnetron püskürtmesinde biriktirme, yönlendirilmiş bir açıyla gerçekleşir [83]. Bu sebepten bu tez çalışmasındaki gibi basit geometrili düzlemsel yüzeyleri kaplarken eşit miktarda kaplamanın gerçekleşmesine olanak tanıdığından da bir tercih sebebi olmaktadır.



Şekil 3.4. Radyo frekansı ile manyetik püskürtme (RF Magnetron Sputtering) biriktirme yöntemi ile omik alt kontak oluşumu ve sonrasında tavlama işlemi.

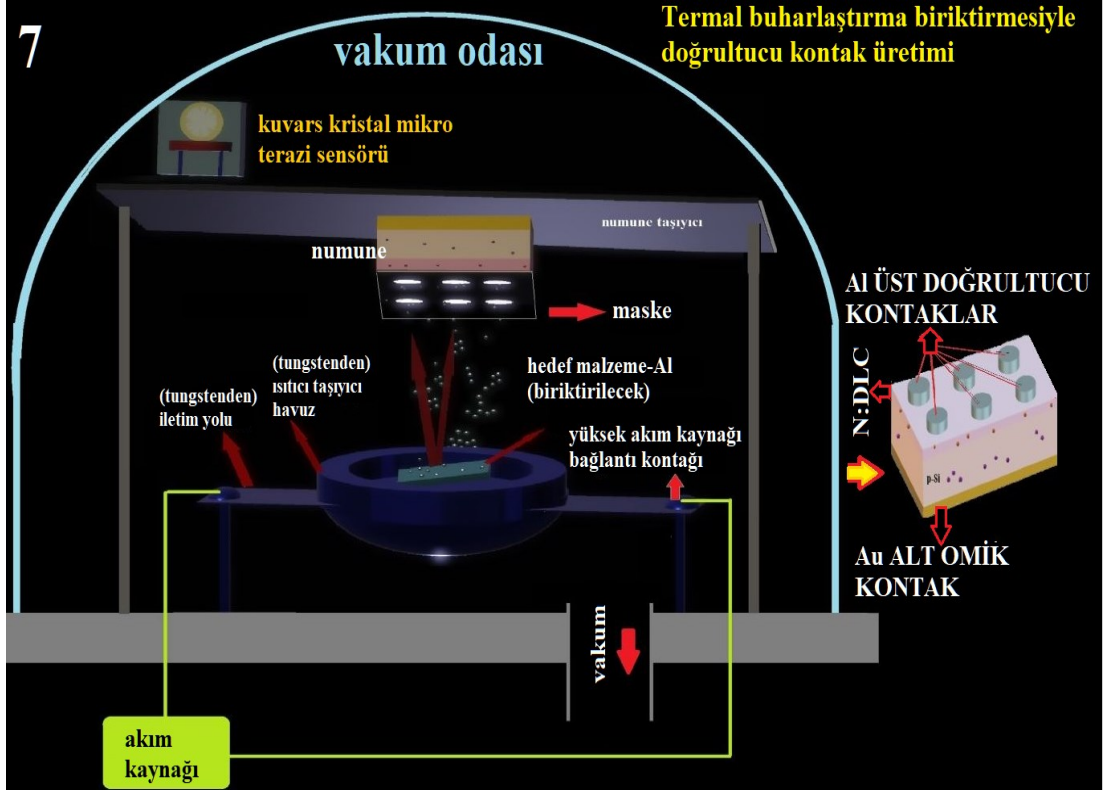
Bu noktadan sonra yeniden devreye giren fiziksel güç manyetik alan etkisinden ileri gelmektedir. Çünkü RF kaynak ile yapılan besleme ile manyetik kutuplar üzerinde uygulanan güç için yön değiştirebilme ayarı yapılabilmektedir. RF manyetik püskürtme sürecinin belirli bir döngüsünde anot ve katod diye adlandırılan ve genellikle biriktirme işleminde 13,56 MHz olarak optimum kabul edilen yüksek

frekansta çalışan aslında bir çeşit RF - diyot özelliği taşıyan bu karşılıklı yerleştirilmiş uçların terslendirilip atomların her iki numune ve hedef tutucudaki malzeme için de aynı miktarda atom koparma veya biriktirme işlemi yapabilmesi için uygulanan adım sayesinde bu kopan atomların alttaş üzerinde birikmesi sağlanmaktadır. Bu sayede kopan altın atomları çalışmanın bu aşamasında N:DLC kaplanmış p-Si üzerinde olmak üzere alttaş üzerinde birikmeye başlar ve omik kontak oluşturulur [84].

Tavlamadan sonra son adım olan üst kontak üretimine geçilmiştir. Şekil 3.5'te görselleştirildiği üzere saflığı artırılmış bir Al filmi, hazırlanan bir şablon maske yardımıyla  $10^{-6}$  Torr basınç altında N:DLC'nin yüzeyine termal olarak buharlaştırma yoluyla biriktirilmiş ve Al/N:DLC/Au MIS Schottky Bariyer diyotun üretimi tamamlanmıştır. Bu termal buharlaştırma yönteminde dikkat çekici hususlardan birisi vakum odasının içinde bulunan kuvars kristalli bir titreşim sensörünün rezonans frekansı değişiminin takibi ile istenilen kalınlıkta biriktirme yapmanın mümkün olmasıdır [85-86].

Termal buharlaştırma yönteminde, numune taşıyıcıya tutturulmuş ve doğrultucu kontak dışında diğer ön hazırlıkları bitmiş diyot yapısı yalıtkan katmanı üzerine iliştilen bir maske aracılığı ile yüksek akıma dayanıklı tungstenden yapılmış bir bağlantı yolu ile ısıtılmaktadır. Yine tungstenden oluşan taşıyıcı havuzunun yüksek akımının bu iletim hattı üzerinde kullanılması ile ısıtılıp içerisindeki hedef malzemenin vakum ortamında buharlaştırılması yoluyla maske boşluklarından geçen biriktirme malzemesinin numune üzerine yapışıp katılaşması ile diyotun üst doğrultucu kontakları elde edilmiştir. Termal buharlaştırma tekniği için çalışma prensibi gösterimi, ilgili kaynaklardaki örnek gösterimlerinden yararlanılarak bu tez konusundaki malzemelere uyarlanarak yeniden çizilmiştir [81,87].





Şekil 3.5. Vakum ortamında dirençli ısıtma yoluyla termal buharlaştırma yöntemi sonucu üst kontak oluşumu gösterimi [81,87].

### 3.4. ÖLÇÜM YÖNTEMİ

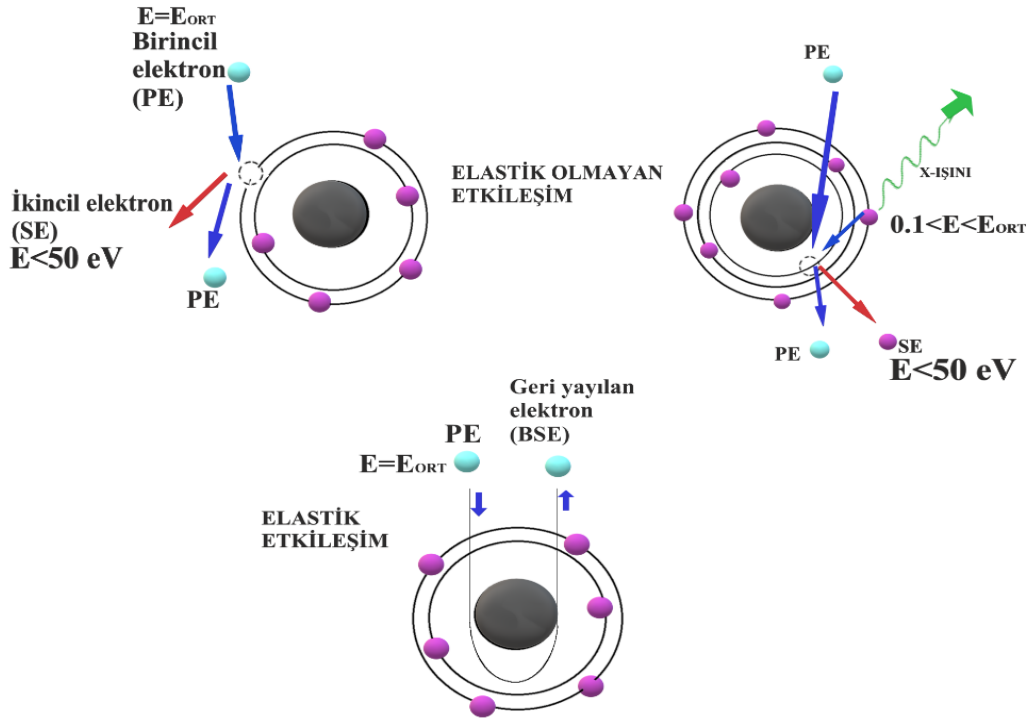
Üretilen numune için, SEM ve XPS ile yüzey ve yapısal görüntüleme; empedans analizörü ile de elektriksel ölçümler gerçekleştirilmiştir.

#### 3.4.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu, yüksek enerjili odaklanmış elektron demeti yardımıyla numune yüzeyi üzerindeki belirlenmiş ve ayarlanabilir dikdörtgen bir alan içinde cihaz bileşenlerinin manyetik yönlendirmelerin de yardımıyla satır satır (raster tarama) veya lineer tarama yapan bir cihazdır [86]. Işın numuneyle etkileşime girdikçe atomik elektronların inelastik saçılması nedeniyle yayılan 50 eV'den az enerjili ikincil elektronlar (SE), bununla beraber atom çekirdeği tarafından elastik olarak saçılan elektronlardan oluşan veya inelastik saçılma yoluyla çok az bir miktar enerji kaybedip yalnızca yön değişikliğine uğrayarak aslında birincil elektronlardan oluşup enerjisi 50 eV' den büyük olup geri saçılmakta olan elektronlar (BSE) ve elementel analizde

yardımcı ek dedektörlerde toplanıp işlenebilen X-ışınları gibi çeşitli elektron veya foton sinyalleri oluşabilmektedir. Doğrudan ışının altındaki alana oldukça lokalize olan ve farklı açılarda saçılabilen elektron veya fotonların oluşturduğu bu sinyallerin, elektron ışınıyla senkronize tarama yapan görüntüleme biriminin parlaklığını modüle etmek için dedektörler tarafından toplanıp sinyal haritalama yazılım arayüzünde de kullanılmasıyla birlikte ekranda bir görüntü oluşturulmaktadır [57,88].

İşleyişinde elektronları hızlandıran, yönlendirerek saptıran ve yoğunlaştırıp kullanan taramalı elektron mikroskopundan elde edilen bu görüntü 1 nm'ye ulaşabilen çözünürlüğü ile standart optik mikroskoplara göre numune malzemesi hakkında daha derin katmanlara ulaşip daha yüksek çözünürlüklü sonuçlar üreterek yardımcı dedektörler ile elementel analize de olanak tanımaktadır [89]. Numune yüzeyine hızlandırıp odaklanmış olarak ulaşan elektron demetinin birincil elektronlarının yüzey etkileşimi sırasında oluşturdukları bazı saçılma türleri Şekil 3.6'da verilmiştir.



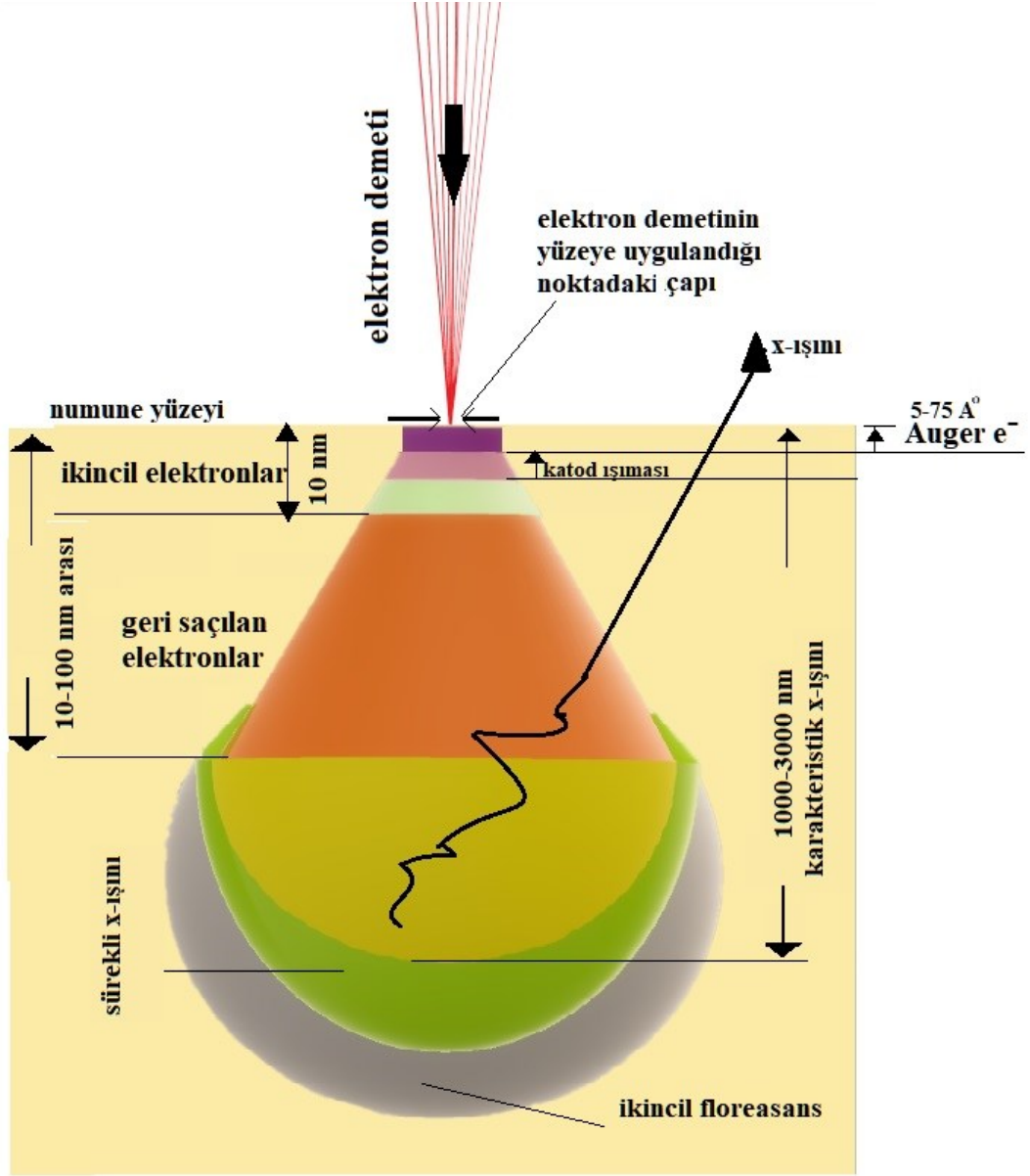
Şekil 3.6. Elastik ve elastik olmayan saçılma.

Bu şekle göre başlangıçta enerjilendirilen birincil elektronların numune yüzeyine ulaştığında kinetik enerji kaybı yaşamadan veya çok az bir miktar enerji kaybı ile yön

değişimine uğradıklarında bu hareketten doğan geri yayılan elektronlar da tıpkı başlangıçta uygulanan enerjiye yakın bir enerjiye sahip olmaktadır.

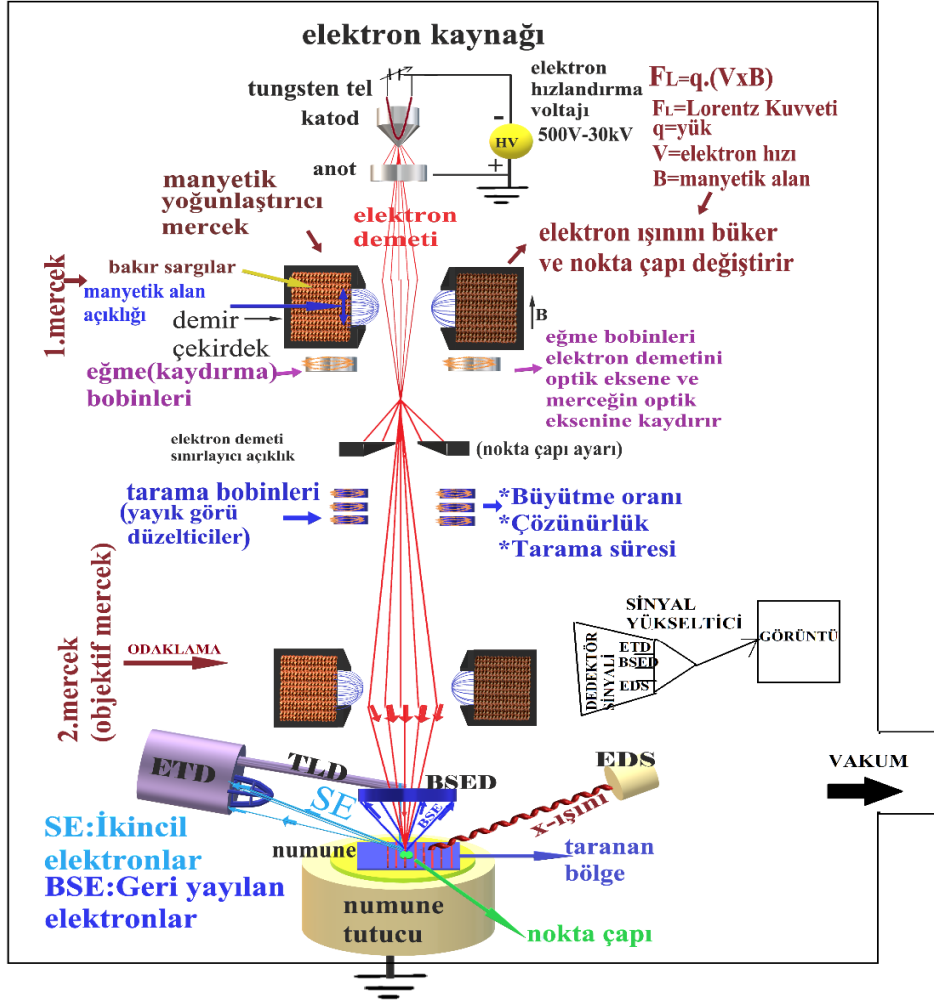
Bu görüntüleme sisteminde en çok dikkate alınan iki bileşenden biri olan ikincil elektronlar, yüzey ve yüzeyin hemen altındaki katmanın malzeme topografisi hakkında bilgi verirken; en çok kullanılan ikinci sinyal tipi olarak geri saçılan elektronlar ise atom numarası yükseldikçe artan parlaklıkla kendini gösterecek şekilde numunenin atomik kompozisyonu hakkında bilgi vermektedir [90]. SEM' de kullanılan dedektörlerden geri saçılan elektronlar için her 3,8 eV' da bir elektron-boşluk çifti üretebilecek altın kaplanmış bir çift n-tipi Si diyot kullanılmaktadır. Bu sayede atom numarasına bağlı kontrast, topolojik kontrasttan ayırt edilebilirken; foton çoğaltıcı sintilasyon dedektörünün de diğer bir alternatif olduğu bilinmektedir [57]. İkincil elektronları algılayıp görüntüye dönüştürmek için ise Everhart-Thornley Dedektörü (ETD) kullanılır. ETD numuneye çarpan birincil elektronların yüzeyden sektirdiği ikincil elektronları tespit etmektedir. Bu elektronlar, numunenin yüzey topografyası hakkında detaylı bilgi sağlar. ETD pozitif yüke sahip bir kollektör ile elektronları kendine çeker ve görüntü sinyaline dönüştürür [91]. Bu dedektörün bir uzantısı olarak lens içi dedektörü diye adlandırılan (TLD) bir dedektör ile de diğer ikincil elektron bilgisi, elektron ışınının yüzeyi taradığı noktada ışın demeti çapında yayılan aralıkta toplanabilmektedir. ETD ile sadece ikincil elektronlar değil araya karışan bir miktar geri yayılan elektron bilgisi de toplanmaktadır. Taramalı elektron mikroskobu ile tarama yapılan yüzeye uygulanan elektron demetinin uygulandığı noktanın referans alındığı saçılma sinyal derinliğini görselleştiren etkileşim hacmi ve çalışma prensibini özetleyen cihaz bileşenleri Şekil 3.7 ve 3.8'de sırasıyla verilmiştir.

Şekil 3.7'ye göre sırasıyla en derinlerden yayılan ikincil ışınma/floresans sinyalleri, sonrasında göreceli daha sığ alandan yayılan sürekli x-ışınları ve 300 nm derinliğe kadar etkileşim hacmi bulunan karakteristik x-ışınları yüzeye uygulanan tarama demetinin yüzey altı atomik yapıdaki birçok kez tekrarlanan hareketiyle oluşan kinetik enerji değişimi sayesinde malzemenin en derin noktalarından elementel bilgi taşımaktadır.



Şekil 3.7. Numune yüzeyi altındaki farklı derinliklerde yayılan farklı sinyallere göre oluşan elektron demetinin etkileşim hacmi görseli [86,88-91].

Ancak SEM görüntülemesinde öncelikle yüzeye en yakın bölgede bulunan ikincil ve geri yayılan elektronların hareketiyle oluşan sinyaller dikkate alınmaktadır. Çünkü SEM’ de temel inceleme öncelikle numunenin yüzey özelliklerini detaylı bir şekilde görselleştirmektir. Görselde yayılan her bir sinyal için örnek hareket yolu verilmemiştir ancak elektronların etkileşim sırasında kinetik enerji kaybedip kaybetmemelerine ve malzeme atomları arasındaki etkileşimle ilerleyebildikleri dağınık yola göre saçılma şekli değişmektedir.



Şekil 3.8. Taramalı elektron mikroskobuna (SEM) ait temel bileşenler ve sinyal işleme açısından oluşan sonuç sinyallerine genel bakış [86,88-91].

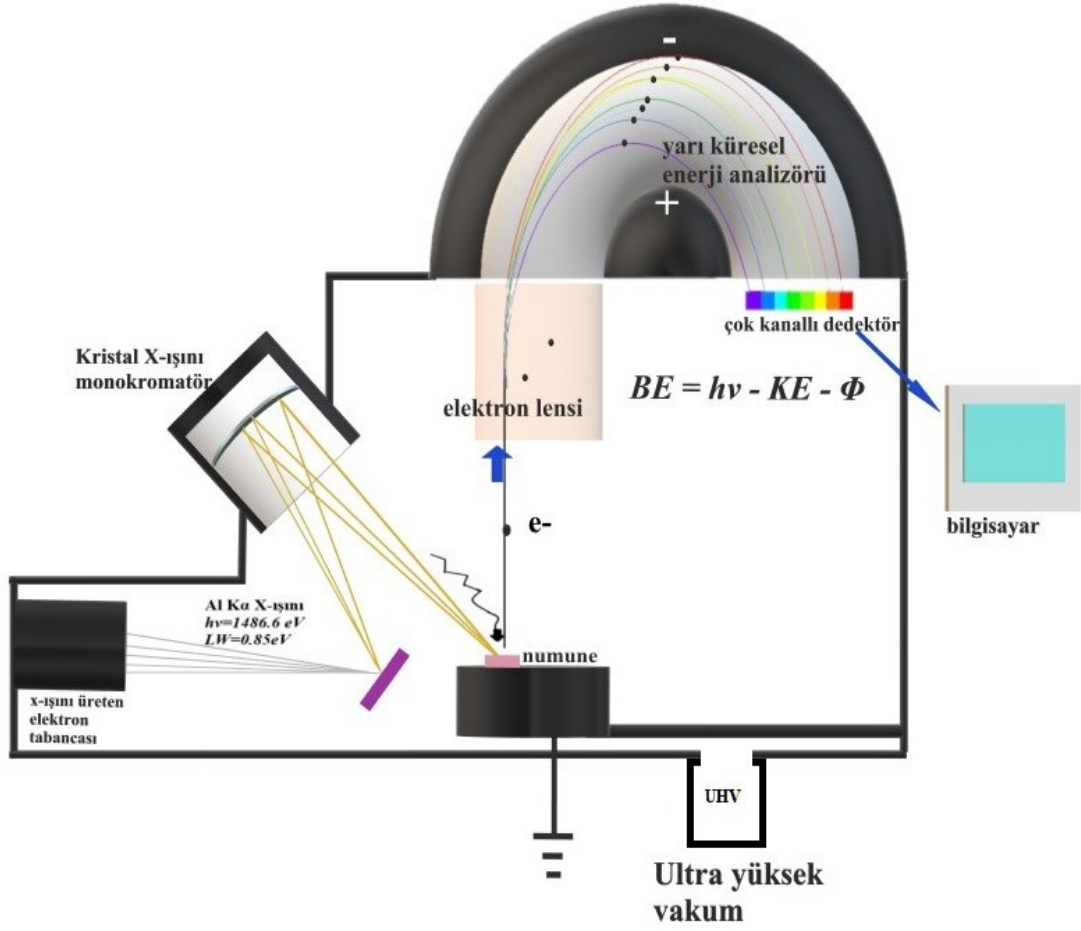
Şekil 3.8’de özet çalışma prensibi verilen taramalı elektron mikroskobunun temelde yedi aşamalı bir çalışma süreci olduğunu düşünülmektedir. İlk aşamada elektron kaynağı olarak adlandırılan ve farklı çeşitleri bulunan elektron hızlandırıcıları temelde 500V ile 30KV arasında uygulanan gerilimle vakum ortamında yol alırken ikinci aşamada elektron demetini manyetik olarak yoğunlaştıran mercek sayesinde mercek açıklığından sızan manyetik şekillendirici alan, Lorentz kuvveti yardımıyla ışının bükülmesini sağlamaktadır. Bu bükülen demet, üçüncü aşamada kaydırma bobinleri ile sistemin ve sonrasında da merceğin optik eksenine kaydırılır. Elektronikteki sağ el kuralı ile iç sargı bobinlerinin oluşturduğu alan yönü Şekil 3.8’de görülmektedir. Dördüncü aşamada doğru optik eksenine yerleştirilen ışının, ışınların geçişini sınırlandıran bir aparat ile filtrelenmesi ile yüzeye ulaşacak birincil elektron demeti için demet çapı ayarı yapılmaktadır. Beşinci aşamada yer alan tarama bobinleri ile kaç

noktanın taranacağı (çözünürlük), her noktanın ne kadar süreyle taranacağı (bekleme süresi) ve numune üzerinde ne kadar büyük bir alanın taranacağı (büyütme miktarı) seçimlerinin yapılması sağlanmaktadır. Takip eden altıncı aşamada ise ışın demeti çapı son kez ikinci bir mercekle yardımıyla ayarlanmaktadır [92]. Yedinci ve son aşamada artık istenen parametrelere göre hazırlanan elektron demeti yüzeye çarptırılıp malzeme analizi için dijitalleştirilmesi gereken sinyaller oluşturulmaktadır. Oluşan sinyallerden ikincil sinyaller önceden bahsedildiği gibi ETD’de ve TLD’de toplanırken; geri yayılan elektron sinyalleri geri saçılan elektron dedektöründe (BSED) toplanır. X-ışınları ise enerji dağıtıcı dedektör (EDS) ile toplanmaktadır. İkincil elektronlar aslında etkileşim hacminin birçok noktasına ulaşsa dahi çok düşük enerjili olmalarından dolayı sadece yüzeye en yakın 10 nm’lik kısma kadar bilgi alınmaktadır. Bunun sebebi ancak bu mesafedeki ikincil elektronların yüzey tarafından emilmeden yüzeyden kaçma fırsatı bulabilmelerinden kaynaklanmaktadır [93].

### **3.4.2. X-Işını Fotoelektron Spektrometresi (XPS)**

Literatür incelendiğinde yüzey analizinde sıklıkla kullanılan X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS)’deki temel prensibin tek enerjili yumuşak X ışınlarının bir numuneye bombardıman edilerek numune yüzeyindeki fotoelektronların bulunduğu kabuktan ayrılmasını sağlamak olduğu ayrıca bu kopartılan fotoelektronların kinetik enerjileri yardımıyla numunede bulunan elementlerin tanımlanmasının yapılabileceği de görülmektedir [57].

Şekil 3.9’da verilen görsele göre x-ışını elektron tabancasından Mg K $\alpha$  veya Al K $\alpha$  yayılım seçeneğinin seçilmesi ile belli hız ve dalga boyunda gönderilen x-ışınları yayılarak ulaştığı monokromatördeki aynaların da yardımıyla numune yüzeyine çarptırılır ve ışının malzemenin yüzey atom elektronlarına kinetik enerji kazandırması sağlanır. Kazandığı kinetik enerjisinin bir kısmını bağlanma enerjisini yok etmede kullanıp artan enerji ile bağlı bulunduğu atomdan kopmayı başaran yüzeye maksimum 10 nm uzaklıktaki fotoelektronlar aynı vakum odasında bulunan bir elektron lensi aracılığı ile yarı küresel enerji analizörü içinde toplanıp yol alırlar.



Şekil 3.9. X - ışını Fotoelektron Spektrometresi (XPS) cihazı temel yapısı ve sinyalin işleniş sürecindeki hareket yolu [94].

Bu yol alma sürecinde analizöre gelen elektronlar, kinetik enerjilerine göre analizör çıkışında toplandıkları bölgede bulunan bir dedektör yardımıyla dalga boylarına göre ayrıştırılıp kayıt altına alınırlar. Bu sayede enerjilerine göre ayrılan sonuç sinyalleri kullanılarak numunenin elementel bilgisi elde edilebilmektedir. Çünkü her elementin atom çekirdeği ve yörünge elektronları arasında yalnızca kendilerine ait ayırt edici bir bağ enerjisi mevcuttur. Örneğin bir karbon atomunun 1s orbitalinden bir elektronu uzaklaştırabilmek için 284 eV miktarında enerji gerekirken başka bir element veya bileşik için bu değer değişecektir [95].

Böylelikle farklı kinetik enerjilere sahip fotoelektronlar enerji analizöründe aldıkları yola göre kategorize edilebileceklerdir. Ancak XPS yönteminin bir dezavantajı olarak atom numarası 3'ten küçük H ve He elementleri hakkında bilgi üretmeyişine değinmek

gerekir ki böylece test edilen malzeme yapısındaki hidrojen varlığının analiz sonuçlarında gözükmeceği açıktır [96].

Yönteme dair diğeri bir dezavantaj ise XPS sürecinin çok yüksek vakum ortamında gerçekleşmesi halinde ortamdaki basınç nedeniyle ile malzeme formu değışmeyecek ve yalnızca toz veya cisim halindeki katı numunelerde ölçüm sınırlaması bulunacaktır.

Şekil 3.9’da verilen  $BE=h\nu-KE-\Phi$  parametreleri sırasıyla şöyle özetlenebilir:

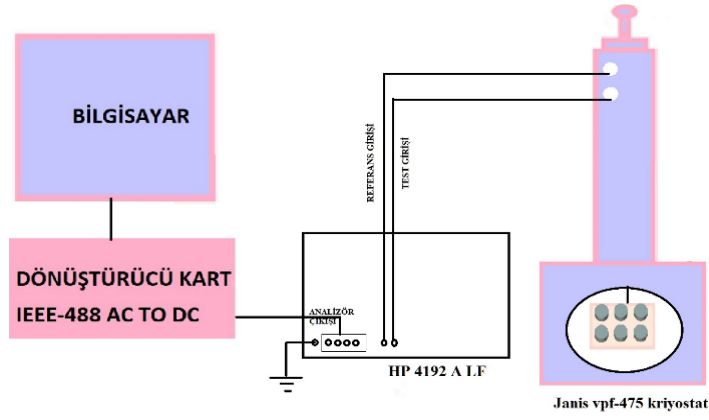
- BE: X-ışınına maruz kaldıktan sonra bağılı bulunduğu atomun enerji kabuğundan koparak yayılma hareketi gösteren numune elektronunun, bu hareketten önce bağılı olduğu atomla arasında bulunan bağı enerjisidir.
- h: Plank sabitidir( $h=6,62.10^{-34}J.sn$ ).
- v: x-ışınının frekansıdır.
- Hv: Kaynağın foton enerjisidir.
- KE: Yayılma hareketini oluşturan fotoelektronun kinetik enerjisidir.
- $\Phi$ : Kapalı vakum ortam değışkeni

Bu değışkenlerden yararlanılarak bilinen parametrelerin hesaplanmasıyla bağı enerjisi dağılımını elde edilebilmektedir.

### 3.4.3. Empedans Analizörü

Hewlett Packard 4192A LF empedans analizörü, 5 Hz-13 MHz arası frekans, (- 35) V ve (+ 35) V arası voltaj ölçüm aralığında seri eşdeğer devre ölçümü ile mutlak empedans ( $|Z|$ ), direnç (R), reaktans (X); paralel eşdeğer devre ölçümünde ise mutlak admitans ( $|Y|$ ), kondüktans (G), süseptans (B) ölçümlerini yapabilmektedir [97].





Şekil 3.10. Elektriksel ölçümler düzeneği.

Kullanılan ölçüm cihazları aşağıdaki şekilde verilmiştir.



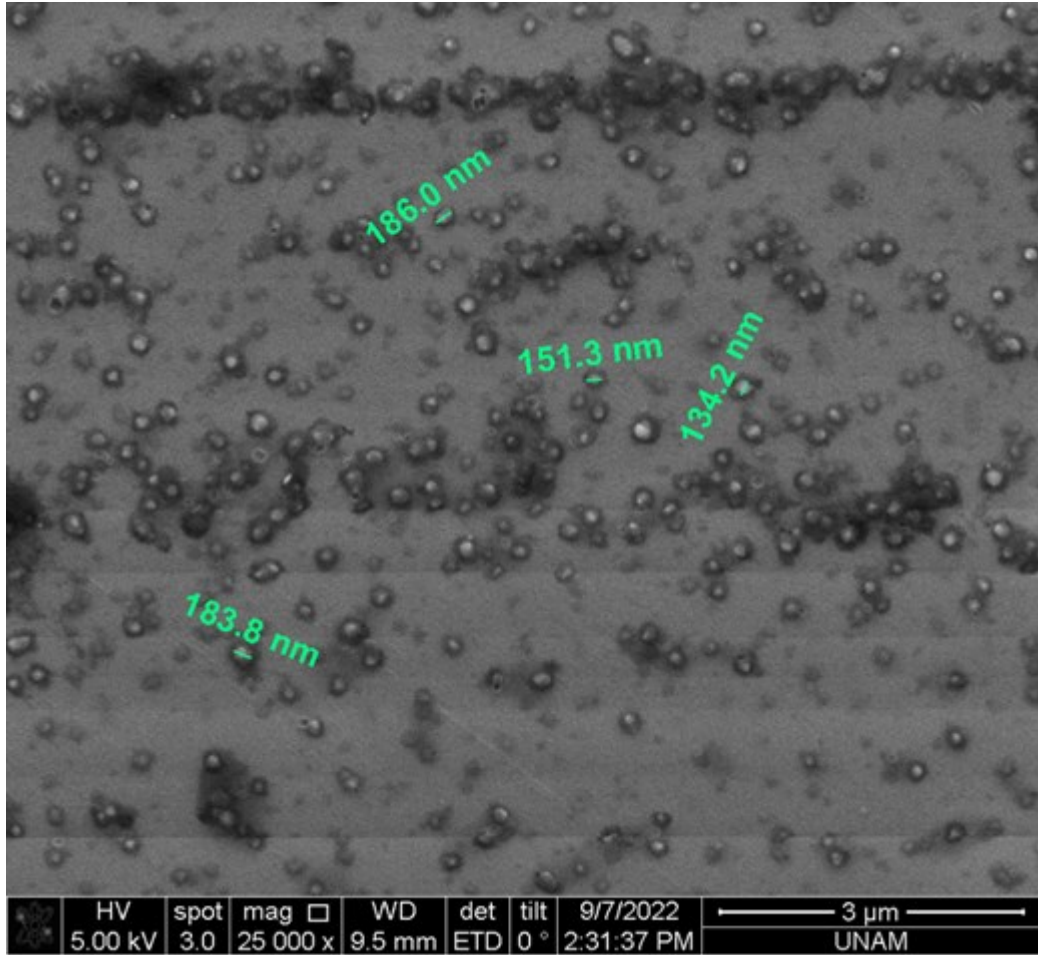
Şekil 3.11. Kullanılan ölçüm cihazları.

## BÖLÜM 4

### ARAŞTIRMA BULGULARI

#### 4.1. MALZEME YAPISI YÜZEY ANALİZİ

##### 4.1.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (Sem) Analizi



Şekil 4.1. N:DLC filminin taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi.

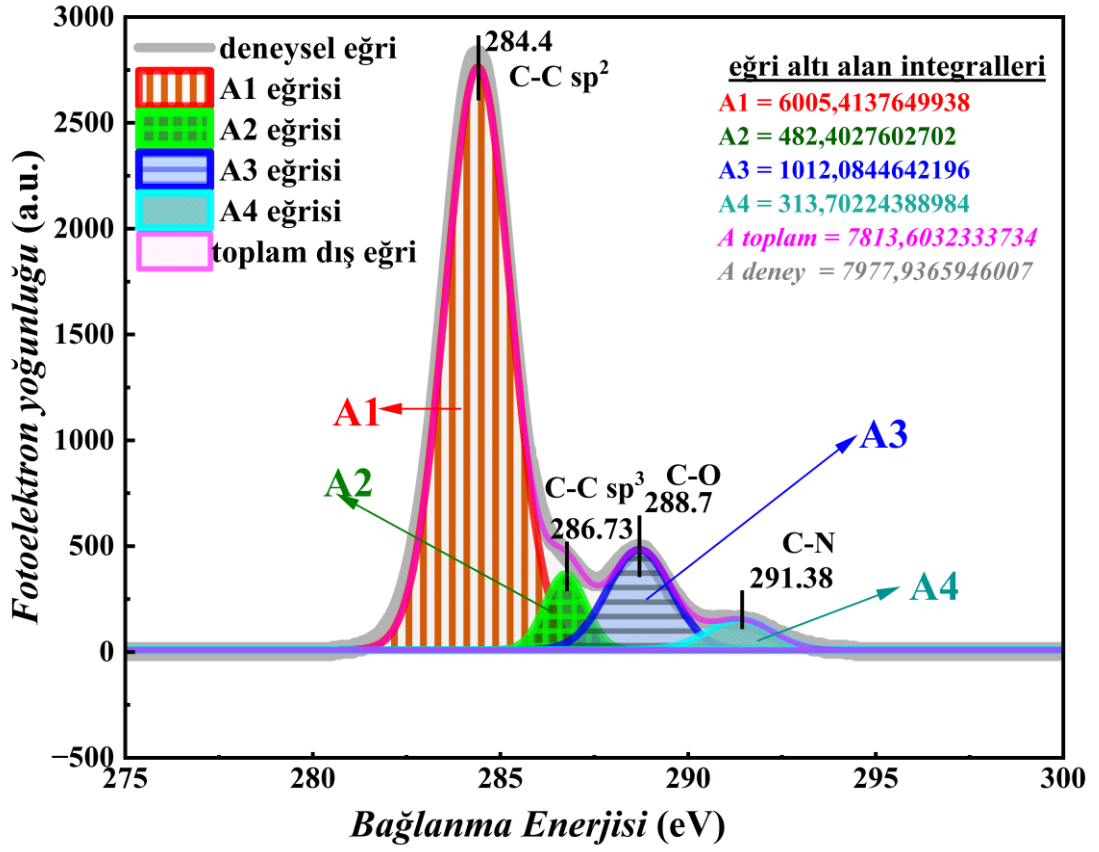
SEM analizinden anlaşıldığı üzere kaplanan alttaş, film yüzeyinde süreklilik gösteren çeşitli küresel parçacıklardan oluşmaktadır. Boyutları 134 ila 250 nm arasında değişen

N:DLC film parçacıkları, bazı bölgelerde tek sıra halinde dizilim eğiliminde olup film yapısı silikon yüzeyini tamamen kaplamaktadır. Ölçüm sisteminde anlatıldığı üzere SEM çıkışı yüzey bilgisini 100 nm'ye kadar vermektedir. Ancak Şekil 4.1'den anlaşılacağı üzere ETD dedektörü 10 nm lik derinlik tercihi ile geri yayılan elektronların bir kısmını içerse dahi ölçüm çoğunlukla ikincil elektron verisiyle yapılmıştır ve sağladığı görüntü ile neredeyse 3 boyutlu diyeceğimiz yüzey oluşumları net bir şekilde gözlenmektedir. Bu yapıların belli yerlerde düzlemsel sıralı belli yerlerde ise kümeler halinde oluşu yapının belli bölgelerde olası farklı moleküler yapılanmasına işaret edebilmektedir.

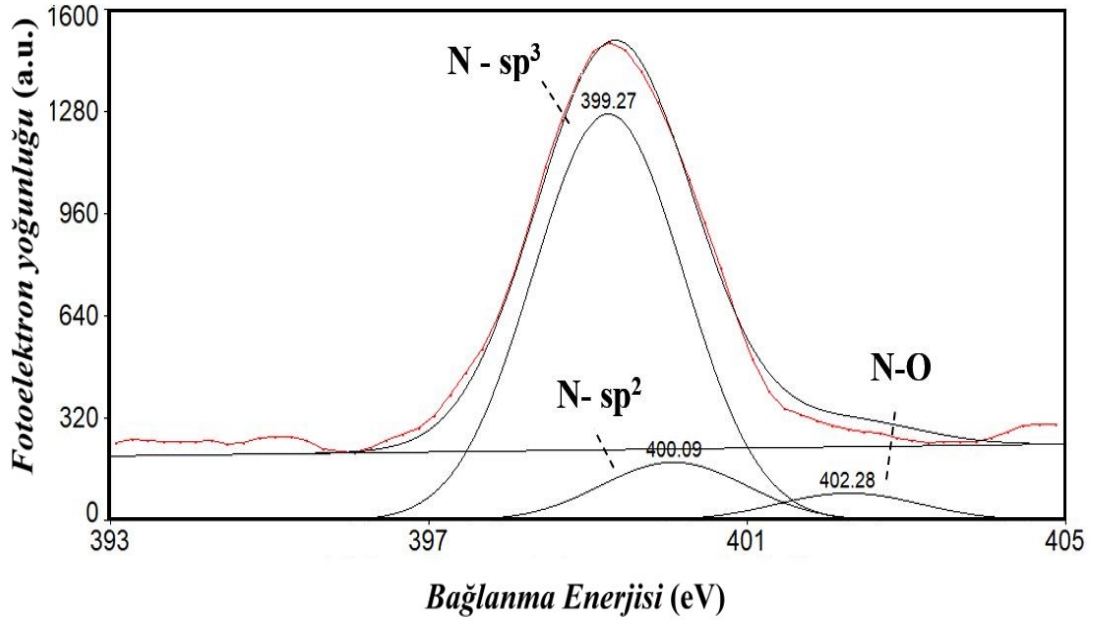
Özellikle filme yapılan azot katkısı ve film içinde oluşabilecek çeşitli bağ açlarına sahip farklı karbon molekülleri ele alındığında azotun bu alt guruplar üzerinde değerlik elektron paylaşımını ve elektron ilgisine göre davranışını değiştirmesi olasıdır Ayrıca malzemenin taşıyıcı elementi olan karbonun yapı genelindeki örgüsünde bu noktasal kusur niteliği de taşıyan azotun, etrafına uygulayacağı Coulomb ve Lorentz kuvvetleri de farklı olabileceğinden yapıda olası farklı karbon formlarının kendi aralarında benzer yığın oluşturduğu kümelere dahil olması durumunda farklı şekiller üretmesi muhtemeldir. Yapının üç boyutluya yakın görüntüsünü bozmamak adına kontrast ayarı için BSED dedektörü etkin değildir.

#### **4.1.2. XPS Analizi**

XPS analizi sonucu oluşturulan veriler Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilmiştir. Buna göre N:DLC filminin spektro analizi, eğri uydurma fonksiyonlarıyla oluşturulmuş C1 spektrum eğrisi ile, Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Filmin C1 spektrumu 284,4 eV'de  $sp^2$  C-C bağlarından, 286,73 eV'de  $sp^3$  C-C bağlarından, 288,7 eV'de C-O bağlarından ve 291,38 eV'de C-N bağlarından ayrılmıştır ve benzer örnekleri çeşitli çalışmalarda verilen değerlerle uyumludur [54,59,75].



Şekil 4.2. XPS Spekturumunda C1 Pikleri.



Şekil 4.3. XPS Spekturumunda N1 Pikleri.

Şekil 4.3'te görülebileceği gibi, azot katkılı DLC ince filmin ayrıntılı N1 spektrum analizinde üç pik gözlenmektedir.  $sp^3$  koordinatlı C atomlarına bağlanan N atomlarının (N-C  $sp^3$ ),  $sp^2$  koordinatlı C atomlarına bağlanan N atomlarının (N-C  $sp^2$ ) ve N-O bağlarının oluşturduğu pikler sırasıyla 399,27 eV, 400,09 eV ve 402,28 eV değerlerine sahiptir [55]. Yüzey oksijeni, tepedeki geniş bandın N-O bağlarına bağlanmasına neden olmuştur [44].

Pratik olarak Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 görüldüğü üzere, bu çalışmadaki bağ oluşumlarının oranı,  $sp^2$  ve  $sp^3$  hibritleşmiş atom oluşumunun, diğer hibritleşmelere göre daha büyük Gauss eğrisi alt alanlarına sahip olması nedeniyle ana yapıyı oluşturduklarını ortaya koymaktadır. Ayrıca şekillerde anlaşılacağı üzere ve DLC yapısında malzemenin doğası gereği taşıyıcı matrisin karbon bileşenli bir kafes olduğunu düşününce özellikle şekil 4.2'ye göre  $sp^2$  oranının  $sp^3$ 'ten fazla olduğu görülmektedir. Yapıdaki  $sp^3$  arttıkça malzeme dayanımı sertliği gibi mekanik özellikler artarken  $sp^2$  oranı arttıkça yapının elektriksel özellikleri güçlenmektedir [55].

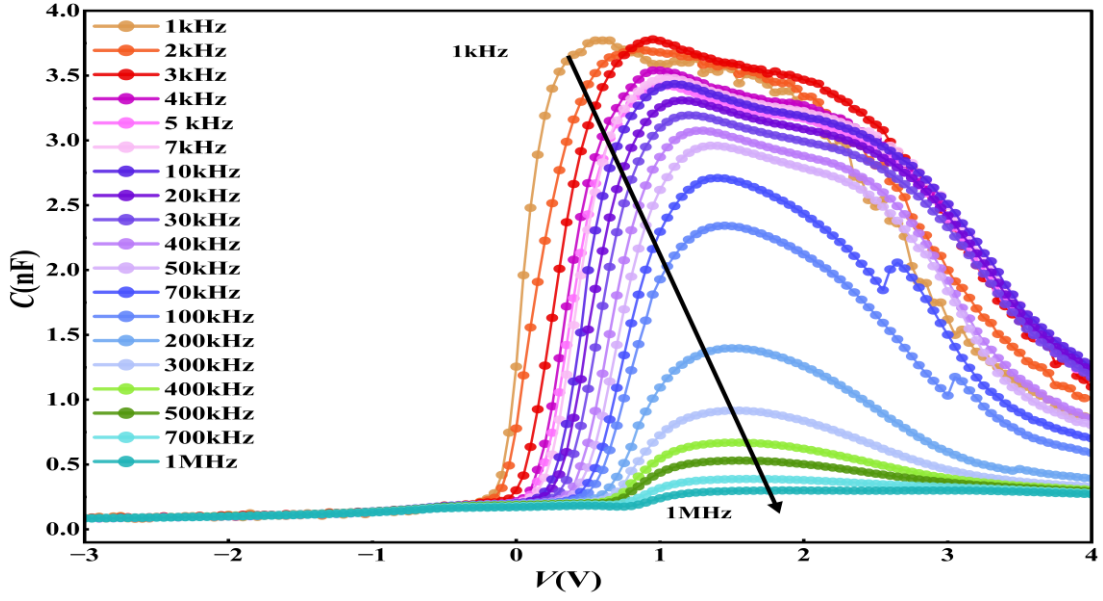
Yani yapı  $sp^2$  oranı arttıkça daha çok grafit benzerken  $sp^3$  oranı arttıkça daha çok elmas yapısına yaklaşır. XPS sonuçları ölçüm metodu başlığında da belirtildiği üzere belli bir enerji engelini aşabilen fotoelektronların dağılımın ürettiği bir sonuç olduğu için verdiği bilgi güvenilirdir. Ancak ortaya çıkan sonuç element bileşimleri arası göreceli oransal bir dağılımdır. Daha detaylı inceleme için Raman spektroskopisi ile titreşimsel ölçümler de yapılabilir [59,75,98].

Ayrıca hidrojenin düşük enerjisi cihaz enerji kanalındaki yolculuğunda yetersiz kaldığından XPS sonuçlarında tam da beklendiği gibi gözlemlenmemiştir.

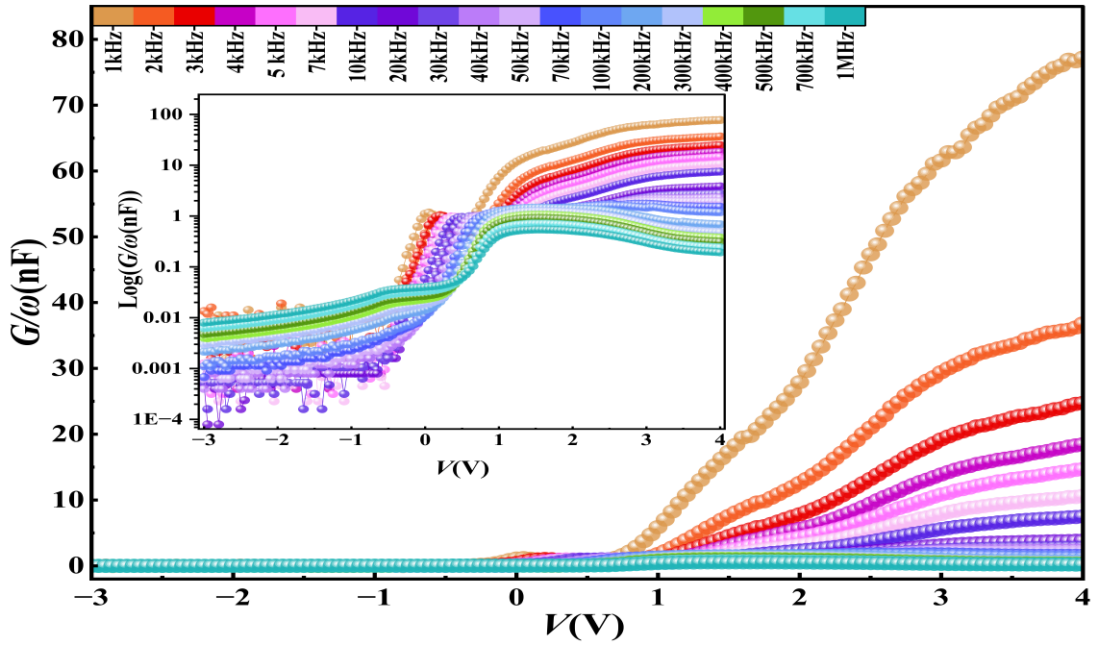
#### **4.2. KAPASİTANS-VOLTAJ VE KONDÜKTANS-VOLTAJ DEĞERLERİ**

Dielektrik analizinde gerekli parametreler için admitans-voltaj ( $Y=1/Z=G+j\omega C$ ) ölçümlerinde yapılan hesaplamalar kullanılmıştır. Elde edilen sonraki değerlere kaynaklık eden  $C-V$  ve  $G/\omega-V$  verileri Şekil 4.4 içinde ardışık olarak verilmiştir.

Şekil 4.4'teki  $C-V$  eğrisi incelendiğinde yapının keskin farklı çalışma bölgeleri göze çarpmaktadır. Bu bölgelerin ayrıntıları karşılık gelen dielektrik parametreleri grafiklerinde belirtilmiştir. Ancak  $C-V$  eğrisinde de görüldüğü üzere negatif polarizasyonda kapasitans neredeyse sıfır değeri civarında sabite yakın ölçekte değişmektedir. Bu bölgede giriş sinyaline cihaz tepkisi hem yük depolama hem de yük geçişi açısından pasif kabul edilebilir. Ancak belirtmek gerekir ki bu bölgede kapasitans değeri tamamen sıfır değildir. Örneğin 1. çalışma aralığındaki (- 3V) gerilim değerinde kapasitans bütün ölçüm frekans aralığında 0,0083-0,0088 nF arası çeşitli değerler alırken bu bölgenin sonlarında örneğin (- 0,2V) gerilim değerinde 0,24 nF ile 0,16 nF arasında değişmektedir. Bu yükseliş ikinci çalışma bölgesine geçişin de bir göstergesidir. Çünkü ikinci bölgeden itibaren artık cihazın yük depolama kabiliyeti ilave ara katman nedeniyle cihazdan beklenen ve Şekil 4.4'te gözlemlendiği üzere artış eğilimindedir. Ayrıca artan frekansa bağlı bütün gerilim değerleri için cihazın genel yük depolama kabiliyeti azalan kapasitans ile azalsa dahi ikinci bölgenin başından sonlarına doğru yaklaşık 0,8V civarına kadar her frekanstaki sinyal için ayrı ayrı artış göstermektedir. Bu durum kullanılan DLC ara katmanın ilgili aralıktaki yalıtkanlık açısından görevini yerine getirdiğine işaret etmektedir. Ancak yalnızca kapasitans eğrisine bakılarak bu sonuca kesin olarak ulaşılması kullanılan ara katmanın doğrudan performansı için herhangi bir karşılaştırma verisi içermemesi nedeniyle doğru bir yaklaşım değildir. Bu nedenle, ölçülen kapasitans için vakum boşluğunun dielektrik olarak seçildiği bileşen karşılaştırması bir göreceye izin vermektedir ki ancak bu karşılaştırma sonucunda ancak doğru bir yorum yapılabilmektedir. Böylece malzemenin yük depolama, kayıp, kayıp açısı, ıraksamalar vb. bütünsel dielektrik parametreleri de bir arada incelenerek genel sonuca varılabilir.



(a)



(b)

Şekil 4.4. a)  $C$  (nF) -  $V$  (V) ve b)  $G/\omega$  (nF) -  $V$  (V).

Bununla beraber örneğin 0,8 V ve 3 kHz’de 3,71 nF gibi büyük bir değere ulaşır, 1 MHz’de 0,18 nF civarında değer alan kapasitans, voltaj aralığının ortalarında örneğin 3 V ve 3 kHz için 2,38 nF iken 1 MHz’de 0,3 nF’a düşmektedir. Bu da ikinci bölgede  $R_s$  ve  $N_{ss}$  kaynaklı düşen yüksek kapasitif davranışın varlığının yanında bütün çalışma bölgelerindeki genel cihaz tepkisinde frekans bağımlılığının voltaja göre üstün etkisini ortaya koymaktadır. Benzer sonuçlara ilerleyen bölüm içeriğinde türetilen dielektrik

parametrelerinde ve iletkenlik davranışında da yer verilmiştir. Bu artan frekans aralığında arayüzeysel kutuplamalar etkinliğini yitireceğinden yüzey yüklerinin başlangıçta dinamik alandan elde ettiği enerjiyi yüzeyde tuzaklanarak veya rekombinasyon yaparak harcayacak ve bulunduğu enerji ve konumunda sabitlenme eğilimi gösterecektir. Frekans arttıkça etkin kutuplama arayüzey etkilerinden arınırken yönelimsel/dipolar kutuplamaya doğru kaymaktadır. Dolayısıyla cihazın genelinde artan frekans ile ortadan kaybolan uzay kapasitansı etkisiyle toplam kapasite değerinin düşmesi beklenen bir sonuç olmaktadır.

Cihazın Şekil 4.4'teki  $G/\omega - V$  eğrisi incelendiğinde ise özellikle iç grafikte logaritmik gösterimi yapılan kondüktans değerinin benzer üç bölgeyi sinyal tepkisi belirgindir. Kondüktans değerleri artan voltaja bağlı olarak birinci bölgede, üçüncü bölgedeki göreceli yüksek değerlere kıyasla sıfıra yakın ve dolayısıyla ihmal edilebilir küçük değerler alırken, ikinci bölgenin başından sonuna kadar artmaktadır. Ayrıca ideal MIS yapıda teoride olmaması gereken ıraksamalar yüzey yük dağılımı ve sinyal cevap süresine geç verilen tepki nedeniyle bazı düşük ve orta frekanslarda kondüktansın birinci bölgesinde gözlenmektedir. İletimin net şekilde belirginleştiği yüksek voltaj skalasına tekabül eden üçüncü bölgede ise kondüktansın frekans artışı ile düşüşe geçtiği gözlemlenmiştir.

### 4.3. DİELEKTRİK ÖZELLİKLER

Al/N:DLC/p-Si/Au yapısının dielektrik analizi, 1 kHz - 1 MHz ve (- 3) V - (+ 4) V aralıkları boyunca oda sıcaklığında gerçekleştirilen  $C-V$  ve  $G/\omega-V$  ölçümlerinden verilerin çıkarılmasıyla elde edilmiştir. Karmaşık dielektrik geçirgenliğin ( $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$ ) faz içi ( $\varepsilon'$ ) ve faz dışı ( $\varepsilon''$ ) bileşenleri ölçülen  $C_m$  ve  $G_m$  değerlerinden çıkarılarak dielektrik parametreleri Eşitlik 4.1'de elde edilmiş ve Eşitlik 4.2'de tanjant kaybında (ısı kaybı:  $\tan\delta$ ) yerine yazılmıştır.

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j \cdot \varepsilon''(\omega) = \left(\frac{C_m}{c_0}\right) - j \cdot \left(\frac{G_m}{\omega \cdot c_0}\right) \quad (4.1)$$

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = \frac{G_m}{\omega \cdot C_m} \quad (4.2)$$



Vakum kapasitansı  $C_o = (\epsilon_0 \cdot A) / d_i = 6.95$  pF olarak hesaplanmıştır. Burada A; MIS yapının Schottky kontak alanı ( $A=0.00785$  cm<sup>2</sup>),  $d_i$  arayüzey kalınlığı ( $d_i=10^{-6}$  m),  $\epsilon_0$  boş uzayın geçirgenliği ( $\epsilon_0=8.854 \times 10^{-12}$  F/m) olarak adlandırılmaktadır.  $C_m$  ve  $G_m$  değerleri sırasıyla ölçülen kapasitans ve kondüktans değerleridir. Ölçümler dinamik elektrik alan gereği frekans bağı olarak gerçekleştirilmiştir.

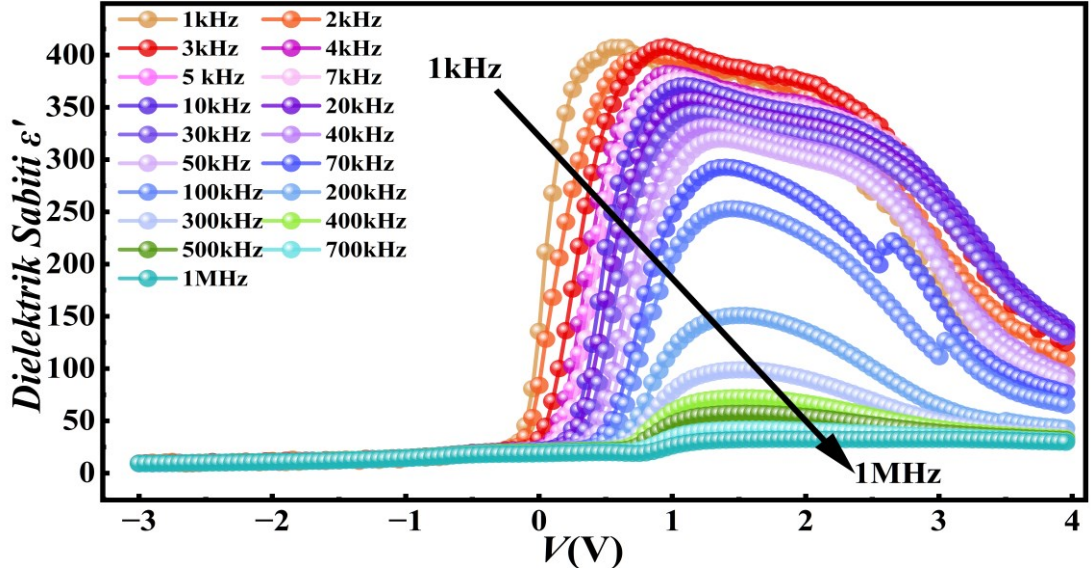
#### 4.3.1. Karmaşık Dielektrik Geçirgenlik Bileşenleri ( $\epsilon'$ , $\epsilon''$ )

Eşitlik 4.1'e göre elde edilen değerlerde Şekil 4.5'te dielektrik sabitinin ve Şekil 4.6'da dielektrik kaybının voltaja ve frekansa bağlı davranışı incelenmiştir. İncelenen MIS yapının yalıtkan  $d_i$  kalınlığı bir MS kontağın kapasitör gibi çalışması için literatürde verilen limit değerden yeterince büyük olduğundan oluşturulan yapıda kapasitör davranışı beklenen bir sonuç olarak ortaya çıkmaktadır [99].

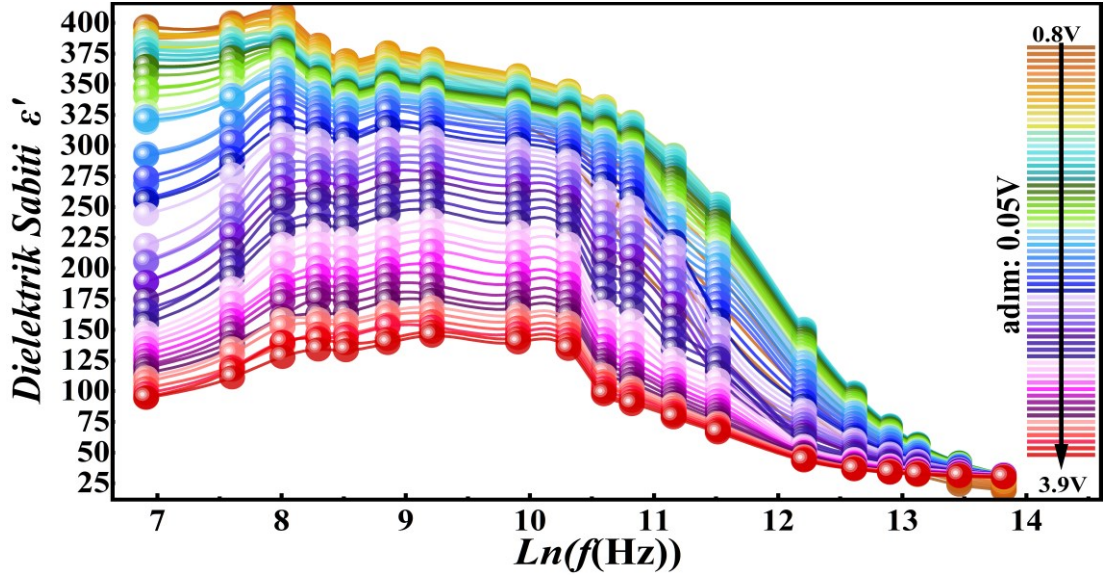
Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da voltaj bağımlı grafiklere bakıldığında,  $\epsilon' - V$  ve  $\epsilon'' - V$  grafiklerinin her ikisinin de MOS kapasitörün  $C-V$  ve  $G/\omega - V$  grafikleri gibi üç farklı rejim sergiledikleri görülmektedir [8].

Bu bölgeler sırasıyla (-3) V ve (-0,3) V arasında terslenim, (-0,2) V ve (+0,8) V arasında tüketim ve (+0,8) V'dan büyük değerlerde birikim bölgelerine tekabül etmektedir. (+1) V civarında  $\epsilon' - V$  değerleri her bir frekans için ayrı ayrı piklere sahiptir ve yapıya uygulanan gerilim,  $R_s$ ,  $N_{ss}$ , yönelimsel ve yüzey kutuplamaları ile tüketim bölgesi arasında dağıtıldığından  $\epsilon' - V$  grafiklerinde ortaya çıkan bu pikler tüketim bölgesiyle ilişkilendirilir [100].

$\epsilon' - V$  grafiğinin tepe değerleri artan frekansla azalırken, dinamik alana yanıt olarak arayüzey durumlarının yeniden düzenlenip üretilmesi ile bu piklerin konumu birikim bölgesi yönüne kaymaktadır. Birikim bölgesine kadar, yalıtım katmanının varlığı nedeniyle  $\epsilon'$  değerlerinin çoğunlukla voltaj arttıkça yükseldiği açıkça görülmektedir. Ancak tüketim bölgesi etkinliğini yitirip birikim bölgesi koşulları ortaya çıkınca bu kez de uygulanan gerilim arttırılsa dahi  $\epsilon'$  değerleri düşmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.5. a)  $\epsilon' - V$  (V), b)  $\epsilon' - \ln(f)$ .

Örneğin Şekil 4.5'teki dielektrik sabitinin voltaja bağlı davranışı için 0,55 V / 1 kHz ve 0,95 V / 3 kHz düşük pikleri veya 2,65 V / 70 kHz ve 3,05 V / 100 kHz orta pikleri ele alındığında düşük piklerin arayüzey etkili mekanizmalarla, orta piklerin ise kutuplama mekanizması ile arayüzden dipolara kayması ve aynı zamanda tuzak yüklerin artan frekansı takip edecek ömrü olmaması nedeniyle dielektrik sabitindeki azalma yapının iletim davranışına bağlı artan  $R_S$  kayıpları ile ilişkilendirilebilir. Çünkü tüketim bölgesinden sonra artık uzay yükü kapasitansı da etkinliğini yitirmektedir. Bu durumun ortaya çıkmasında yalnızca frekansın değil artan gerilimin de katkısı

bulunmaktadır. Ancak aynı gerilim değerinde herhangi iki frekansı grafik üzerinden karşılaştırdığımızda dielektrik sabitindeki bu düşüşte frekansın gerilime göre bağlı etkinliğinin üstün olduğu açıkça gözlemlenmektedir.

Dielektrik sabitinin Şekil 4.5'teki frekansa bağlı davranışı incelendiğinde ise frekans artışıyla etkisini kaybettiği net bir biçimde görülmektedir. Ancak dielektrik sabitinin gerilime bağlı davranışı gözlemlendiğinde, terslenim bölgesindeki sabitliği, tüketim bölgesinde yüksek değerlere çıkıp birikim bölgesinde tekrar düşmesi yapının tüketim bölgesi boyunca kapasitif davranış gösterdiğine işaret etmektedir ki bu özellik cihazın yük depolama kabiliyetinin bir göstergesidir. Bu da açıkça göstermektedir ki eklenen ara katman iyi bir yalıtıcıdır. Ayrıca burada geçişler kademeli şekilde olmaktadır ki tüketim biter bitmez yüksek bir iletim yoktur. Bunun sebebini de yine kapasitans eğrisinde olduğu gibi yapının etkin kutuplanma-iletim-kayıp mekanizmalarıyla ilişkilendirebiliriz. Ayrıca devreden uzay yükü etkileri çıktığında, uzay yükü kapasitansına göre daha baskın olduğu grafikten anlaşılan geometrik kapasitansın, iletimin hem zaman hem de frekans skalasında etkin bir değerde cihaz karakteristiğine katkı yaptığı bilinmektedir.

Şekil 4.6 incelendiğinde,  $\epsilon''-V$  eğrilerinin 0 V civarında küçük pikler verdiği ve sonrasında ise azalan frekansla ve artan gerilimle artan değerler almakta olduğu görülmektedir. Bu düşük pikler tüketim bölgesinin grafiğe bir yansıması olabilmektedir. Çünkü cihaz tüketim bölgesindeyken bu bölgenin artan gerilimle daralması ile yarıiletken hacminin kutuplanma etkisi azalmakta tersine iç yüzeydeki polarize yüklerin yüzeyden malzemeye dağılmasıyla iç bölgesinde/hacminde yük geçişlerine olanak tanımaktadır. Dolayısıyla yüzeylerdeki değişen kutuplanma mekanizmaları ve yük geçişleri nedeniyle yapı genelinde ısıl kayıplar olarak ortaya çıkmaktadır.

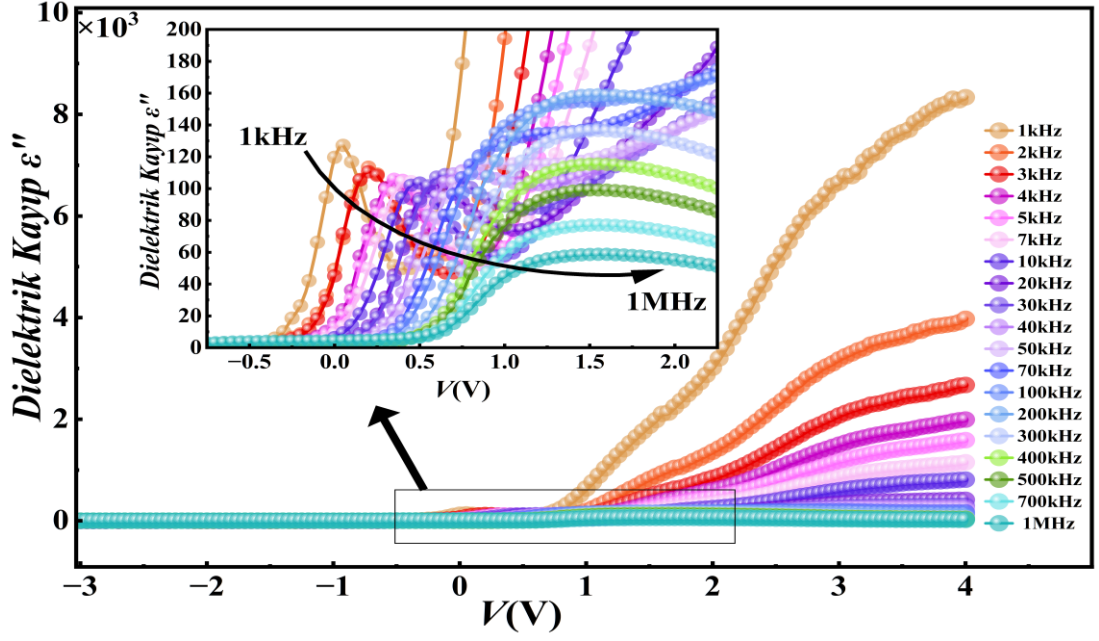
Ayrıca tüketim bölgesi genişliğinin düşmesi aynı zamanda iletkenliği arttırdığından bu bölge tükenirken  $R_S$  etkisi de kısmen artan iletim ile bir miktar artmaya başlar ki bu da kayıplar kategorisinde yer almaktadır. Şekil 4.6'daki dielektrik kayıp değerlerinin, frekans bağımlı kayıp eğrilerinde artan frekans ile bütün gerilim değerleri için düştüğü ancak gerilim arttıkça kayıp değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu grafiğin iç

grafiğinde sinyalin belli bir frekanstan sonra gerilimlere göre ters hareket ettiği kavşak veya kesişim davranışı dikkat çekicidir. Çünkü bu kavşak bölgesi cihazın çalışma aralığında değişikliklere işaret etmektedir. Bu durum, üretilen dielektrik filmin karmaşık moleküler yapısından ileri gelebilmektedir.

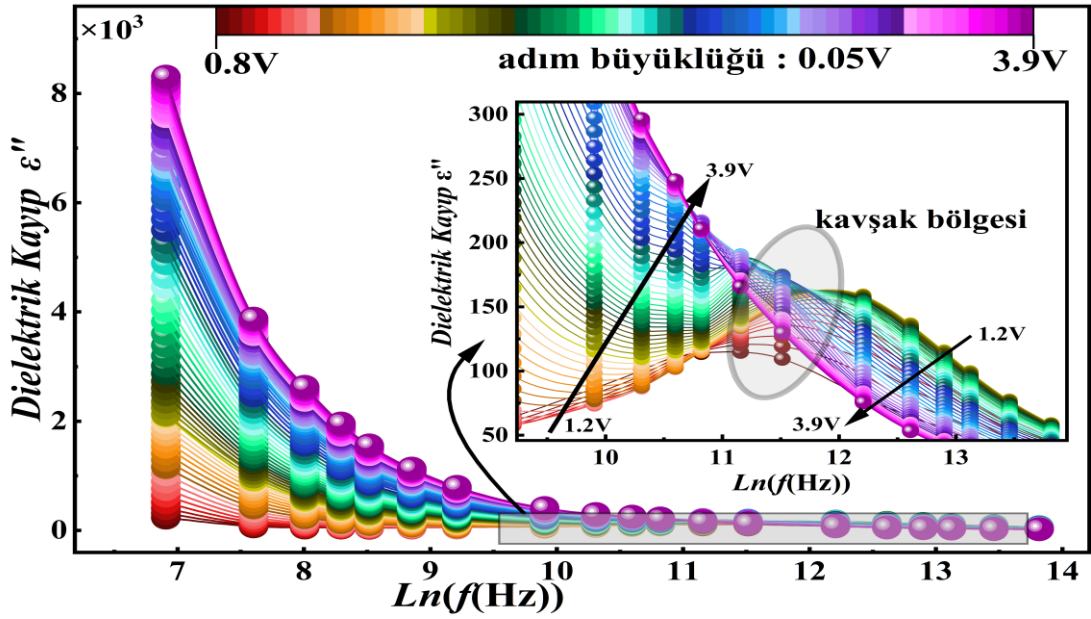
Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'dan görüleceği üzere voltaja bağlı grafiklerde hem  $\epsilon'$  hem de  $\epsilon''$ , düşük pikler vermekte olup tüketim bölgesine işaret etmektedir. Diğer yandan  $\epsilon'$ , birikim bölgesinde artan beslem ile azalırken  $\epsilon''$  değerleri tersine artış göstermektedir. Bu durum,  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  arasında yükü depolayabilme ve bu yükten kurtulma eğilimi arasında bir değiş tokuş mekanizması olduğunu göstermekte olup manyetik alanda depolanan enerjiyi dinamik alan değişimiyle akım olarak akıtan bobin benzeri indüktif bir davranışla bağdaştırılabilir. Böylece tıpkı bobin örneğindeki gibi var olan enerjinin  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  arasında karşılıklı form değiştirmesi, MIS yapıda iki metal uç arasındaki artan potansiyel farkın katman yüzey potansiyellerine yansması ve var olan yük birikimlerini dağıtma davranışı ile yarıiletkenin ortasında biriktirdiği tüketim bölgesi yükleri mevcut konumlarından ayrılarak yarıiletken içine difüze olmaya başlamaktadır. Ayrıca bu bölgenin küçülmesi ile sistemde yer değiştiren yük taşıyıcıların yer değişimi, mevcut tuzaklardaki yüklerin bu artan gerilim ile valans banttan elektron koparacak enerjiye ulaşp mobilite artışıyla tuzaklardan ayrılması veya bir tuzaktan diğerine atlaması, deşiklerin bu mobil yüklerce dolup boşalması süreçleri nedeniyle sürüklenme iletimi oluşabilmektedir. Tüm bu süreçlerde meydana gelen hareketlerin sonucunda ısı kayıplar ortaya çıkabilmektedir.

Dolayısıyla gerilim arttıkça tüketim bölgesi yük taşıyıcılarını bir arada tutan potansiyel farkın dayanımı azalacağından ve bu hareketlenme süreçlerinin miktarı da artacağından ısı kayıpların da artması beklenmektedir. İşte bu enerji depolama-harcama dengesinin değişmesi  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  arasındaki karşılıklı değişimin nedenlerinden biri olarak ortaya çıkmaktadır. Böylece elektrik devrelerindeki ani parazitik sinyal artışları gibi kayıp kaynaklı  $\epsilon''$  pikleri de benzer şekilde gözlemlenebilir ve bu piklerin varlığı aynı zamanda tüketimden çıkıldığının veya iletme geçişin bir işareti kabul edilebilir. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gerilime bağlı değişimlerde terslenim bölgelerindeki sabit eğim ele alındığında gözlemlenen ve literatürde de yaygın olarak

karşılaşılan bu durum, daha önceki bir çalışmada tanımlanan indüktif davranışla benzerdir [101].



(a)



(b)

Şekil 4.6. a)  $\epsilon'' - V(V)$ , b)  $\epsilon'' - \ln(f)$ .

Şekil 4.5 ve 4.6'daki  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  değerleri hem gerilime hem de frekansa bağlı olup artan frekans ile azalmaktadırlar. Bu durumun yapının polarizasyonu ve yüzey yük dağılımının etkisi ile ortaya çıktığı düşünülmektedir [102].

Ayrıca hesaplanan değerlere göre sırasıyla 1 MHz / 0,55 V için 29 ve 1 kHz / 0,55 V için 407 değerlerindeki dielektrik sabiti ile, SiO<sub>2</sub> gibi MIS yapılarda yaygın olarak kullanılan ara katmanlara kıyasla daha yüksek dielektrik değerlerinden dolayı, alternatif olarak N-DLC'nin kullanımının cihaz performansını arttıracığı düşünülmektedir [63,64,103].

### 4.3.2. Kayıp Tanjant Değeri ( $\tan \delta$ )

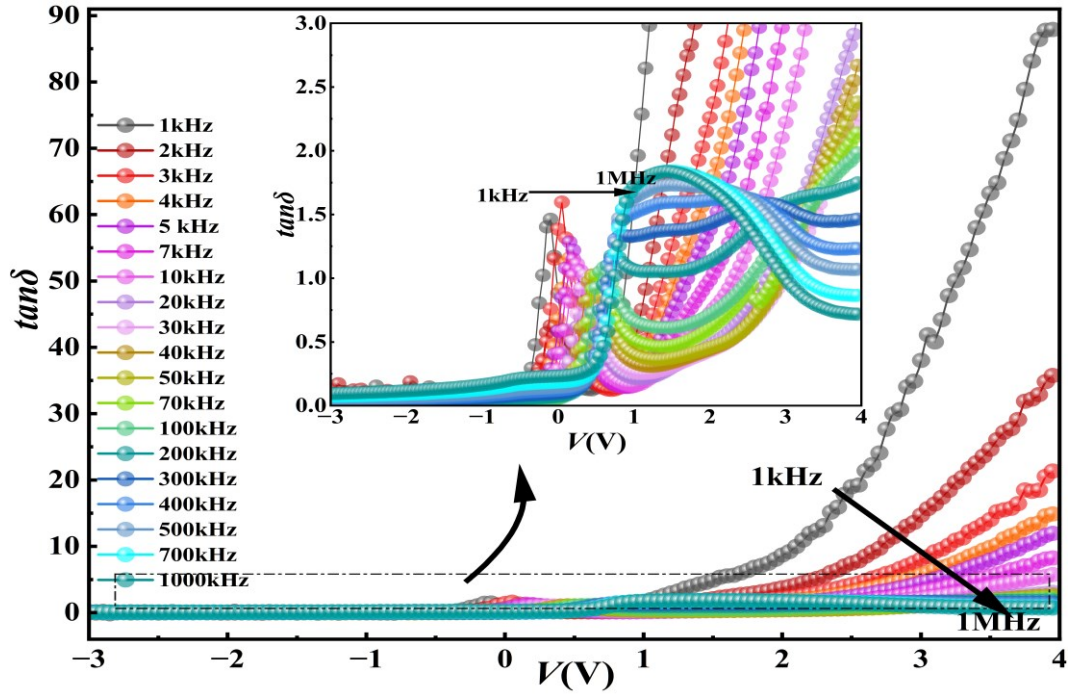
Yarıiletkendeki kritik eşik gerilimi aşıldıkten ve aşıldıktan sonra meydana gelen yük geçişleri dolaylı bant aralığına sahip p-tipi bir silikon için katkısız bir yarıiletkene göre daha zorlanmış dolaylı bir yük yoluna sahip olduğundan elektrik alan artışıyla kazanılan enerji bu yolu kateterken ısı kayıp olarak sistemdeki diğer ısı kayıplara katkıda bulunabilmektedir [79]. Bu kayıpların tümünün sistemden aldığı enerji, değişen voltaj bölgelerindeki pikler ve değişen eğim ile gözlenmektedir. Şekil 4.7'de gerilime bağlı değişimlere bakıldığında iç grafikteki tüketim bölgesi pikleri terslenim fazının bitişiyle artan yük hareketleri kayıplarının yapıda depolanan enerjiye oranını göstermektedir. Buna göre yarıiletken bariyerinin artan alanla dağılmasıyla artan kayıpların miktarı yapıda depo edilen enerjiye göre 0 - 1 V arasında kısmen artarken kendini önce artan sonra azalan piklerle göstermektedir. Bu bariyer tamamen ortadan kalktığına ise, artık çoğunlukla iletim davranışından kaynaklı artan enerji kayıplarının azalan enerjiye oranı çıkış sinyalindeki yükselen eğim ile kendini göstermektedir. Eğimdeki bu artış düşük frekanslara gidildikçe artmakta ancak yüksek frekanslarda ise çok düşük değerlere doğru sabitlenme eğilimi göstermektedir. Bu durumun temel sebebi yük ömrünün düşük frekanslarda malzemede alan gevşemesine izin verecek şekilde uzun oluşu ve yüksek frekanslarda alan sinyalini yakalayamayan kutuplama mekanizmaları ile açıklanabilir. Yüksek frekans bölgesindeki bu düz eğim yapının yüksek frekanslarda daha iyi bir kayıp oranına sahip olduğunu ve dolayısıyla bu frekanslarda çalıştırılırsa verimli bir elektronik eleman olabileceğini göstermektedir. Ayrıca tüketim bölgesinde artıp azalan  $R_S$  ve arayüz kaynaklı kayıp

enerji oranının, birikim bölgesinde gerilim ile artarken frekans ile azalması, özellikle yüksek frekanslarda düz bir eğimle sifıra yakın bir oran oluşturması, devrede  $R_S$ 'in bu frekans bölgesinde azaldığına işaret etmektedir.

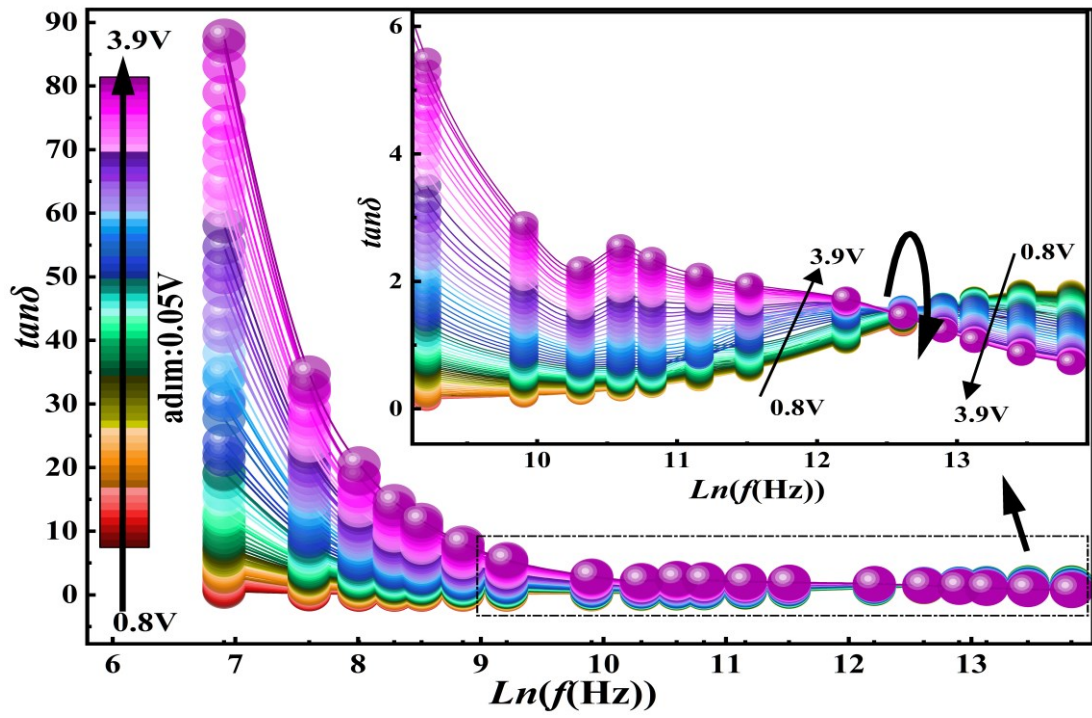
Şekil 4.7'de  $\tan\delta - \ln(f)$  davranışına bakıldığında ise yapıda genel olarak artan frekansa bağlı kayıp oranı düşmekte ve bu kayıplar tıpkı  $\tan\delta - V(V)$  için artan gerilim ile artmaktadır. Ancak yüksek frekans bölgesi incelendiğinde  $12 < \ln(f) < 13$  arasındaki bölgede bu durumun tersine dönerek artan frekanslarda bu kez azalan gerilimde azalan kayıp oranı verdiği görülmektedir. Bu durum literatürde farklı çalışmalarda farklı dielektrik parametrelerinde de gözlemlenmiştir ancak sebepleri farklı dahi olsa hepsindeki ortak nokta belli kavşak bölgelerinde iletim davranışındaki yapıya özgü değişimlerdir. Örneğin bir çalışmada araştırmacılar inceledikleri yapının ışığa bağlı I-V eğrilerinin ileri beslem kısmında bu davranışı gözlemlemiş ve bu durumu serbest yük taşıyıcılarının azlığı ve kavşak noktasından sonra artan  $R_S$  ile ilişkilendirmişlerdir [104].

Benzer şekilde bu davranış bir başka çalışmada yapının  $G/\omega - T$ ,  $\varepsilon'' - T$  ve  $\sigma_{ac} - T$  eğrilerinde gözlenmiş ve bu kavşak öncesi ve sonrası farklı iletim davranışları MPS yapıda kullanılan Co-PVA polimer ara katmanın yapıdaki elektriksel özellikleri değiştirebileceğine ve  $G/\omega - T$  grafiklerindeki bu sinyal tepkisini düşük sıcaklıklarda serbest yük taşıyıcılarının azlığına bağlanmıştır [105].

Bu çalışmada incelenen azot katkılı DLC yapısının üstte metal kontak ve altta katkılı yarıiletken ile yapabileceği yüzey birleşim etkileşimleri düşünüldüğünde yapının yüksek frekansta yüzey oluşumlarından, kusur ve tuzaklardan etkilendiği düşünülebilir. Bölüm 3.1'de DLC'nin azot ile etkileşimi malzemenin elektriksel karakteristiğini ve yasaklı bant aralığını değiştirebildiğinden ve Bölüm 4.1'deki yüzey analizi sonuçlarına göre de yapıda farklı moleküllerin varlığından literatür ışığında bahsedilmiştir. Bu verilere göre 3 yüzlü ve 4 yüzlü farklı bileşenleri bulunan DLC, içerisine bir de azot katkılanmasıyla daha karmaşık bir malzeme örgüsüne sahip olup yapının yüzey iletkenliğini kapasitif ya da rezistif katkıyla etkileyebilir [51,106-108].



(a)



(b)

Şekil 4.7. a)  $\tan \delta - V$  (V), b)  $\tan \delta - \ln(f)$ .



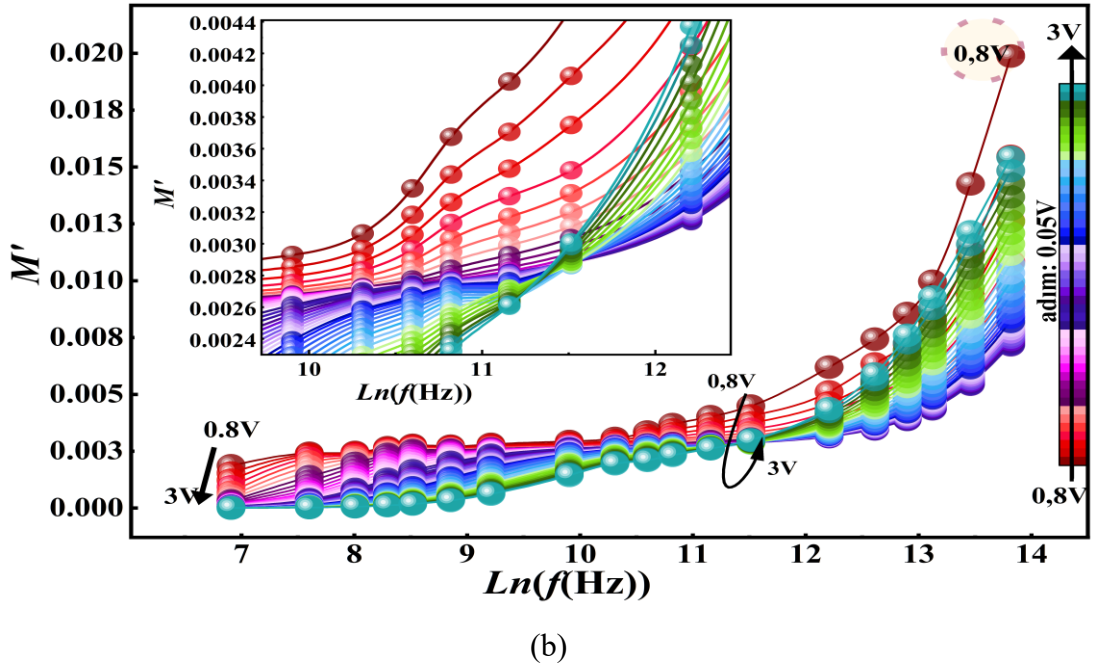
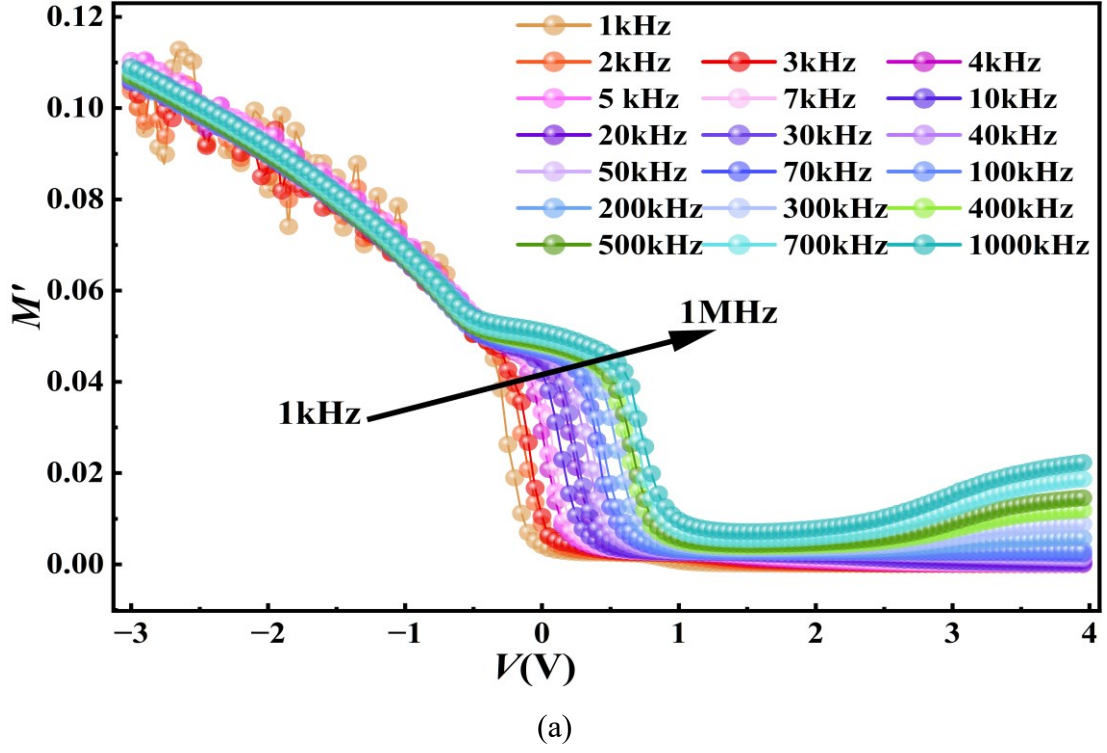
Yine Bölüm 3.2’de değinilen silikonun kübik kristal yapısı ve bu yapıdaki katkı atomları ve olası nokta kusurları da düşünülduğünde yalıtkan ve yarıiletken birleşim yüzeyinde bu faktörlere bağlı olarak çeşitli yüzey kusurları ve örgü eşleşmemesi olasılığı bulunmaktadır. Bu durum yapının yüzey iletkenliğini değiştireceğinden ideal yapıdan sapmalara neden olabilir. Dolayısıyla kavşak bölgesi davranışlarında yüksek frekans bölgesinde beklenenin dışında ortaya çıkan saptmaya bu olası yüzey iletkenliğini değiştirebilecek unsurların etkisiyle oluşan  $R_s$  sebep olabilmektedir.

Özetle kayıp tanjant açısı hem frekansa hem de gerilime bağlıdır. Şekil 4.7’deki  $\tan\delta$  eğrileri kavşak bölgesine kadar genel olarak artan frekansla azalır artan gerilim ile artmakta, bu bölgeden sonra ise tersi eğilim göstermekte ve iki durumlu kayıp oranı vermektedir. Bu da üretilen MIS yapının farklı dielektrik kalite faktörü aralığında frekans - voltaj seçimli çalışabileceğini göstermektedir.

#### **4.3.3. Karmaşık Elektrik Modülüs Bileşenleri ( $M'$ , $M''$ )**

Eşitlik 2.20’de daha önce verilen karmaşık elektrik modülüsün, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’daki eğrileri incelendiğinde özellikle  $M' - V (V)$  ve  $M'' - V (V)$  için, önceki grafiklerde gözlenen üç bölgeyi sinyale geçiş yine net şekilde fark edilmektedir ve bu bileşenlerin gerilime bağlı eğrileri frekansla doğru, gerilimle ters orantılıdır.

Şekil 4.8’de voltaja bağlı davranış incelendiğinde elektrik modülüsün gerçel bileşeni terslenimde artan gerilimle azalmakta tüketimde bu kez terslenime göre daha düşük bir eğim ile azalmakta, birikim bölgesinde ise sabite yakın eğim göstermektedir. Bu durum malzemenin gerilim arttıkça kutuplanma mekanizmalarını artan alan etkisi ile daha etkin kullandığını ancak birikim bölgesinde görüldüğü üzere artan gerilim belli bir alan değerini sağladıktan sonra yüzeylerdeki kutuplanmadan daha fazla etkilenmeyen bir davranış olarak artık artan gerilime karşı monoton bir tepki oluşturduğunu göstermektedir. MIS yapı enerji depolama sürecinin sonuna gelmiştir dolayısıyla malzemenin gerçel elektrik modülüs bileşeni tepkisizdir. Tüketim bölgesinde bu eğimin az oluşu ise yine yapının etkin kapasitörünün geometrik kapasitans olduğuna bir işaret sayılabilir.



Şekil 4.8. a)  $M' - V$  (V), b)  $M' - \ln(f)$ .

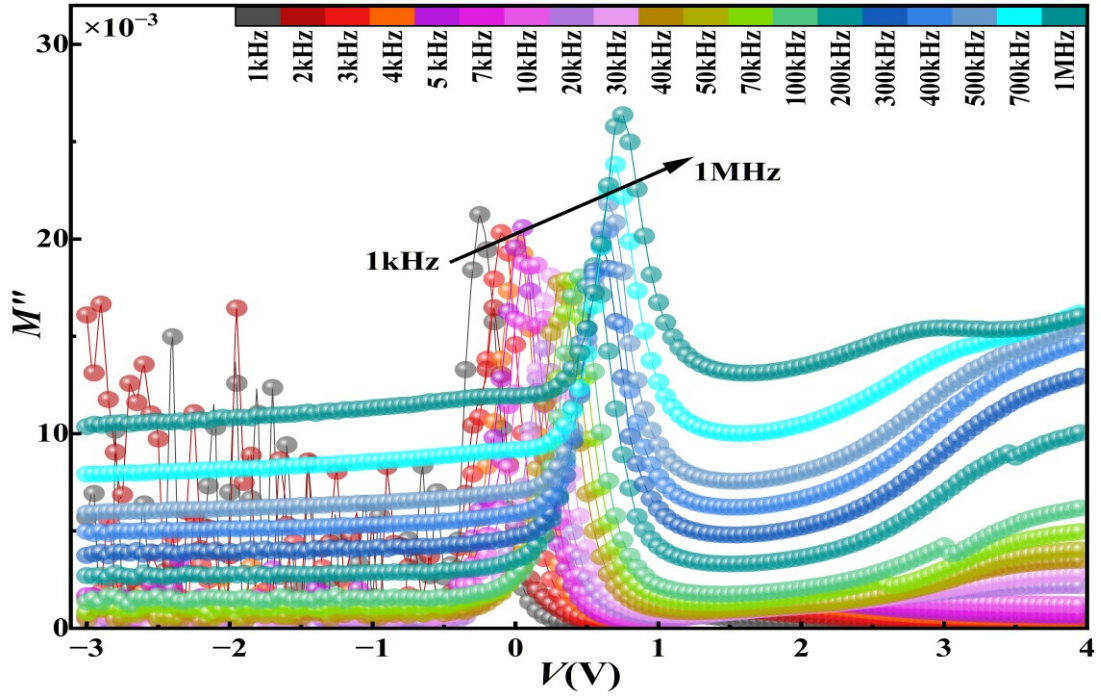
Gerçel bileşenin frekansa bağlı eğrisi Şekil 4.8'den görüldüğü üzere frekans arttıkça gerilim ile ters orantılı artmakta ancak orta frekanslardan sonra gerilim bağımlılığı tersi davranış göstermektedir. Bu durum yine bir kavşak bölgesinde  $11 < \ln(f) < 12$  arasında ortaya çıkmaktadır. Bu kavşak bölgesinden önceki ve sonraki farklı sinyal tepkisi gerilim değerlerinin geneli için geçerli olmakla beraber tüketim bölgesinin

henüz bittiği değere denk gelen 0,8 V değerinde yapının genel davranışından ıraksama belirgin olarak görülmektedir. Genel olarak  $M'$  değerleri artan frekans ve azalan voltaj ile artmaktadır.

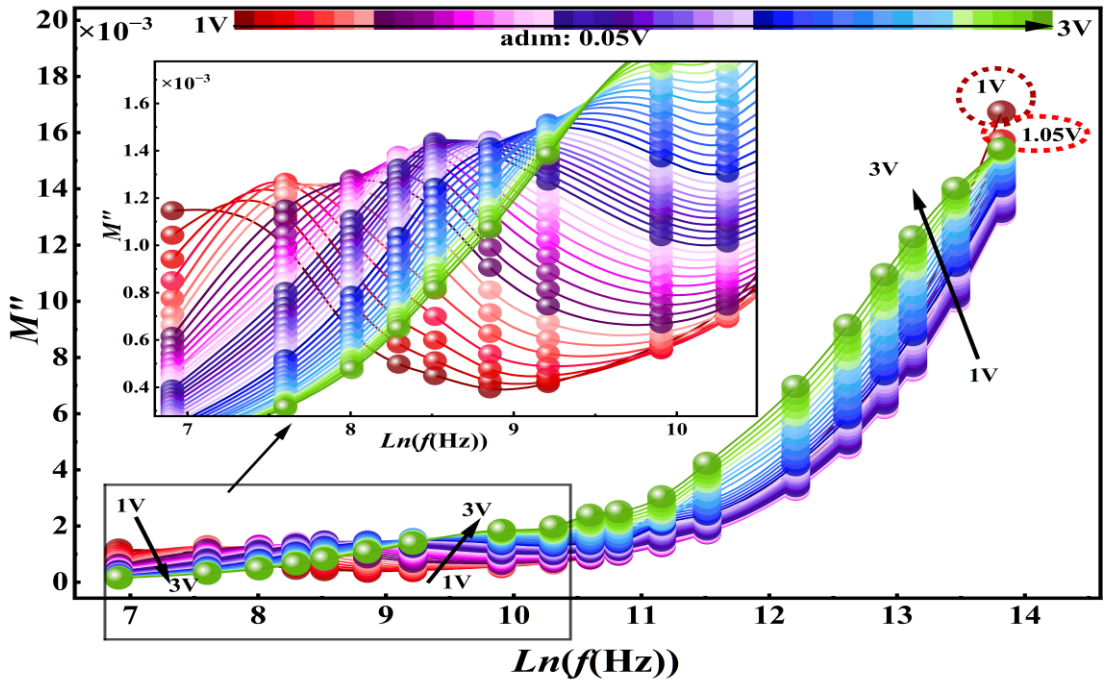
Şekil 4.9'da elektrik modülüsün sanal bileşeni gerilime bağlı incelendiğinde terslenim bölgesinde sabite yakın düz eğimli değerler alırken tüketim bölgesinde ani yükselip düşmesi alan gevşemesini net şekilde göstermektedir. Ayrıca birikim bölgesinde de yine sabite yakın değerler almaktadır. Ancak terslenime göre kısmen daha yüksek bir sabit aralıkta değerler almaktadır. Dolayısıyla yapıda depolanan alan birikim bölgesinde harcanırken artan iletim mekanizmalarından kaynaklı oluşan tepki ile açıklanabilir.

Böylece  $M''$  değerleri artan frekans ile artarken artan gerilimden çok etkilenmemektedir. Sadece tüketim bölgesinde bu değişen enerji harcama sürecine tepki vermektedir. Ancak elektrik modülüsün sanal kısmı birikim bölgesinde de ayrıca düşük pikler vermektedir. Burada dielektrik mekanizmalarını tek gevşeme pikiyle açıklayan Debye modelinden bir ıraksama söz konusudur. Bu da Maxwell'in karmaşık malzeme matrisi yaklaşımı ve Maxwell-Wagner mekanizmalarına işaret edebilir [39,46-48].

Şekil 4.9'da  $M'''$ 'nin frekansa bağlı davranışına bakıldığında ise yine bir kavşak bölgesini içerecek şekilde artan frekansla artan enerji kaybı tepkisi görülmektedir. Bu kez kavşak bölgesi düşük frekanslara kaymıştır ki bu da polarizasyon kaynaklı ıraksamalara atfedilebilir. Kavşak bölgesine kadar azalan voltaj ve artan frekansla artan  $M''$  değerleri bu bölgeden sonra artan frekansla azalan gerilim etkisinde artmaktadır. Enerji harcanma sürecindeki bu elektrik modülüs tepkisi önceki parametrelerde ortaya çıkan çok bölgeli çalışma davranışlarıyla uyumludur.

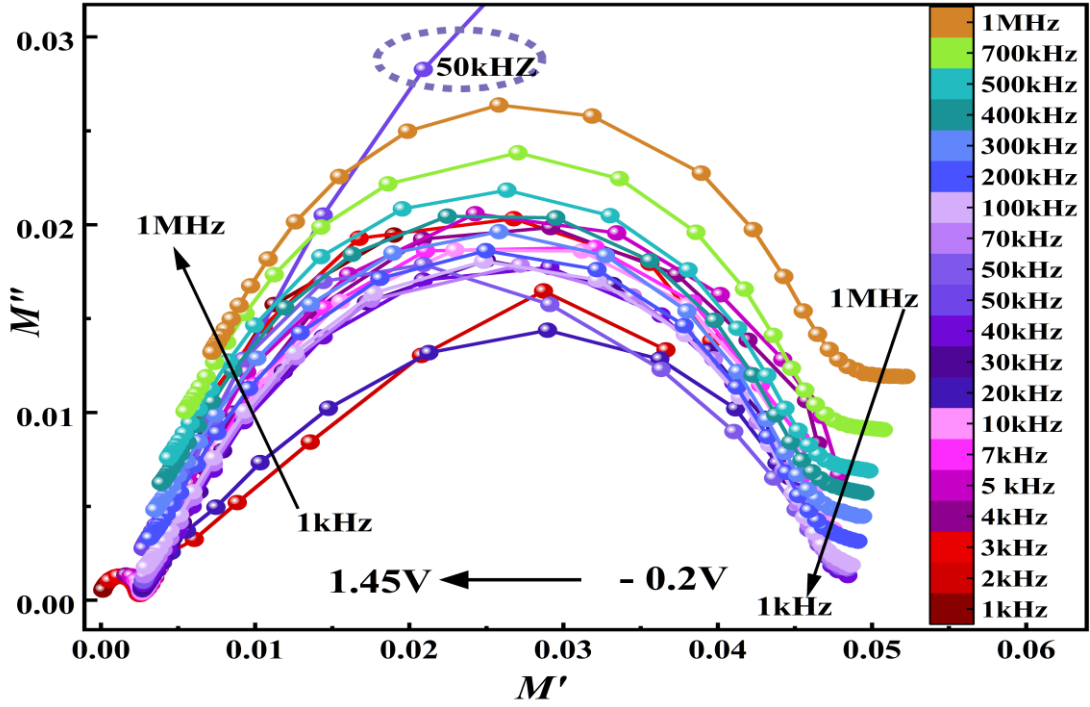


(a)

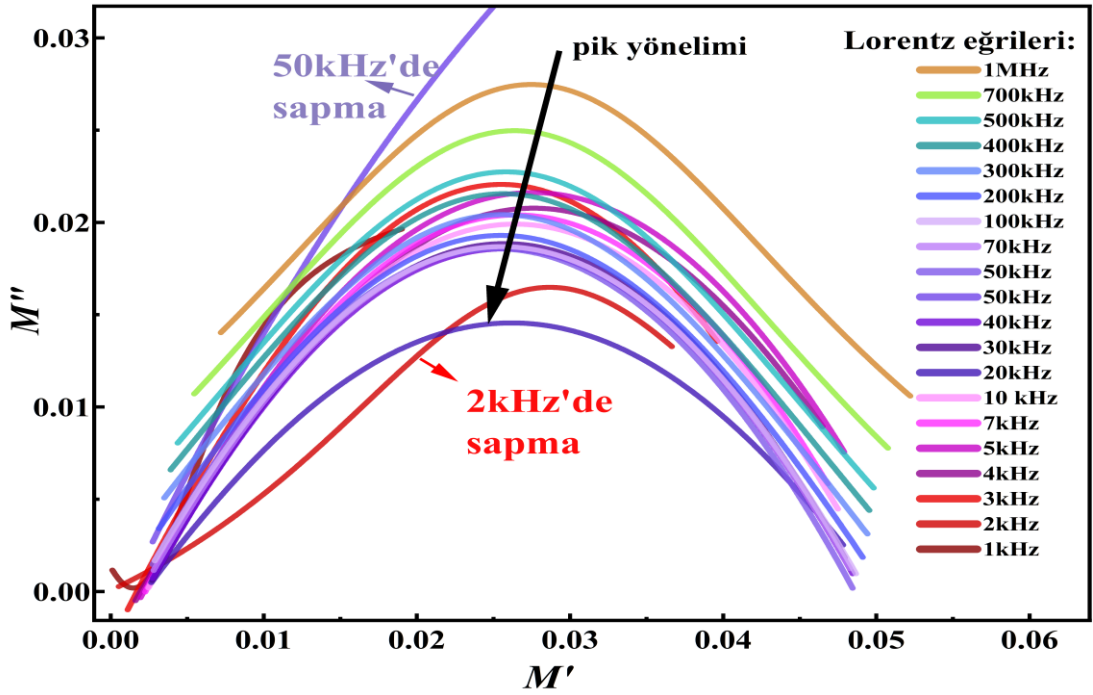


(b)

Şekil 4.9. a)  $M'' - V$  (V), b)  $M'' - \ln(f)$ .



(a)



(b)

Şekil 4.10. a)  $M'' - M'$ , b) Lorentz eğrisi oluşturulmuş  $M'' - M'$ .

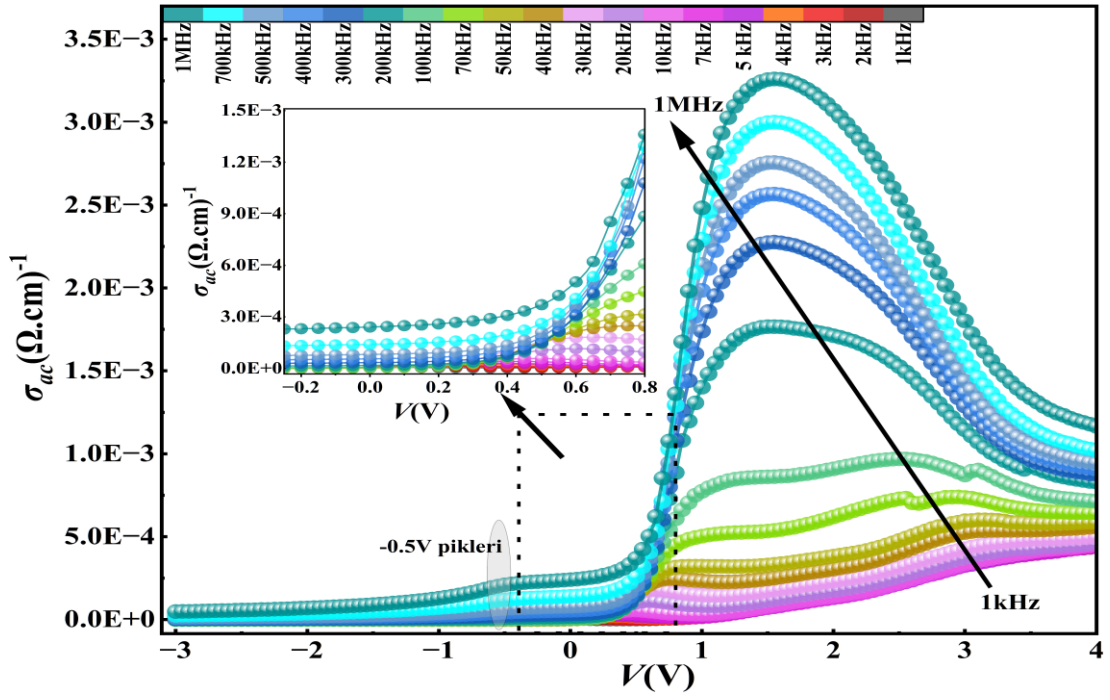
Şekil 4.10'a bakıldığında, Cole-Cole benzeri karşılıklı  $M'' - M'$  değerleri, malzemede enerji değişimlerine olan tepkinin piklerindeki yüksek frekanslardan düşük frekanslara geçişini tüketim bölgesiyle birikim bölgesinin düşük-orta gerilim kısımlarında

göstermektedir. Burada seçilen gerilim aralığı malzemenin karmaşık elektrik modülüsünün uygulanan alan değişimlerine karşı verdiği en belirgin tepkiyi içeren aralıktır ve MIS yapının bu dielektrik tepkisi genel olarak belirgin tek gevşeme mekanizması ile uyumludur. Şekil 4.10'da Lorentz eğrileri oluşturulmuş  $M'' - M''$ 'in genel yapı cevabından sapmalar 2 kHz ve 50 kHz değerlerinde oldukça belirgindir.

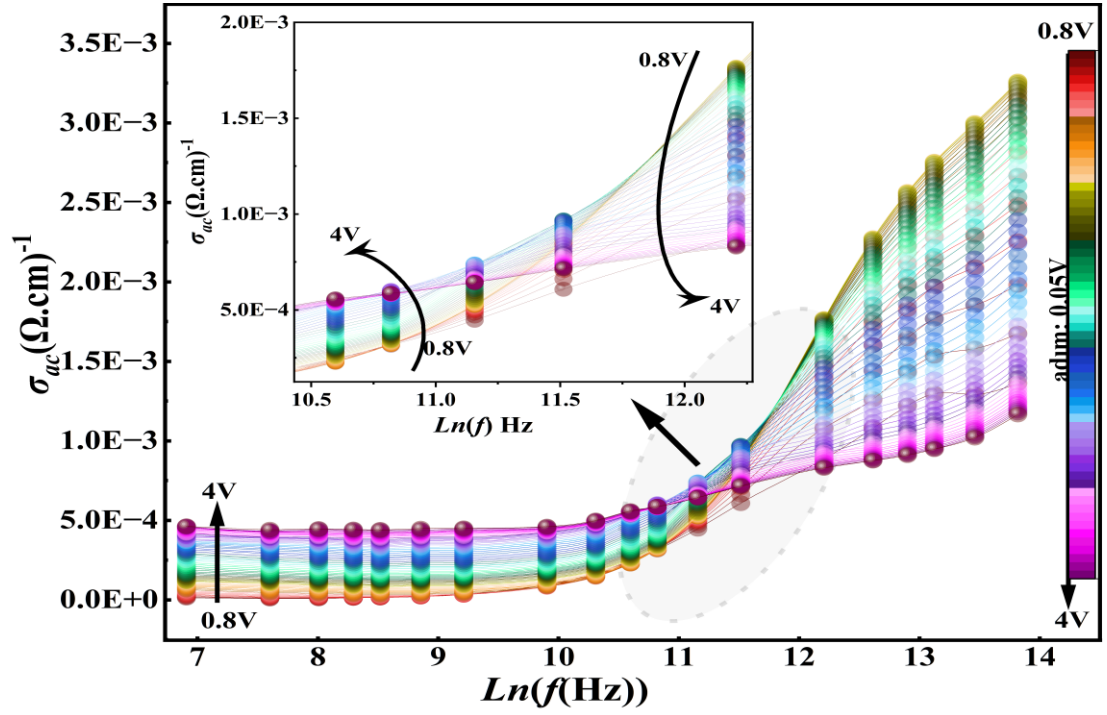
#### 4.4. AC İLETKENLİK ( $\sigma_{AC}$ ), FAZ AÇISI ( $\theta$ ) VE EMPEDANS ( $Z^*$ )

AC iletkenlik, faz açısı ve empedans davranışı Bölüm 2.4.4'te verilen literatür ışığında incelenmiştir.

Eşitlik 2.22'ye ve Şekil 4.11'e göre gerilime bağlı AC iletkenlik değerleri genel olarak artan gerilim ve frekans ile artmakta ancak terslenim bölgesinde ise sifıra yakın sabit değerler almaktadır. Bu da MIS yapıdan beklendiği gibi düşük voltajlarda iletme katkısı yapılmadığının göstergesidir. AC iletkenliğin ilk pikleri (- 0,5) V civarında 100 kHz altında gözlemlenmeyen 100 kHz - 1MHz arası piklerdir. 0,5 V ve 1,5 V aralığında 200 kHz ve 1 MHz arasında iletkenlik pikleri kademeli olarak artmaktadır ve 1,5 V değerinde maksimum değerine ulaşmaktadır. 200 kHz altında 1,5 V civarındaki pikler 3 V civarında omuz veren ikincil piklere dönüşmektedir. Özellikle 50 - 100 kHz arasında bu pikler Şekil 4.11'de de net olarak görülmektedir. İletkenlik 3 V değerinden sonra sabite yakın eğimle devam etmektedir. Voltaja bağlı iletkenliğin Şekil 4.11'deki (- 0,2) V ile (+ 0,8) V aralığına bakıldığında terslenimden tüketime geçilen bölgede yüksek frekanslı sinyallerin hızlı bir şekilde iletkenliği arttırdığı görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.11'de frekansa bağlı iletkenlik değerlerine bakıldığında ise yine önceki parametrelerde karşılaşılan kavşak bölgesi burada da bulunmaktadır. 20 kHz ile 100 kHz arasındaki kavşak bölgesine kadar artan gerilim ve frekansla artan AC iletkenlik kavşak bölgesinden sonra azalan gerilim ve artan frekans ile artmaktadır.

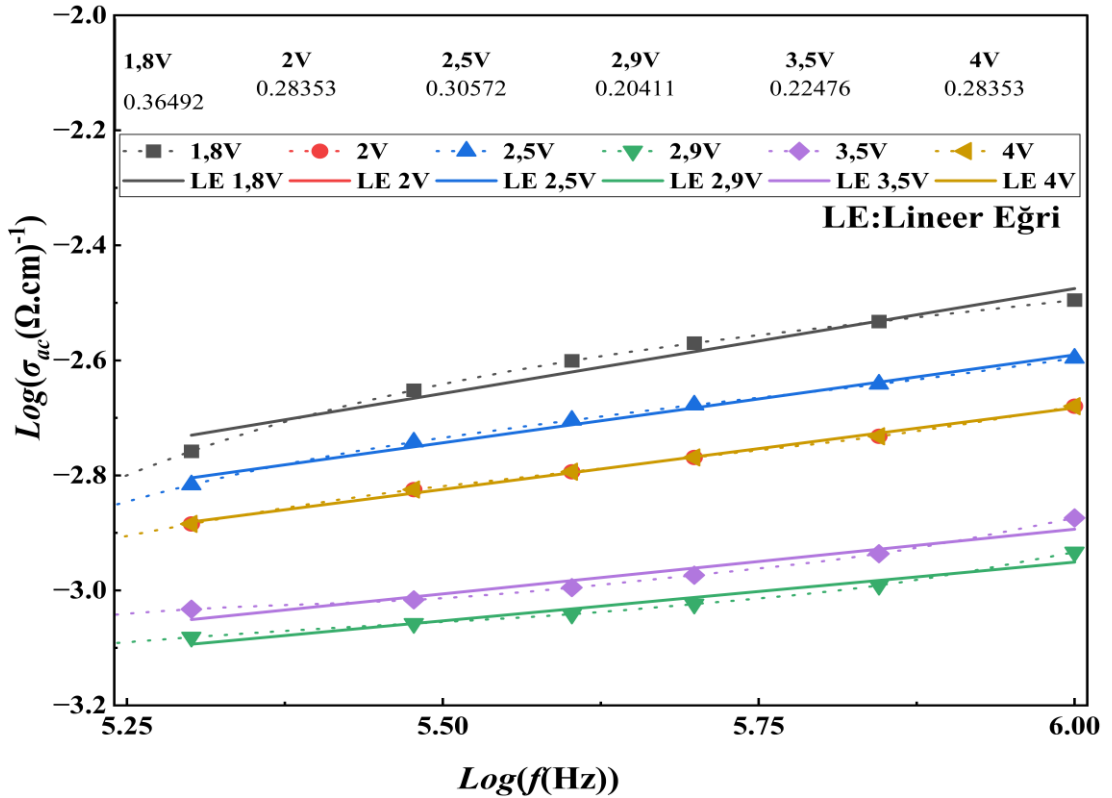
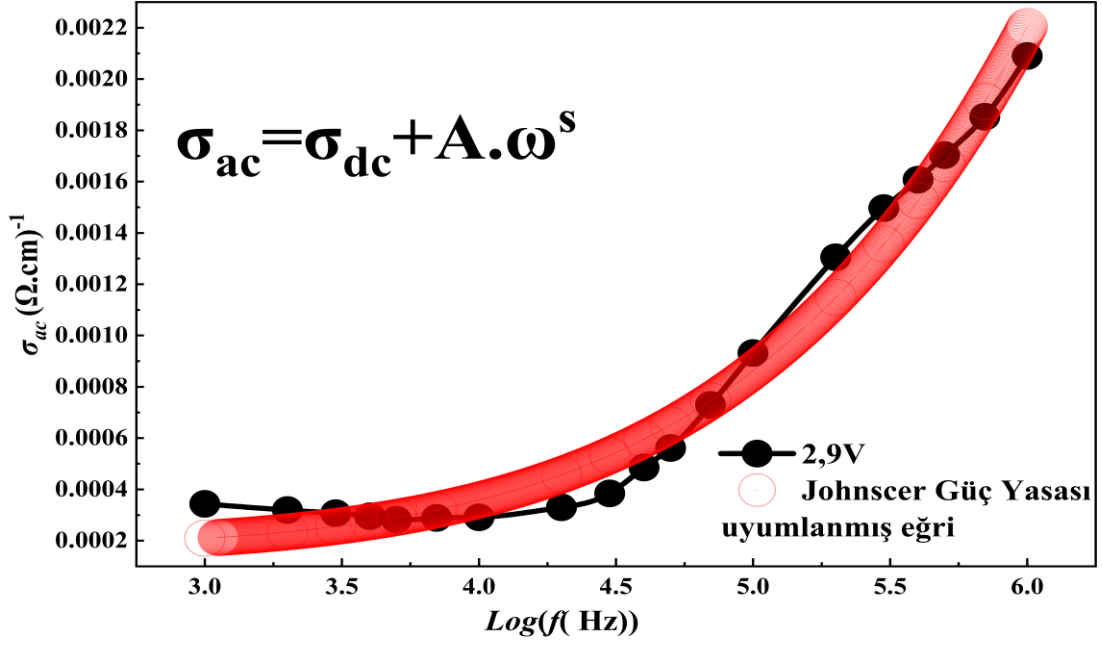


(a)



(b)

Şekil 4.11. (devam ediyor).



Şekil 4.11. a)  $\sigma_{ac} - V$  (V), b)  $\sigma_{ac} - \ln(f)$ , c)  $\sigma_{ac} - \log(f)$  Güç yasası uyumlanmış eğri, d) Güçlü ilekenlik bölgesindeki  $\log(\sigma_{ac}) - \log(f)$ .

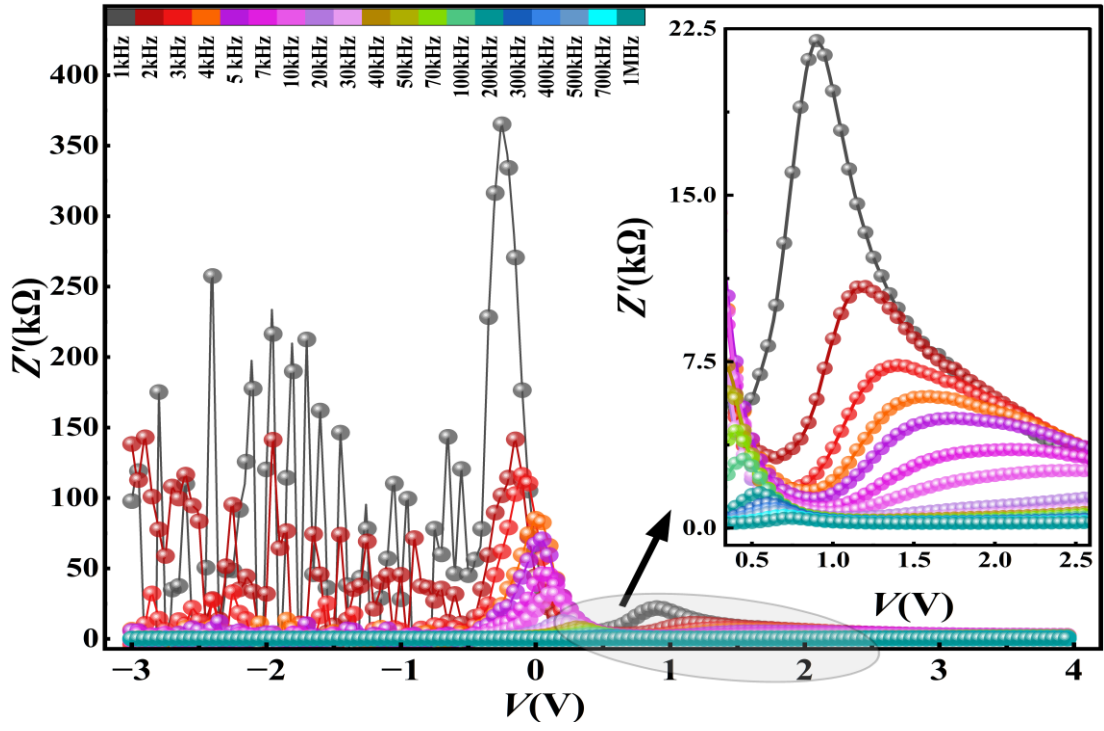
Şekil 4.11’de logaritmik frekansa göre değişen 2,9 V sinyalinin Johnsger Güç Yasası’na uyumlanmış eğrisine bakıldığında genel olarak artan frekans yönünde hem deney verisi hem de uyumlanmış eğri benzeri davranış gösterse de Johnsger’in



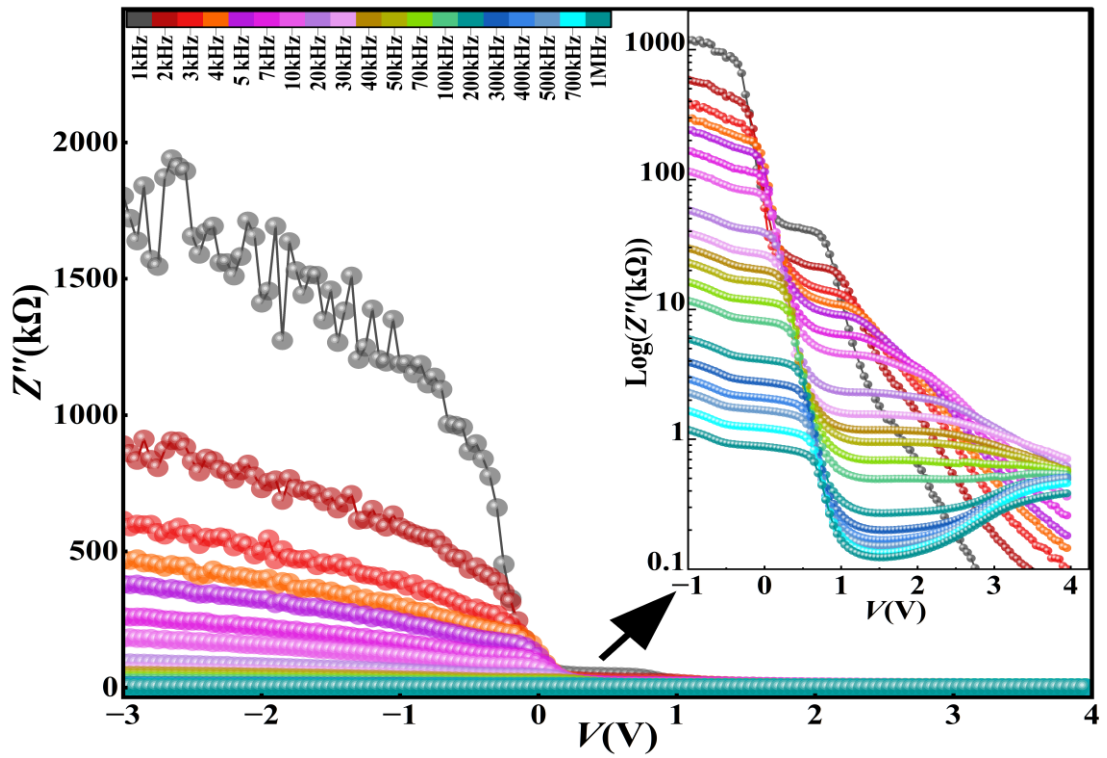
modelinden sapmalar mevcuttur. Ayrıca şekildeki denklemde verilen açısal frekansın kuvveti olan  $s$  değeri logaritmik frekans değişimi ile Güç Yasası modelinde eğri uydurulduğunda her analizde 5,4 civarında 1'den büyük, normal frekans aralığında analiz edildiğinde ise 0,45 civarında 1'den küçük değerler vermiştir. Şekilden de görüldüğü üzere düşük frekanslarda sabite yakın uydurulan eğri ve deney verisi yakın değerler almakta yüksek frekansta ise yine deney verisi ile uydurulan eğri benzer artan yönelim sergilemektedir. Dolayısıyla yüzde yüz olmasa da davranışta bir paralellik vardır. Malzemenin frekans bağımlı karakteristiğindeki etkin  $s$  değeri genel kabul olarak 0 ile 1 arasında almakta ve bu değer dışındaki değerler olağandışı iletim davranışı ve malzeme yapısıyla ilişkilendirilmektedir [35].

Cihazın güçlü iletkenlik bölgesinde logaritmik frekans değişiminde incelenen  $y=a+bx$  denklemine göre lineer uydurulmuş eğrilerine bakıldığında ise yüksek frekanslarda iletimin doğrusal karakteristiği bu yapının anahtarlama işleminde kullanıma uygun olduğunu göstermektedir. Ancak sıralama olarak beklenenin aksine voltajlara göre artan frekans tepkisi düzensizdir. Örneğin hem 2 V hem 4 V için iletkenlik artışı aynı oranda artarken yapıya 2,5 volt uygulandığında iletkenlikteki artış şekildeki eğim değerlerinden de görüleceği üzere daha fazla artmaktadır. Bu da yapının önceki paragraflarda bahsedilen kavşak bölgelerindeki davranışı ile frekansa ve voltaja farklı aralıklarda farklı tepki veren davranışını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla üretilen MIS yapıdaki AC iletkenlik davranışı genel olarak artan frekans ve voltajla artma gösterdiğinden Güç Yasası'na belli ölçülerde uyumu olsa dahi tam olarak bu modelle uyumlu değildir ve var olan sapmalar yalıtkan malzemenin özgün yapısı nedeniyle ortaya çıkmış olabilir [48].

Şekil 4.12'de empedansın gerçel ( $Z'$ ) ve sanal ( $Z''$ ) bileşenlerinin ve karmaşık empedansın ( $Z$ ) büyüklüğünün ( $|Z|$ ), voltaj bağımlı davranışları ile  $Z'$  ve  $Z''$  birbirine göre bağıl değerlendirmesini sağlayan Cole-Cole benzeri görselleri verilmiştir. Empedans denklemleri Bölüm 2.4.1'de Eşitlik 2.16 ile, Bölüm 2.4.4'te Eşitlik 2.23 ve Eşitlik 2.24 ile verilmiştir.

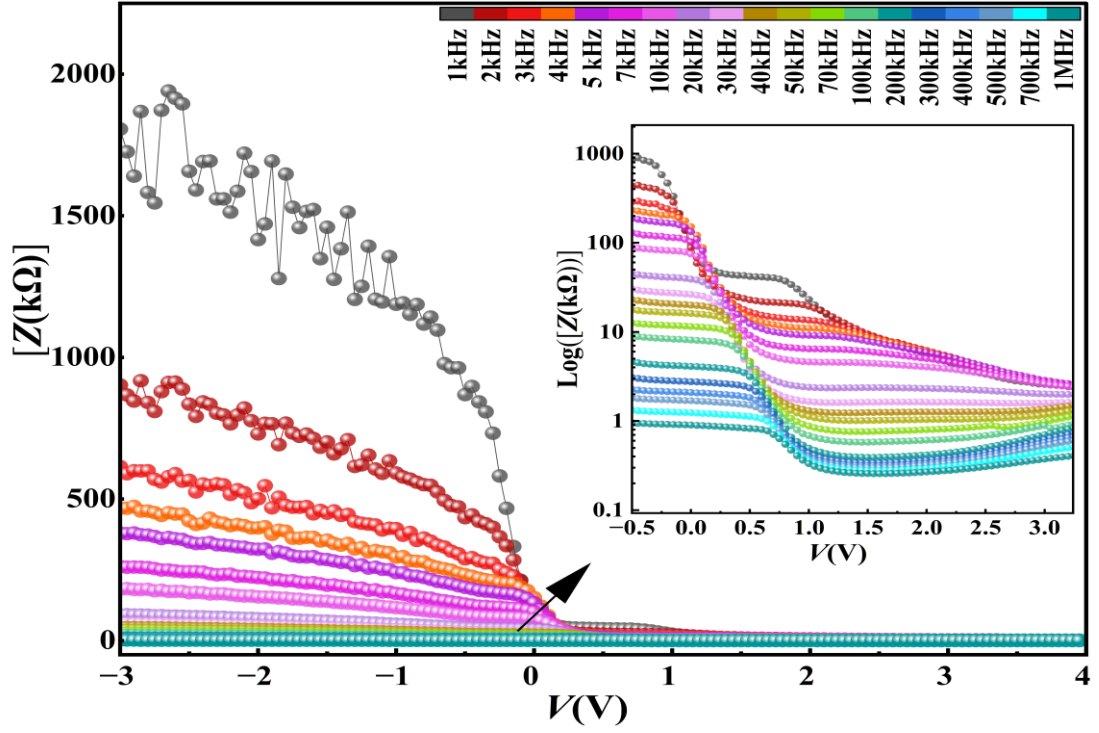


(a)

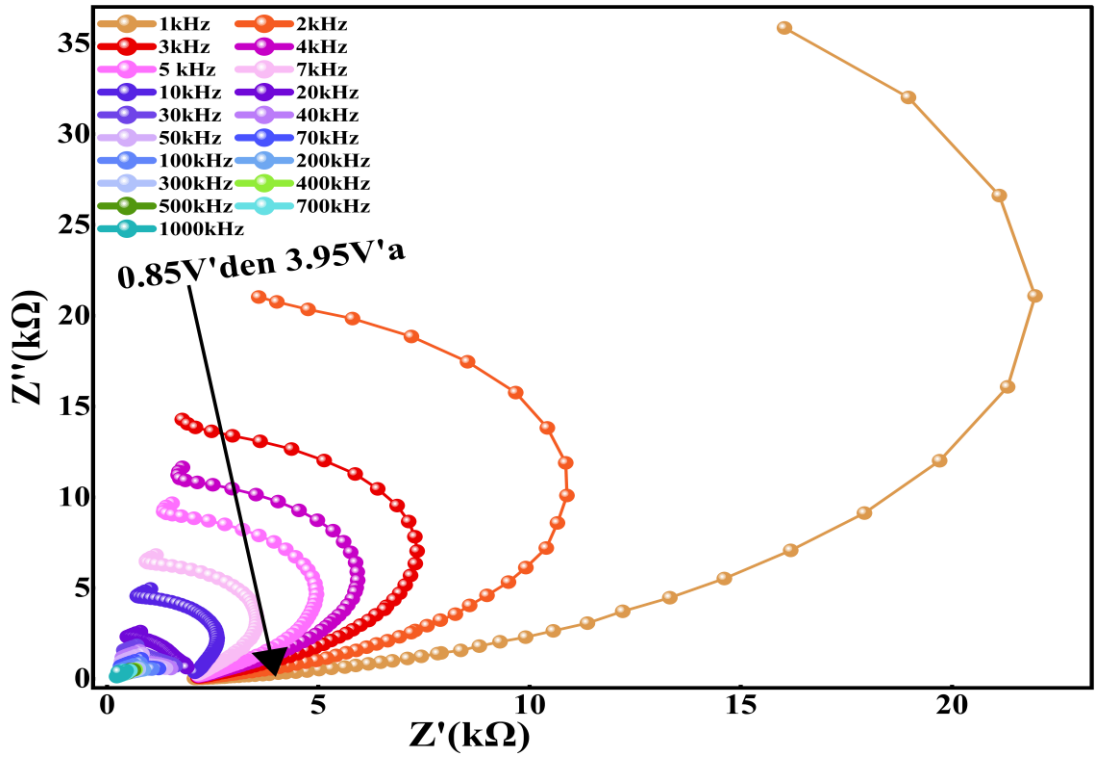


(b)

Şekil 4.12. (devam ediyor).



(c)



(d)

Şekil 4.12. a)  $Z' - V(V)$ , b)  $Z'' - V(V)$ , c)  $Z - V(V)$ , d)  $Z'' - Z'$ .

Şekil 4.12'ye göre empedans değerleri tıpkı önceki parametrelerde olduğu gibi üç bölgeyi davranış sergilemektedir. Şekilde empedansın gerçel bileşeni negatif voltajlarda parazitik pikler vermekte bu pikler çoğunlukla düşük frekans skalasına karşılık gelmektedir. Bunun dışında  $Z'$  ayrıca 0 V civarında tüketim bölgesi pikleri de vermekte ve bunları 1 V civarında ikincil pikler takip etmektedir.  $Z'$ , artan frekans ve voltaj ile azalmaktadır. Sanal bileşene bakıldığında ise  $Z''$  de artan voltaj ve frekans değerleri ile azalmakta ancak  $Z''$  ye göre daha büyük değerler almakta ve karmaşık empedansa şekildeki yakın değerlerden de görüleceği üzere en çok katkıyı yapmaktadır. Hem  $Z$  hem  $Z''$  1 kHz'de negatif gerilim değerlerinde 2 M $\Omega$  civarı yüksek değerler almaktadır. Genel olarak empedans davranışı artan frekans ve voltaja bağlı düşmekte ve birikim bölgesinde sıfırlanmaktadır.

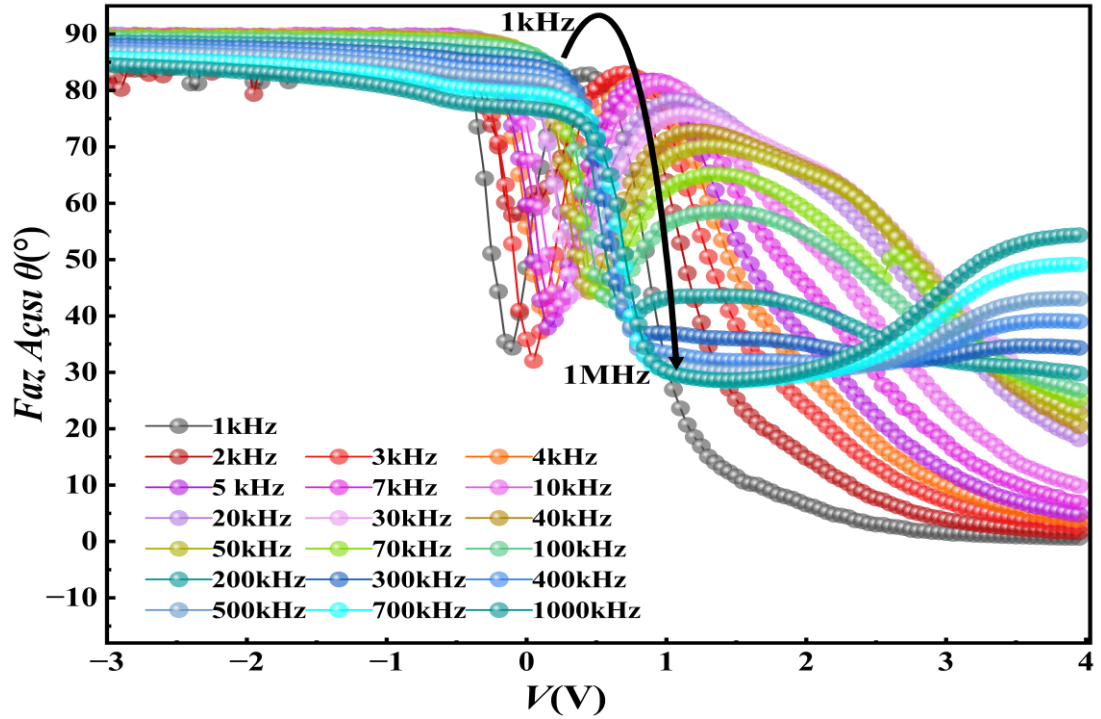
Şekil 4.12'de  $Z'' - Z'$  değişimine bakıldığında hem  $Z''$  hem de  $Z'$  azalan frekans ve voltaj ile artmakta ancak eğrilerin tepe noktasındaki belirgin piklerden sonra bu davranış tersine dönmektedir. Bu karşılıklı değişim yapıdaki iletim davranışında reaktif ve indüktif mekanizmaların karşılıklı değişiminin bir sonucudur. Bu durum aynı zamanda Şekil 4.13'te verilen faz açısı ile de doğrulanabilir. Çünkü yapının reaktif ve indüktif bileşenleri arasındaki faz açısı, farklı iletim davranışında hangi bileşenin hangi aralıkta etkin olduğunu işaret etmektedir.

Eşitlik 2.25 ile verilen faz açısı kapasitif fazın indüktif fazı nasıl izlediğini açıklamaktadır. Şekil 4.13'te görüldüğü üzere terslenim bölgesinde nerdeyse 90° açı ile, MIS yapı yüksek kapasitif etkinlik göstermekte dolayısıyla herhangi bir ilettime izin vermemektedir. Ancak empedansın gerçel bileşeninin terslenim bölgesinde ortaya çıkan parazitik pikleri ve bu faz açısının tam olarak 90° olmayışı nedeniyle yapıda arayüzey durumları, yüzey kusurları, düşük frekans etkisi vb. durumlardan kaynaklı düşük değerli kayıplar söz konusu olabilmektedir.

Tüketim bölgesi etkinliği hem empedansın  $Z'' - Z'$  değerlerinde pik noktasına kadar  $Z'$  artarken  $Z''$ 'nin azalması ve pik noktası geçildikten sonra bu durumun tersine dönmesi ile hem de faz açısında önce azalan sonra bir miktar artan 0 - 1 V civarı bölge ile de gözlemlenebilmektedir. Faz açısındaki bu 0 - 1 V aralığında açının azalarak yaklaşık 42° açıyla bir pik yapması sonra da yeniden artarak 80° açığa çıkması aslında yapıda

tam olarak iletim bileşenlerinin türünün değiştiğini anlatmaktadır. Çünkü artık artan gerilim ve frekans ile yapı depolama davranışını bırakıp iletime geçecektir. Bu durum enerji depolama/kullanım davranışı değiştiğinde pik veren elektrik modülüs grafiğinin piki ile ters yönde oldukça benzerdir ve aslında aynı durumu farklı değişkenlerle anlatmaktadır.

1 V değerinden sonra faz açısı düşmekte ve azalan frekansla azalmaktadır ki bu durum iletime geçen yapının artık çoğunlukla tek bir etkin mekanizma etkisinde iletim yaptığına işaret etmektedir. Örneğin tüketim bölgesinde kapasitif ve indüktif bileşenler arası bir artma azalma dengesi olduğundan buradakinin aksine çift yönlü bir değer değişimi vardır. Dolayısıyla faz açısı frekans ve gerilime bağlı olup terslenim bölgesinde üretilen yapının kapasitif davranışına, tüketim bölgesinde kapasitif - indüktif geçişli karışık davranışına, birikim bölgesinde ise yalnızca iletim kaynaklı tek tip cihaz davranışına ışık tutmaktadır. İncelenen empedans ve faz açısı değerleri beraber düşünüldüğünde N:DLC terslenim bölgesinde yapının yüksek kapasitif davranışıyla iyi bir yalıtkan olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.13. Faz açısı  $\theta(^{\circ})$  -  $V(V)$ .

## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, Al/N:DLC/p-Si/Au MIS SBD yapısı, çok aşamalı elektrokimyasal yöntem ile üretilmiştir. Yüzey analizi SEM ve XPS analizleriyle, dielektrik ölçümleri ise admitans ölçümleri ile yapılmıştır. Yapının dielektrik parametreleri C-V, G/ω-V ölçüm sonuçlarından çıkarılan parametrelerle incelenmiştir.

Yüzey SEM analizine göre N-DLC filmi, film bağ yapısında olması beklenen tüm hibritleşmeleri için  $sp^1$ ,  $sp^2$ ,  $sp^3$  bileşenlerini belli oranlarda içermektedir. Film alttaş yüzeyini süreklilik ile kaplamış ancak bu sürekli film yüzeyinde çapları 134 nm ile 250 nm arası değişen, yer yer kümeleşen ve düz sıralanan ardışık küresel yapılara rastlanmıştır. Bu küresel yapıların varlığı azotun karbon yığınlarına katıldığı olası bölgelere veya maddenin farklı hibritleşmiş bileşenlerinin örgü eşleşmesi uyumsuz birleşim bölgelerine dayandırılmıştır. Yapıda ortaya çıkan bu küresel tanecikli adaların ve kümelerin, üretim esnasında yapılan çeşitli titiz temizlik ve kurutma işlemleri nedeniyle deney şartlarından kaynaklanması ihtimalinin çok düşük olduğu düşünülmektedir.

Yüzey analizi XPS sonuçlarına göre, atomların enerji pikleri verdiği noktalar literatürle benzer sonuçlar vermiştir. N, C, O atomlarının bileşik kombinasyonları C1 ve N1 spektrumundaki dağılımları yardımı ile oransal olarak tespit edilmiştir. Yapılan analizdeki Gaussyen eğri altında kalan alan verilerine göre ve C1-N1 spektrumlarının malzeme yapısındaki dağılımlarına göre oluşan filmin  $sp^2$  içeriğinin sırasıyla  $sp^3$  ve  $sp^1$ 'e göre daha fazla olduğu bulunmuştur. Yüzey analizinde, gerçekte var olması beklenip de cihaz elektron toplama kanalında yol alma enerjisi yetersizliğinden ölçüm sınırını aşamayan atom enerjisinden dolayı gerekli dalga boyu sensör alıcı ucuna ulaşamadığından gözlemlenemeyen tek bileşen Hidrojen atomu olmuştur.

Cihaz düşükten yükseğe giden frekans aralığında incelendiğinde kapasitansın düşük frekanslarda daha yüksek değerlere sahip olurken yüksek frekanslara çıkıldıkça düşmesinin gözlemlenmesi, cihazın düşük frekanslarda bütün kapasitif bileşenlere sahipken yüksek frekanslara gidildikçe sistemin elektriksel yolunda devreden çıkan değişken kapasite elemanları ve etkinliğini yitiren yüzey durumlarının varlığıyla açıklanmıştır. Ayrıca tüketim bölgesinin oluşması, daralması ve yok olması adımlarıyla bu bölgenin etkisi geçtikten sonra cihaz kapasitansında yarıiletken kaynaklı bariyerlerin kalkması ile devreden bir kapasitansın çıkması ve yüzey durumlarının ise kullanılan yalıtkan tabakanın dengesiz yükleri etkisizleştirilmesi ile arayüz kayıplarının yüksek frekanslarda kendini sadece iletim kayıplarına bırakması ile açıklanabilmektedir. Cihazın gösterdiği 3 kademeli kapasitans değişimi ise hem terslenim, tüketim ve birikim bölgeleriyle hem de bu geçişler arasında kademeli bir geçişin olması ve cihazın kapasitans değişiminde yalıtkan katmanlı tabakasının baskın bileşen olmasıyla ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, örneğin 3,95 V ve 1 kHz için cihazın  $C_o = 6.95$  pF değerindeki geometrik kapasitansı 0,88 nF değerine düştüğünde veya artan frekans ve gerilim ile uzay kapasitörünün etkisi elemine edilmiş olduğunda 1 MHz için 3 V ve 0,3 nF değerlerine düştüğünde dahi yine de geometrik kapasitanstan yüksek bir değer elde edilmiştir.

İdeal yapıda geometrik kapasitansa tekabül etmesi gereken bu iraksamanın aslında cihaz karakteristiğinin kötü bir sonucu olmadığına, aksine bunun ilave arayüz yalıtkanının etkinliğini doğrulamasıyla ve hatta kullanılan azot katkılı elmas benzeri karbon kompozitinin sıradan arayüzlere göre daha dinamik değişkenlerle yük biriktirme ve yük iletme davranışına sahip olduğuna işaret edilmiştir.

İncelenen numunede  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$  ve  $\tan\delta$  değerlerinin artan frekans karşısında azalmaları, düşük frekanslarda arayüz sınırında birikmiş, tuzaklara yerleşmiş, tuzaklara atlayan, ya da tuzaklardan ayrılan yüklerin uygulanan geniş sinyale göre tepki verecek zamana sahip olmalarıyla açıklanmıştır. Ancak yüksek frekansta ise yüzey durumlarının, bu hızlanan sinyaldeki değişiklikleri yakalama becerisine sahip olmamasına bağlanmıştır. Düşük frekanslar başta olmak üzere dielektrik sabiti  $\epsilon'$  değerlerinin frekans aralığının genelinde tüketim bölgesi boyunca artan gerilim ile artması elektrik akımının etkin şekilde depolandığına işaret etmektedir. Terslenim bölgesindeki negatif gerilim

değerlerinde sıfır civarında seyretmesi ise kesim bölgesinde diyotun etkinliğini ve kalitesini göstermektedir. Birikim bölgesine bakıldığında, bu değerlerin terslenim bölgesindeki sıfıra yakın değerlerden büyük olması yine elimine edilen arayüzey durumlarından sonra arta kalan ve sistemi domine eden katkılı yalıtkan plakanın depoladığı yükün akıtılmasına bağlı etkinliğine işaret etmektedir.

Benzer şekilde, dielektrik kaybının da frekans aralığı genelinde frekans düştükçe artan gerilim ile artması tuzak ömrü ve rekombinasyon için yeterli enerji artışına bağlanmaktadır. Ayrıca, frekans arttıkça gerilim artsa dahi dielektrik kayıpların azalması ise iletme geçen SBD'nin arayüz kayıplarından ve azınlık taşıyıcı etkisinden dolayı tuzak ömrüne bağlı olarak elimine edilmesine ve frekansın gerilime göre iletim ve kayıplarda üstün sinyal şekillendirme etkisine bağlanmıştır. Frekansın yüksek değerlerindeki bu etkinin, Andrew K. Jonscher'in, tüm sistemler için belli oranlarda temel geçerliliği tanımlamaya çalışarak oluşturduğu yasa ile uyumuna dikkat çekilmiştir.

Elektrik modülüs grafiklerinde ortaya çıkan hem ısı kaybının hem de enerji depolama davranışının beraber gösterilebildiği karakteristikler ile malzemenin detaylı analizi yapılmıştır. Cole-Cole benzeri  $M''-M'$  grafiklerinde elektrik alanın malzemedeki gevşeme pikinin her bir frekans için verilen gerilime bağlı olarak fit edilmiş eğrilerinde frekansın yüksek olduğu kısımdan düşük olduğu kısma kaydığı gözlenmiştir. Bu durum polarizasyonun düşük frekanslarda etkinliğinin, arayüzey durumlarının bir sonucu olması ile ve daha da önemlisi tüketim bölgesi etkinliği ile ilişkilendirilmiştir. Bu davranıştan sapan değerlerin ise malzeme yapısı kaynaklı özel iletim tanecik sınırlarıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Faz açısı incelendiğinde yapının  $90^\circ$  civarındaki sabite yakın eğimli başlangıç açısı depolama esnasında kaliteli bir kapasitör davranışı göstermektedir. İletime geçtikten sonra azalan açı eğiminin yapıdaki kapasitif bileşenlerin depo ettikleri yükü yumuşak bir geçişle deşarj ettiği ve yüksek frekanslarda bu faz açısının azalması ile beklenen MIS yapı davranışının bazı küçük ıraksamalarla gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir. Bu durumun empedans ve iletkenlikte görülen değerlerle benzer olduğu saptanmıştır. Ancak cihazın neredeyse bütün verilerinde çeşitli kavşak bölgelerinde bazı sinyallerin



yer değişimlerine rastlanmış olup bunların yapının moleküler düzeniyle ilgili olduğu kanısına varılmıştır.

Ayrıca iletim davranışına bakıldığında düşük frekanslardaki sabit eğimli bölgenin DC akım davranışına tekabül ettiği ve iletimin orta frekanslardan sonra artan frekansla üstel olarak arttığı görülmüştür. İletim davranışında görülen kavşaklardaki ıraksamaların, film kaplaması esnasında  $sp^2$  içerikli grafit özellikteki bileşenlerinin olası dağınık yapılanması sonucu meydana gelen belirli bölgelerdeki iletimi arttırıcı yollar sayesinde frekans ve gerilime duyarlı oluşmuş özgün bir malzeme örgüsüyle ilişkilendirilebileceği düşünülmektedir. İletim aşamasından sonra grafiklerde kendini gösteren üç parçalı lineer iletim davranışı ile anahtarlama eylemi gerçekleştirildikten sonra yapının iyi bir iletkenlik özelliği gösterdiği ortaya çıkmaktadır. Ayrıca eğimler incelendiğinde yüksek iletim bölgesinde kompleks olmayan iletkenlik eğrisi elde edilmiştir.

MIS yapıya ait grafikler, çeşitli frekans ve gerilim bölgelerinde sinyal yön değişiklikleri ile yapısal kusurların veya diğer bir deyişle malzemeye ait özgün yapısal durumların varlığına işaret edecek şekilde ayarlanabilme ihtimali bulunan çalışma aralıklarını ortaya çıkarmıştır. Ayrıca yapının standart MOS/MIS kapasitörden saptığı davranışları da ortaya koymaktadır. Bununla beraber bu sapmaların DLC malzemesinden ve bu malzemeye yapılan azot katkısından dolayı malzeme içeriğinde, homojen bir dielektriğe kıyasla farklı şekilde oluştuğu düşünülmektedir. Diğer bir deyişle, aynı malzemede yapıyı oluşturan farklı kimyasal bileşenlerin aynı anda bulunma durumu yapının özgün tanecik bölgeleri oluşturmasını sağlamaktadır. Bu tanecik bölgelerinin kapasitif ve tünelleme etkilerine sebep olup yapıdaki ıraksamalarda katkısının yüksek olduğu düşünülmektedir.

Ayrıca bu yapının gelecekteki olası kullanım veya incelenme alanı olarak farklı biriktirme teknikleri, farklı yüzey kalınlığı, farklı ışınım ve titreşim analizleriyle yeni bütünsel bilgilere ulaşılabileceği düşünülmektedir. Buna ek olarak birden fazla atom katkısının aynı DLC yapısında çoklu maskelemeyle kullanılma ihtimali ile bölgesel olarak kontrol edilebilir anahtarlama yüzeyleri oluşturulabileceği de düşünülmektedir.

Özet olarak yapıda kullanılan ara katman, yük depolama yeteneğini geliştirmiş, iletim esnasında frekansa oldukça duyarlı tepki oluşturmuş ve grafiklerde ortaya çıkan sapmalarla malzemenin özgün doğasından kaynaklı olarak daha çok araştırılması ve yeni analiz metodları ile ele alınması gerekliliğini gün yüzüne çıkarmıştır.

Bu yapının elektriksel analizi ile burada elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ileride yapılabilecek potansiyel bir çalışma olarak ortaya konulabilir. Aynı zamanda bu gibi yapılarda özgün molekül yapısından kaynaklı polarizasyon etkileşimleri aynı anda birbirlerini etkileyebilecek durumlar oluşturabileceğinden daha yüksek frekans değerlerinde ve ek olarak ışık ve ısı değişkenleri altında ölçüm yapılması da düşünülebilir. Bununla beraber Miller'ın dielektrik seviyelendirme fikrinden yola çıkılarak, MIS yapı içerisinde DLC katmanlarının birkaç kere farklı uygun atomlarla katkılanması ve yapının p-tipi ve n-tipi yarıiletkenler ile ayrı ayrı oluşturulması sonucunda ortaya çıkacak davranışlarının incelenmesi ilerleyen çalışmalar için önerilebilir. Böylece spesifik malzeme türü için bağıl parametre çıkarımı da yapılabilecektir. Bu sayede elde edilecek olası sonuçlar ile tam olarak çözülmeyen katman problemlerine çözüm bulunabilmesi ve DLC'nin özel moleküler yapısının arayüz mühendisliği için açıklığa kavuşabilmesi ihtimalleri ortaya çıkmaktadır. Aynı zamanda karbon ağının (CNT), DLC ve grafen ile birlikte kullanılması sayesinde arakatmanlı yapılarda kademeli iletimin her katman için daha kontrol edilebilir şekilde gerçekleştirilebileceği de düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

1. İnternet: World Semiconductor Trade Statistics, “WSTS Semiconductor Market Forecast Fall 2022”, *WSTS*, <https://www.wsts.org/76/103/WSTS-Semiconductor-Market-Forecast-Fall-2022> (2022).
2. İnternet: World Semiconductor Trade Statistics, “WSTS Semiconductor Market Forecast Fall 2023”, *WSTS*, <https://www.wsts.org/76/Recent-News-Release> (2023).
3. İnternet rapor : Global Market Insights Inc., “Solar Cells Market Size & Share, Forecast Report 2022-2028”, *GMI*, <https://www.gminsights.com/industry-analysis/solar-cells-market> (2022).
4. Al-Ahmadi, N. A., “Metal oxide semiconductor-based Schottky diodes: a review of recent advances ”, *Materials Research Express*, 7 (3): 032001 (2020).
5. Çaldıran, Z., “Modification of Schottky barrier height using an inorganic compound interface layer for various contact metals in the metal/p-Si device structure”, *Journal of Alloys and Compounds*, 865, 158856 (2021).
6. Braun, F., “Ueber die stromleitung durch schwefelmetalle,” *Annalen der Physik und Chemie*, 229 (12): 556-563 (1875).
7. Mönch, W., “On the Present Understanding of Schottky Contacts”, *Electronic Structure of Metal-Semiconductor Contacts, Perspectives in Condensed Matter Physics 1st ed.*, Springer, Dordrecht, 4: 202–223 (1990).
8. Sze, S. M., and Lee, M. K., “Semiconductor Devices: physics and technology 3<sup>rd</sup> ed.”, *John Wiley and Sons Inc.*, New York, 3, 40,168, 174, 234, 236, 238 (2012).
9. Copper Development Association, “Copper in Instrumentation, 3rd ed.”, *C.D.A. Publication*, England (1955).
10. Schottky, W. and Deutschmann, W., “Zum Mechanismus der Richtwirkung in Kupferoxydulgleichrichtern”, *Electronic Structure of Metal-Semiconductor Contacts, Perspectives in Condensed Matter Physics 1. ed.*, Springer Dordrecht, 45–52 (1990).
11. Wilson, A. H., “The theory of electronic semi-conductors”, *Proceedings Of The Royal Society Of London, Series A, Containing Papers Of A Mathematical And Physical Character*, 133 (822): 458–491 (1931).

12. Wilson, A. H., and Fowler, R. H., "The theory of electronic semi-conductors-II", Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 134 (823): 277–287, (1931).
13. Mott, N. F., "The theory of crystal rectifiers," Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, 171 (944): 27–38, (1939).
14. Boyle, W. S., and Smith, G. E., "Charge coupled semiconductor devices", *Bell System Technical Journal*, 49 (4): 587-593 (1970).
15. Singh, B., and Mehta, B. R., "Relationship between nature of metal-oxide contacts and resistive switching properties of copper oxide thin film based devices", *Thin Solid Films*, 569: 35–43 (2014).
16. Kaur, R., Arora, A., and Tripathi, S. K., "Fabrication and characterization of metal insulator semiconductor Ag/PVA/GO/PVA/n-Si/Ag device", *Microelectronic Engineering*, 233: 111419 (2020).
17. Enaganti, P. K., Soman, S., Devan, S. S., Pradhan, S. C., Srivastava, A. K., Pearce, J. M., and Goel, S., "Dye-sensitized solar cells as promising candidates for underwater photovoltaic applications", *Progress In Photovoltaics: Research And Applications*, 30 (6): 632–639 (2022).
18. Oener, S. Z., van de Groep, J., Macco, B., Bronsveld, P. C. P., Kessels, W. M. M., Polman, A., and Garnett, E. C., "Metal–Insulator–Semiconductor Nanowire Network Solar Cells", *Nano Letters*, 16 (6): 3689–3695 (2016).
19. Neamen, D. A., Semiconductor physics and devices: Basic principles, 4th ed., US: *Mc Graw Hill*, 10,144-146,226,322,332-351 (2012).
20. Demirel, H., Elektronik-I, 3. baskı, *Birsen Yayınevi*, Türkiye, 77 (2018).
21. Moss, G. L., Graham, P., Sandige, R. S., and Hinton, H. S., "79.1 IC Logic Family Operation and Characteristics", *The Electrical Engineering Handbook*, *CRC Press LLC*, Boca Raton (2000).
22. Nela, L., Kampitsis, G., Ma, J., and Matioli, E., "Fast-switching tri-anode Schottky barrier diodes for monolithically integrated GaN-on-Si power circuits", *IEEE Electron Device Letters*, 41(1), 99-102 (2019).
23. Konstantinou, X., Herrera-Rodriguez, C. J., Lai, J., Hardy, A., Albrecht, J. D., Seo, J. H., Muehle, M., Grotjohn, T., and Papapolymerou, J., "Towards High-Power Multipliers Using Diamond Schottky Barrier Diodes", *2021 IEEE International Conference On Microwaves, Antennas, Communications And Electronic Systems (COMCAS)*, Tel Aviv, Israel, 111-115 (2021).
24. Gao, J., Jin, Y., Xie, B., Wen, C. P., Hao, Y., Shen, B., and Wang, M., "Low ON-Resistance GaN Schottky Barrier Diode With High VON Uniformity Using

- LPCVD Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Compatible Self-Terminated, Low Damage Anode Recess Technology”, *IEEE Electron Device Letters*, 39 (6): 859-862 (2018).
25. Han, Z., and Bayram, C., “Diamond p-type lateral Schottky barrier diodes with high breakdown voltage (4612 V at 0.01 mA/mm)”, *IEEE Electron Device Letters*, 44 (10): 1692–1695 (2023).
  26. Li, W., Hu, Z., Nomoto, K., Jinno, R., Zhang, Z., Tu, T. Q., Sasaki, K., Kuramata, A., Jena, D., and Xing, H. G. “2.44 kV Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vertical trench Schottky barrier diodes with very low reverse leakage current”, *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, San Francisco, CA, USA, 8.5.1-8.5.4 (2018).
  27. Tan, S. O., “ZnO arayüzey tabakalı schottky engel diyotların hazırlanması ve elektriksel özelliklerinin aydınlatma şiddetine bağlı incelenmesi”, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 8 (2016).
  28. El-Kareh, B., and Hutter, L. N. “Rectifying and Ohmic Contacts”, *Silicon Analog Components: Device Design, Process Integration, Characterization, and Reliability* 2nd ed., *Springer*, Switzerland 113-149 (2020).
  29. Bardeen, J., “Surface states and rectification at a metal semi-conductor contact”, *Physical review*, 71 (10): 717 (1947).
  30. Pimpolari, L., Brunetti, I., Sargeni, R., Pieri, F., Parvez, K., Macucci, M., Casiraghi, C., and Fiori, G., “Fully Printed and Flexible Schottky Diodes Based on Carbon Nanomaterials Operating Up to 5 MHz”, *IEEE Journal on Flexible Electronics*, 1 (3): 153-158 (2022).
  31. Rocha-Aguilera, D., Ferrusca-Rodríguez, D., and Molina-Reyes, J., “Fabrication and characterization of Al-based integrated MIS capacitors”, *2023 IEEE Latin American Electron Devices Conference (LAEDC)*, Puebla, Mexico, 1-4 (2023).
  32. Tan, S. O., Tecimer, H., and Çiçek, O., “Comparative investigation on the effects of organic and inorganic interlayers in Au/n-GaAs Schottky diodes”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 64 (3): 984-990 (2017).
  33. Altındal, Ş., Azizian-Kalandaragh, Y., Ulusoy, M., and Pirgholi-Givi, G., “The illumination effects on the current conduction mechanisms of the Au/(Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: PVC)/n-Si (MPS) Schottky diodes”, *Journal of Applied Polymer Science*, 139 (27): e52497 (2022).
  34. Sze, S. M., and Ng, K. K., “Physics of Semiconductor Devices 3rd ed.”, *John Wiley & Sons* (2007).
  35. Raju, G. G., “Dielectrics in electric fields”, *CRC press*, Boca Raton (2017).
  36. Bartnikas, R., “Dielectrics and insulators”, *The Electrical Engineering Handbook*, Editor: Dorf, R. C., *CRC Press LLC*, Boca Raton, 55: 1-20 (2000).

37. Miller, H. C., "Flashover of insulators in vacuum: review of the phenomena and techniques to improved holdoff voltage", *IEEE transactions on electrical insulation*, 28(4): 512-527 (1993).
38. Kingery, W. D., Bowen, H. K., and Uhlmann, D. R., "Introduction to ceramics" *John Wiley & Sons*, 17 (1976).
39. Geyer, R. G., "Dielectric Characterization and Reference Materials", *NIST Publications*, Boulder, Colorado, USA, (1990).
40. Kasap, S. O., "Principles of Electronic Materials and Devices 3rd ed.", *Mc Graw Hill*, NY, USA (2006).
41. Nurtan, Y., "Au/SiO<sub>2</sub>/N-Si MOS yapıların CVF ve GVF karakteristiklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 37 (2010).
42. Gökçen, M., "Au/SiO<sub>2</sub>/n-GaAs (MOY) yapıların elektrik ve dielektrik karakteristiklerinin frekans ve sıcaklığa bağlı incelenmesi", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 48 (2008).
43. Kasap, S., and Capper, P., (Eds.) "Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials", *Springer* (2017).
44. Choudhary, R. N. P., and Patri, S. K., "Dielectric Materials: introduction, research and applications", *Nova Science Publishers* (2009).
45. Tataroğlu, A., "Dielectric permittivity, AC conductivity and electric modulus properties of metal/ferroelectric/semiconductor (MFS) structures", *Gazi University Journal of Science*, 26 (3): 501-508 (2013).
46. Jonscher, A. K., "Dielectric relaxation in solids", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 32(14): R57 (1999).
47. Tuncer, E., Serdyuk, Y. V., and Gubanski, S. M., "Dielectric mixtures: electrical properties and modeling", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 9 (5): 809-828 (2002).
48. Tsonos, C., "Comments on frequency dependent AC conductivity in polymeric materials at low frequency regime", *Current Applied Physics*, 19 (4): 491-497 (2019).
49. Yan, X., Xu, T., Chen, G., Yang, S., and Liu, H., "Study of structure, tribological properties and growth mechanism of DLC and nitrogen-doped DLC films deposited by electrochemical technique", *Applied Surface Science*, 236 (1-4): 328-335 (2004).
50. Hajimazdarani, M., Derakhshandeh, M. R., Eshraghi, M. J., and Massoudi, A., "Investigation of optoelectrical and Schottky behavior of diamond-like carbon

- coating deposited by hollow cathode PACVD method”, *Optical Materials*, 119:111385 (2021).
51. Zeng, A., Neto, V. F., Gracio, J. J., and Fan, Q. H., “Diamond-like carbon (DLC) films as electrochemical electrodes”, *Diamond and Related Materials*, 43:12-22 (2014).
  52. Wan, S., Wang, L., and Xue, Q., “Electrochemical deposition of sulfur doped DLC nanocomposite film at atmospheric pressure”, *Electrochemistry communications*, 12 (1): 61-65 (2010).
  53. Kahn, M., Menegazzo, N., Mizaikoff, B., Berghauser, R., Lackner, J. M., Hufnagel, D., and Waldhauser, W., “Properties of DLC and Nitrogen-Doped DLC Films Deposited by DC Magnetron Sputtering”, *Plasma Processes and Polymers*, 4 (S1): S200-S204 (2007).
  54. Písařík, P., Jelínek, M., Smetana, K., Dvořánková, B., Kocourek, T., Zemek, J., and Chvostová, D., “Study of optical properties and biocompatibility of DLC films characterized by  $sp^3$  bonds”, *Applied Physics A*, 112:143-148 (2013).
  55. Ray, S. C., Pong, W. F., and Papakonstantinou, P., “Iron, nitrogen and silicon doped diamond like carbon (DLC) thin films: A comparative study”, *Thin Solid Films*, 610: 42-47 (2016).
  56. Kim, T. G., Kim, J. K., Cho, H., Yoon, S. J., and Kim, H. S., “Electrical, transparence and wetting properties of Diamond like carbon films”, *International Journal of Modern Physics B*, 25 (31): 4180-4184 (2011).
  57. Brundle, C. R., Evans, C. A. Jr., & Wilson, S., "Encyclopedia of Materials Characterization: Surfaces, Interfaces, Thin Films," *Butterworth-Heinemann*, Stoneham (1992).
  58. Dłużniewski, M., Staryga, E., Stanishevsky, A. V., Tochitsky, E. I., Mitura, S., and Bak, G. W., “Electrical conductivity of metal/diamond-like carbon/si system”, *Advanced Materials for Optics and Electronics*, 6 (5-6): 409-411 (1996).
  59. Khun, N. W., Liu, E., and Krishna, M. D., “Structure, adhesive strength and electrochemical performance of nitrogen doped diamond-like carbon thin films deposited via DC magnetron sputtering”, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 10 (7): 4752-4757 (2010).
  60. Wang, F. M., Chen, M. W., and Lai, Q. B., “Metallic contacts to nitrogen and boron doped diamond-like carbon films”, *Thin Solid Films*, 518 (12): 3332-3336 (2010).
  61. Huang, L., Jiang, H., Zhang, J., Zhang, Z., and Zhang, P., “Synthesis of copper nanoparticles containing diamond-like carbon films by electrochemical method”, *Electrochemistry communications*, 8 (2): 262-266 (2006).

62. Ohtake, N., Hiratsuka, M., Kanda, K., Akasaka, H., Tsujioka, M., Hirakuri, K., Hirata, A., Ohana, T., Kano, M., Inaba, H., and Saitoh, H., "Properties and classification of diamond-like carbon films", *Materials*, 14 (2): 315 (2021).
63. Green, M. L., Gusev, E. P., Degraeve, R., and Garfunkel, E. L., "Ultrathin (< 4 nm) SiO<sub>2</sub> and Si–O–N gate dielectric layers for silicon microelectronics: Understanding the processing, structure, and physical and electrical limits", *Journal of Applied Physics*, 90 (5): 2057-2121 (2001).
64. Silva, S. R. P., and Amaratunga, G. A. J., "Doping of rf plasma deposited diamond-like carbon films", *Thin Solid Films*, 270 (1-2): 194-199 (1995).
65. Zhang, J., and Dai, L., "Heteroatom-doped graphitic carbon catalysts for efficient electrocatalysis of oxygen reduction reaction", *Acs Catalysis*, 5 (12): 7244-7253 (2015).
66. Alegre, C., Sebastián, D., Gálvez, M. E., Baquedano, E., Moliner, R., Aricò, A. S., Baglio, V., and Lázaro, M. J., "N-doped carbon xerogels as Pt support for the electro-reduction of oxygen", *Materials*, 10 (9): 1092 (2017).
67. Ewels, C. P., and Glerup, M., "Nitrogen doping in carbon nanotubes", *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 5 (9): 1345-1363 (2005).
68. Bai, J., Zhu, Q., Lv, Z., Dong, H., Yu, J., and Dong, L., "Nitrogen-doped graphene as catalysts and catalyst supports for oxygen reduction in both acidic and alkaline solutions", *International journal of hydrogen energy*, 38 (3): 1413-1418 (2013).
69. Çetinkaya, H. G., Feizollahi Vahid, A., Basman, N., Demirezen, S., Şafak Asar, Y., and Altındal, Ş., "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)", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34 (9): 822 (2023).
70. Basman, N., Uzun, R., Gocer, E., Bacaksiz, E., and Kolemen, U., "Electrodeposition of Si–DLC nanocomposite film and its electronic application", *Microsystem technologies*, 24: 2287-2294 (2018).
71. Şafak Asar, Y., Feizollahi Vahid, A., Basman, N., Çetinkaya, H. G., and Altındal, Ş., "Frequency-dependent electrical parameters and extracted voltage-dependent surface states in Al/DLC/p-Si structure using the conductance method", *Applied Physics A*, 129 (5): 358 (2023).
72. Hossain, M. I., and Mansour, S., "A critical overview of thin films coating technologies for energy applications", *Cogent Engineering*, 10 (1): 2179467 (2023).
73. Feizollahi Vahid, A., Alptekin, S., Basman, N., Ulusoy, M., Şafak Asar, Y., and Altındal, Ş., "The investigation of frequency dependent dielectric properties and ac conductivity by impedance spectroscopy in the Al/(Cu-doped Diamond Like



- Carbon)/Au structures”, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34 (13): 1118 (2023).
74. Seth, J., Chaudhry, M. I., and Babu, S. V., “Electrical characteristics of plasma-deposited diamondlike carbon/silicon metal–insulator–semiconductor structures”, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 10 (5): 3125-3130 (1992).
  75. Dey, R., Dolai, S., Hussain, S., Bhar, R., and Pal, A. K., “Phosphorus doping of diamond-like carbon films by radio frequency CVD-cum-evaporation technique”, *Diamond and Related Materials*, 82: 70-78 (2018).
  76. Das, A. K., Hatada, R., Ensinger, W., Flege, S., Baba, K., and Meikap, A. K., “Dielectric constant, AC conductivity and impedance spectroscopy of zinc-containing diamond-like carbon film UV photodetector”, *Journal of Alloys and Compounds*, 758: 194-205 (2018).
  77. Tilli, M., and Haapalinna, A., “Properties of silicon”, Handbook of silicon based MEMS materials and technologies 3rd ed., 3-17, *Elsevier* (2020).
  78. Ikhmayies, S., and Çiftci, Y. Ö., "The Influence of Boron Dopant on the Structural and Mechanical Properties of Silicon: First Principles Study", *Energy Technology 2019: Carbon Dioxide Management and Other Technologies*, Springer International Publishing, 191-199, (2019).
  79. Pierret, R. F., “Advanced Semiconductor Fundamentals 2nd ed.”, *Prentice Hall*, Upper Saddle River, NJ, USA, 51-83, 134-169 (2003).
  80. Rafin, S. M. S. H., Ahmed, R., Haque, M. A., Hossain, M. K., Haque, M. A., and Mohammed, O. A. “Power Electronics Revolutionized: A Comprehensive Analysis of Emerging Wide and Ultrawide Bandgap Devices”, *Micromachines*, 14 (11): 2045 (2023).
  81. Chaudhari, M. N., Ahirrao, R. B., and Bagul, S. D. “Thin film deposition methods: A critical review”, *International Journal for Research in Applied Science & Engineering*, 9 (6): 5215-5232 (2021).
  82. Yan, S., Yan, X., Tong, Y., Zhang, M., and Liu, J., “Application of magnetron sputtering technique to fabricate sulfur/carbon composites cathode plates of lithium-sulfur battery”, *Materials Letters*, 273: 127888 (2020).
  83. Ko, K. H., Joung, Y. H., Choi, W. S., Park, M., Lee, J., and Hwang, H. S., “Structural and optical properties of a radio frequency magnetron-sputtered ZnO thin film with different growth angles”, *Nanoscale research letters*, 7: 1-5 (2012).
  84. Seshan, K., “Handbook of Thin-Film Deposition Processes and Techniques: Principles, Methods, Equipments and Applications 2nd ed.”, Norwich, New York: *Noyes Publications/William Andrew Publishing* (2002).

85. Alassi, A., Benammar, M., and Brett, D., "Quartz crystal microbalance electronic interfacing systems: A review", *Sensors*, 17(12): 2799 (2017).
86. Ohring, M., "The materials science of thin films", *Academic Press*, San Diego (1992).
87. Wasa, K., Kitabatake, M., and Adachi, H., "Thin Film Materials Technology", *William Andrew*, USA (2004).
88. İnternet: Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü, "Taramalı Elektron Mikroskobu", <http://nukbilimler.ankara.edu.tr/elektron-mikroskobu/>, (T.Y.).
89. İnternet: Alkan, A., "Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM)", <https://www.atomikateknik.com/uploads/belgeler/taramali-elektron-mikroskopisi-22634.pdf>, (01.09.2015).
90. İnternet: Aufer, W., "Introduction to Scanning Electron Microscopy (SEM)", Penn State Materials Research Institute, <https://www.mri.psu.edu/materials-characterization-lab/characterization-techniques/scanning-electron-microscopy> (24.12.2021).
91. Ersöz, M., Sulak, M., Bersani, M., Işıtan, A., Balaban, M., Yakar, Z., Ünlü, C. G., and Onar, V., "Nanoteknoloji 2: karakterizasyon ve uygulamalar" <https://hdl.handle.net/11499/3118> (2018).
92. İnternet: Wolff, A., "Scanning Electron Microscopy", Kavli Nanoscience Institute, <https://caltech.app.box.com/s/cs0wj4dn89am3fof8ox0vqetaad8ylg8/file/937868270748> (30.03.2022).
93. İnternet: Hunt, M. S., "Scanning electron microscopy (SEM) Lecture: Principles, Techniques & Applications", Kavli Nanoscience Institute, <https://caltech.app.box.com/s/cs0wj4dn89am3fof8ox0vqetaad8ylg8/file/616496111630> (07.02.2020).
94. Fadley, C. S., "X-ray photoelectron spectroscopy: Progress and perspectives", *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 178: 2-32 (2010).
95. Koitaya, T., Yamamoto, S., Matsuda, I., and Yoshinobu, J., "Surface chemistry of carbon dioxide on copper model catalysts studied by ambient-pressure x-ray photoelectron spectroscopy", *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology*, 17: 169-178 (2019).
96. Aziz, M., and Ismail, A. F., "X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) Membrane Characterization, *Elsevier*, 81-93 (2017).
97. Hewlett Packard, "Operation and service manual model 4192A low frequency impedance analyzer," 00419290001 (1984).

98. Liu, E., and Kwek, H. W., “Electrochemical performance of diamond-like carbon thin films”, *Thin Solid Films*, 516 (16): 5201-5205 (2008).
99. Yücedağ, İ., Ersöz, G., Gümüş, A., and Altındal, Ş., “Dielectric properties and electric modulus of Au/PPy/n-Si (MPS) type Schottky barrier diodes (SBDS) as a function of frequency and applied bias voltage”, *International Journal of Modern Physics B*, 29(13): 1550075 (2015).
100. Demirezen, S., Tanrıku, E. E., and Altındal, Ş., “The study on negative dielectric properties of Al/PVA (Zn-doped)/p-Si (MPS) capacitors”, *Indian Journal of Physics*, 93: 739-747 (2019).
101. Güçlü, Ç., Özdemir, A., Kökce, A., and Altındal, Ş., “Frequency and voltage-dependent dielectric properties and AC electrical conductivity of (Au/Ti)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/n-GaAs with thin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> interfacial layer at room temperature”, *Acta Physica Polonica A*, 130 (1): 325-330 (2016).
102. Altındal, Ş., Ulusoy, M., Özçelik, S., and Azizian-Kalandaragh, Y., “On the frequency-dependent complex-dielectric, complex-electric modulus and conductivity in Au/(NiS: PVP)/n-Si structures”, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32: 20071-20081 (2021).
103. Islam, M. S., Mominuzzaman, S. M., Soga, T., and Jimbo, T., “Photoabsorption in carbon and silicon layer of phosphorous doped camphoric carbon/p-silicon (n-CC/p-Si) solar cell”, *Thin solid films*, 518(10): 2867-2870 (2010).
104. Arslan, E., Badali, Y., Altındal, Ş., and Özbay, E. “Intersection behavior of the current–voltage (I–V) characteristics of the (Au/Ni)/HfAlO<sub>3</sub>/n-Si (MIS) structure depends on the lighting intensity”, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31: 13167-13172 (2020).
105. Yücedağ, İ., Kaya, A., Altındal, Ş., Uslu, İ., “Electrical and dielectric properties and intersection behavior of G/ω-V plots for Al/Co-PVA/p-Si (MPS) structures at temperatures below room temperature”, *Journal of the Korean Physical Society* 65: 2082–2089 (2014).
106. Abbas, A. S., “Ultrawide-bandgap semiconductor of carbon-based materials for meta-photonics-heterostructure, lasers, and holographic displays”, *AAPPS Bulletin*, 33 (1): 4 (2023).
107. Rodrigues, A. M., “Effect of non-homogeneity of Al/CVD diamond interfaces on AC properties”, *Diamond and Related Materials*, 17 (7-10): 1264–1268 (2008).
108. Kadri, E., Dhahri, K., Zaafour, A., Krichen, M., Rasheed, M., Khirouni, K., and Barillé, R., “Ac conductivity and dielectric behavior of a-Si:H/c-Si<sub>1-y</sub>Gey/p-Si thin films synthesized by molecular beam epitaxial method. *Journal of Alloys and Compounds*”, 705: 708–713 (2017).

## ÖZGEÇMİŞ

Nuray URGUN, Erciyes Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünü bitirmiş ve 2011’de geri beslemeli yapay sinir ağları ile %96 doğrulukta el yazısı karakter tanıma çalışmasıyla lisans tezini gerçekleştirmiş, öğrencilik döneminde yönetici üyesi olduğu E.Ü. Mühendislik Kulübünde Tübitak destekli üniversite-sanayi işbirliğinin Türkiye’deki uluslararası ilk proje-pazarı örneklerinden olan Proje Park 2007 ve 2008 de dahil olmak üzere teknik kurs, teknik ve sosyal gezi, yazar buluşmaları, söyleşiler, konferans vb. 100’den fazla teknik ve sosyal etkinlikte organizatör olarak aktif rol almış, sonrasında 2012’de G.Ü. hastane teknik servis biriminde elektronik mühendisi proje müdürü olarak, sonrasında E.G.O/Italy Gas bünyesinde basınçlı doğal gaz dolun tesislerinde bakım-onarım mühendisi olarak ardından 2015-2020 arası College Station’da çeşitli sektörlerde satış sorumlusu olarak çalışmıştır. Şu an KBÜ Y.L.E. Mekatronik Mühendisliği son dönem öğrencisidir. Yayınlanmış/kabul almış çalışmalar:

### ***Yayınlanan***

Urgun, N., Feizollahi Vahid, A., Alsmael, J., A.,M., Avar, B., & TAN, S. O. Impedance Response and Phase Angle Determination of Metal-Semiconductor Structure with N-Doped Diamond Like Carbon Interlayer. Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation, 11(1), 12-23. <https://doi.org/10.54287/gujisa.1393292>

Urgun, N., Alsmael, J., A., M., & Tan, S., O. (2023). An Informetric View to the Negative Capacitance Phenomenon at Interlayered Metal-Semiconductor Structures and Distinct Electronic Devices. Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation, 10(4), 511-523. <https://doi.org/10.54287/gujisa.1357391>

Alsmael, J., A., M., Urgan, N., Tan, S. O., & Tecimer, H. (2022). Effectuality of the frequency levels on the C&G/ $\omega$ -V data of the polymer interlayered metal-semiconductor structure. Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation, 9(4), 554-561. <https://doi.org/10.54287/gujisa.1206332>

### ***Revizyon Sürecinde***

Alsmael, J., A., M., Urgan, N., Yerişkin Altındal, S., & Tan, S., O.(2024) Impedance and Interface States Depending on Frequency Analysis of Al/(ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-PVA)/p-Si Structures.

### ***Bildiri Sunumu***

Urgan, N., & Tan, S., O., The effects of doped-DLC thin films usage as an interlayer in Metal-Semiconductor Structures, 2023,6. Uluslararası Antalya Bilimsel Araştırmalar ve Yenilikçi Çalışmalar Kongresi, Antalya, Türkiye.[https://www.izdas.org/files/ugd/614b1f\\_2bb4c146d14c4054b1fe386ea6c1932f.pdf](https://www.izdas.org/files/ugd/614b1f_2bb4c146d14c4054b1fe386ea6c1932f.pdf)

Urgan, N., & Tan, S., O., A comparative study on effects of different Interlayers in MIS type Structures, 10th International Conference on Materials Science and Nanotechnology For Next Generation (MSNG-2023) 27-29 September 2023 / TÜRKİYE. <https://msng2023.com/data/ABSTRACT-FULL-TEXT-BOOK.pdf>