
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

S-KATKILI DLC (ELMAS BENZERİ KARBON) ARA KATMANLI YAPILARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNE FREKANSIN ETKİSİ

Esra KESEN İÇÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAYIS 2025

ETİK BEYAN

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

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Esra KESEN İÇÖZ

21/05/2025

S-KATKILI DLC (ELMAS BENZERİ KARBON) ARA KATMANLI YAPILARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNE FREKANSIN ETKİSİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Esra KESEN İÇÖZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2025

ÖZET

Bu tez çalışmasında metal-yarıiletken (MS) yapılarının aygıt performansını arttırmak için, elektrokimyasal biriktirme metodu ile p tipi Silisyum (Si) alttaş üzerine 100 Å kalınlıkta kükürt (S) katkılı elmas benzeri karbon (DLC) ara yüzey katmanı kullanılan Al/S-katkılı DLC/p-Si/Au metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) Schottky diyot yapısı oluşturulmuştur. Kaplanan DLC tabakanın yapısal özelliklerinin incelenmesi için SEM görüntüleri ve XRF analizleri kullanılmıştır. SEM görüntülerinde Si alttaş yüzeyinin DLC film ile kaplandığı, tane boyutları 21 nm ile 33 nm arasında değişen adacıkların filmin her yerinde hemen hemen düzgün şekilde dağıldığı görülmüştür. Atomların türü veya miktarı hakkında bilgi edinmek amacıyla (XPS) analizi kullanılmıştır. Bu ölçüm sonuçlarında hedeflenen S katkılı DLC yapısının C 1s ve S 2p XPS spektrumları açıkça elde edilmiştir. Üretilen S katkılı DLC yapının elektriksel özelliklerinin incelenmesinde frekansa ve uygulama voltajına bağlı olarak admitans spektroskopisinin elemanları kapasitans (Cm-V-f) ve iletkenlik (Gm/ω-V-f) ölçüm sonuçları kullanılmıştır. Bu inceleme için çizilen $C^{-2} - V$ grafiğinden Φ_b,E_F, N_A ve W_D gibi aygıta özgü elektriksel çıktı parametreleri elde edildi. Çıktı parametrelerinin frekansa bağlı değişiminin tam bir spektrumda incelemesi için admitans ölçümleri 2 kHz-2 MHz frekans aralığı ve $\mp 5\,V$ uygulama gerilimi bölgesinde gerçekleştirildi. D_{it}'nin uygulama gerilimine göre dağılım profilleri, düşük yüksek frekans metodu ve kondüstans metodu kullanılarak elde edildi. Nicollian ve Brews metodu kullanılarak seri direnç R_s grafiği elde edildi.

Bilim Kodu	:	93008
Anahtar Kelimeler	:	S katkılı elmas benzeri yapılar (S katkılı DLC), Elektriksel karakterizasyon, Yüzey durumları, Seri Direnç, MIS yapılar
Sayfa Adedi	:	41
Danışman	:	Prof. Dr. Yasemin ŞAFAK ASAR

THE EFFECT OF FREQUENCY ON THE ELECTRICAL PROPERTIES OF S DOPED DLC (DIAMOND-LIKE CARBON) INTERLAYER STRUCTURES

(M. Sc. Thesis)

Esra KESEN İÇÖZ

GAZI UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2025

ABSTRACT

In this thesis, an Al/S-doped DLC/p-Si/Au metal-insulator-semiconductor (MIS) Schottky diode structure was fabricated by using electrochemical deposition method, with a 100 Å thick sulfur (S)-doped diamond-like carbon (DLC) interfacial layer on p-type Silicon (Si) substrate, to improve the device performance of metal-semiconductor (MS) structures. SEM images and XRF analysis were used to investigate the structural properties of the coated DLC layer. SEM images showed that the surface of the Si substrate was covered with DLC film and the islands with grain sizes ranging from 21 nm to 33 nm were almost uniformly distributed all over the film. XPS analysis was used to obtain information about the type or amount of atoms. The measurement results showed that the C 1s and S 2p XPS spectra of the targeted S-doped DLC structure were clearly obtained. In order to investigate the electrical properties of the fabricated S-doped DLC structure, the results of capacitance (Cm-V-f) and conductivity (Gm/ω-V-f) measurements, which are elements of admittance spectroscopy, were used depending on the frequency and application voltage. Device-specific electrical output parameters such as Φ_b,E_F, N_A and W_D were obtained from the $C^{-2} - V$ plot for this investigation. Admittance measurements were performed in the frequency range 2 kHz-2 MHz and in the region of ∓ 5 V application voltage in order to investigate the frequency dependence of the output parameters in a full spectrum. The distribution profiles of D_{it} with respect to the application voltage were obtained by using the low high frequency and conductance method. R_s graph was obtained using the Nicollian and Brews method.

Science Code : 93008
Key Words : S doped Diamond Like Carbon (S doped DLC), Electrical characterization, Surface states, Series resistance, MIS structures
Page Number : 41
Supervisor : Prof. Dr. Yasemin ŞAFAK ASAR

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca tecrübesi ve sonsuz anlayışı ile bana her daim içtenlikle destek olan ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Yasemin ŞAFAK ASAR'a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunmayı bir borç bilirim.

Bu tez çalışmasında kullandığım örneklerin üretimi için; 6 Şubat 2023 depreminde kaybettiğimiz merhum Doç. Dr. Necati BAŞMAN hocamızı saygı ve rahmetle anıyor, tezimde kullandığım örneklerin yapısal analizlerini yapan Sayın Dr. Aylar FEIZOLLAHI VAHID'e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunuyorum.

Tez çalışmam süresince, tecrübeleri ile beni yönlendiren ve manevi desteğini her zaman yanımda hissettiğim saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Tarık ASAR'a destekleri için teşekkür ediyor, saygılarımı sunuyorum.

Her zaman yanımda olan ve çalışmam süresince de beni destekleyen, tüm yaşamım boyunca fedakarlıklarını esirgemeden yanımda olan çok kıymetli annem, babam ve kardeşlerime teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez çalışmam boyunca sevgi ve sabırla yanımda olan, bana her zaman yol göstererek desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Gürhan İÇÖZ'e sevgi ve saygılarımla teşekkürü bir borç bilirim.

Bana daima güç veren biricik kızım Duru İÇÖZ'e sevgisi ve varlığı için sonsuz teşekkür ediyor, sevgilerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. TEORİK BİLGİLER 3

2.1. İletkenler, Yalıtkanlar ve Yarıiletkenler 3

2.2. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklar 4

2.2.1. Ohmik kontak 5

2.2.2. Schottky kontak 5

2.3. Gerçek Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Yapı 5

2.3.1. Yığılım 9

2.3.2. Tükenim 10

2.3.3. Tersinim 10

2.3.4. Gerçek MIS yapının arayüzey yükleri ve durumları 11

2.4. Arayüzey Durumları 12

2.4.1. Arayüzey durumları ve seri direncin empedans ölçümlerinden hesaplanması 13

3. DENEYSEL SONUÇLAR 17

3.1. S katkılı DLC Filmlerin Üretimi 17

3.2. Ohmik ve Doğrultucu Kontakların Oluşturulması 18

3.3. Yüzey Karakterizasyonu 19

Sayfa

3.3.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)..... 19

3.3.2. X ışınları fotoelektron Spektroskopi (XPS) 21

3.4. Admitans Yöntemi ile Elektriksel Karakterizasyonu 22

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 35

KAYNAKLAR..... 37

ÖZGEÇMİŞ 41

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Arayüzey durumları ve yük alışverişi 12

Çizelge 3.1. 2 kHz- 2 MHz frekans aralığında C^(-2)-V eğrilerinden, Al/(S katkılı DLC)/p-Si yapısı için hesaplanan elektriksel çıktı parametreleri 27

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Yalıtkan, yarıiletken ve iletkenlerin band yapısının gösterimi 4

Şekil 2.2. MIS yapının enerji-bant diyagramı..... 7

Şekil 2.3. MIS kapasitansının eşdeğer devresi..... 8

Şekil 2.4. V ≠0 durumunda ideal MIS yapının enerji-bant şeması 10

Şekil 2.5. Bir metal/arayüzey-tabaka/yarıiletken (MIS) tipi yapıların eşdeğer devresi 15

Şekil 3.1. S katkılı DLC ince film üretimi için kullanılan elektrokimyasal biriktirme yönteminin şematik gösterimi 17

Şekil 3.2. Üretilen S-katkılı DLC yapının XPS spektrumları a) C 1s ve b) S 2p 22

Şekil 3.3. Al/(S Katkılı DLC)/p-Si yapısı için a) C-V b) C-ln(ω) eğrileri..... 23

Şekil 3.4. Al/(S Katkılı DLC)/p-Si yapısı için a) G_m/ω-V b) G_m/ω-ln(ω) eğrileri..... 24

Şekil 3.5. Al/(S Katkılı DLC)/p-Si/Au yapı için farklı frekanslarda elde edilen ters beslem C^(-2)-V eğrileri..... 23

Şekil 3.6. Al/(S Katkılı DLC)/p-Si/Au yapı için farklı frekanslarda hesaplanan seri direnç değerlerinin a) voltaja b) frekansa göre değişim grafiği..... 29

Şekil 3.7. 2 MHz frekansta ölçülen kapasitans C_m değerlerinden hesaplanan düzeltilmiş C_c değerleri 30

Şekil 3.8. 2 MHz frekansta ölçülen iletkenlik G_m/ω değerlerinden hesaplanan düzeltilmiş G_c/ω değerleri 31

Şekil 3.9. Düşük yüksek frekans kapasitans yöntemi ile elde edilen yüzey durumları dağılım grafiği 31

Şekil 3.10. 0,60 V ile 1,60 V arasında hesaplanan G_p/ω-ln ω eğrileri 32

Şekil 3.11. Al/(S Katkılı DLC)/p-Si/Au yapısının kondüktans metodu ile hesaplanan ve uygulama gerilimine bağlı D_{it} ve τ dağılım grafikleri 33

RESİMLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Resim 3.1. Manyetik alan DC-RF saçtırma ünitesi. 18

Resim 3.2. ESEM: FEI Quanta 200EF model 20

Resim 3.3. S-katkılı DLC nanokompozit filmin SEM görüntüsü..... 20

Resim 3.4. Tek renkli bir Kα X-ışınına sahip bir SPECS fotoelektron spektrometresi (XPS) 21

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamalarıyla birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
C	Kapasitans/sığa
C_m	Ölçülen kapasitans
C_c	Düzeltilmiş kapasitans
C_{ox}	Yalıtkan tabakanın kapasitansı
C_{sc}	Uzay yükü kapasitans
C-V	Kapasitans-Gerilim
d_i	Arayüzey tabakanın kalınlığı
D_{it}	Arayüzey tuzakları
d_{ox}	Yalıtkan tabakanın kalınlığı
E_c	İletkenlik bandı
E_F	Fermi enerji seviyesi
E_g	Yasak enerji aralığı/ bandı
eV	Elektron-volt
E_v	Valans bandı
G	Kondüktans (iletkenlik)
G_c/ω	Düzeltilmiş iletkenlik
G_m/ω	Ölçülen kondüktans
G/ω-V	Kondüktans-Gerilim
Hz	Frekans birimi Hertz
kHz	Frekans birimi kilo Hertz
MHz	Frekans birimi kilo Megahertz
N_A	Alıcı katkı atomlarının yoğunluğu
N_D	Verici katkı atomlarının yoğunluğu
n-Si	N tipi Silikon
^oC	Sıcaklık birimi santigrat
p-Si	P tipi Silikon

Simgeler	**Açıklamalar**
R_s	Seri Direnç
Ω	Direnç birimi Ohm
Si	Silikon
V_D	Difüzyon potansiyeli
V_F	Geçit voltajı
W_D	Tüketim tabakasının genişliği
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
Φ_b	Schottky engel yüksekliği
ε_{ox}	Yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti
ε_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
χ_s	Elektron yakınlığı
Q_{sc}	Uzay yükü
ω $(=2\pi f)$	Açısal frekans

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
DLC	Elmas Benzeri Karbon
MS	Metal-Yarıiletken Yapılar
MIS	Metal-Yalıtkan-Yarıiletken Yapılar
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XPS	X Işınları Fotoelektron Spektroskopi

1. GİRİŞ

1874 yılında F. Braun; demir, sülfit ve kurşun sülfit yarıiletkenleri üzerinde metal nokta kontaklar kullanarak metal-yarıiletken (MS) kontakların doğrultma özelliğini keşfetmiştir. Schottky, Störmer ve Waibel 1931 yılında MS kontaklar üzerine yaptıkları araştırmada; akımın etkisiyle kontağın bütününde potansiyelin azalması sonucu engel yüksekliğinin varlığını göstermişlerdir [1–2]. 1938 yılında hem Schottky hem de Mott birbirinden bağımsız birer çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarda Schottky kimyasal bir katman olmadan, potansiyel engelinin sadece yarı iletkendeki kararlı uzay yüklerinden kaynaklanabileceği düşüncesini ortaya atmıştır. Bu nedenle bariyer yüksekliği Schottky bariyeri olarak adlandırılmaktadır. Mott ise metal-yarıiletken kontaklar Mott Bariyerini tasarlamıştır [3]. Sonuç olarak Schottky-Mott Teorisi, metal-yarıiletken kontakların temas yüzeylerinde oluşan potansiyel engel yüksekliğini ortaya koymak için Walter Schottky ve Nevill Mott tarafından birbirinden bağımsız ve eş zamanlı olarak geliştirilmiştir [4–5].

Metal ile yarıiletken arasına deneysel yöntemler ile yerleştirilen bir katmanın veya kendiliğinden oluşan yalıtkan bir oksit tabakasının varlığı metali yarıiletkenden izole ederek, yapıyı metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapıya dönüştürmektedir. Bu yapılarda, arayüzey tabakanın varlığı, yapının elektriksel özelliklerini dikkate değer ölçüde değiştirmektedir. Yalıtkan malzemenin seçimi sırasında; malzemenin yüzeyine uygulanan işleme, yüzeyin dirençli hale getirilmesine ve yüzey pasivasyonunu artıracak, ters beslem sızıntı akımını minimuma indirerek akım-iletimi ve kontrolünü sağlayabilecek, bununla beraber doğrultucu özelliklerini arttırabilecek malzemelerin seçimine dikkat edilmelidir [6]. Metal-yarıiletken (MS) kontak diyot çalışmaları, 1960'lı yıllarda hız kazanarak birçok uygulamaya yön vermiştir. Yapılan çalışmalarda seri direnç (R_s) ve ara yüzey durumlarının (N_{ss}) elektriksel karakteristikleri üzerine frekans ve sıcaklık etkisi incelenmiştir [7–8]. Schottky diyotlar, yüksek frekanslarda iletkenlik ve yalıtkanlık durumları arasında hızlı geçişler yapabilmeleri, üstlerine uygulanan geriliminin yön değiştirmesi, hızlı bir şekilde anahtarlama yapabilmeleri ve düşük seviyede ileri gerilim düşüşü gibi özelliklere sahiptirler. Bu özellikleri ile Schottky diyotları diğer diyotlara göre kullanım üstünlüğü sağlamaktadır. Bu özellikleri dikkate alındığında Schottky diyotun farklı malzemeler kullanılarak üretimi ve kullanımı son derece önemli hale gelmektedir [6–9].

Kullanım alanlarının son yıllarda hızla gelişim göstermesi ile kendisine Schottky diyot üretiminde de yer bulan karbon; genellikle kristal yapılı olan grafit, elmas ve florin şeklinde bulunmaktadır. Bu yapılar karbon atomlarının bağlanma şekillerinin farklı olmasından dolayı farklı özellikler sergilemektedirler. Grafitteki baskın bağ olan sp^2 ve elmastaki baskın bağ olan sp^3 ile bağlı, karbon içeren amorf yapıdaki karbon şekline Elmas Benzeri Karbon (DLC) adı verilmiştir. Elmas Benzeri Karbon (DLC) filmleri, metalik malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek için çoğunlukla kullanılmaktadır. Elmas benzeri karbon yapılar; yüksek sp^3 oranına sahip olduğundan düşük sürtünme katsayısı, yüksek sertlik ve yüksek kimyasal kararlılığa sahiptirler [10–11]. DLC (Diamond Like Carbon) filmleri, amorf karbon ya da hidrojene amorf karbon malzemeleri olup, değişik oranlarda sp^2 ve sp^3 hibrid bağları içerirler. Bunlar eşsiz elektriksel, optik, mekanik ve tribolojik özellikler sergileyerek uygulama alanlarına geniş bir potansiyel sunmaktadır. DLC filmler; katkı malzemesine ve üretim yöntemine bağlı olarak yüksek direnç, elektriksel yalıtkanlık (dielektrik mukavemet) gibi özellikler de gösterebilirler. Bu sebeple, özellikle elektronik uygulamalarda tercih edilmektedir. Ayrıca, DLC filmlerin elektriksel özelliklerini geliştirmek için katkı metalleri sıklıkla kullanılmaktadır.

Bu çalışmada; S katkılı DLC arayüzeyine sahip MIS yapı kullanılarak Schottky diyot üretilmiş ve üretilen diyotun oda sıcaklığında ve geniş bir frekans aralığında (2 kHz-2 MHz) kapasitans ve iletkenlik-voltaj ölçümleri tamamlanmıştır. Safsızlık konsantrasyonu, engel yüksekliği, Fermi enerji seviyesi, seri direnç, tüketim tabakasının kalınlığı ve difüzyon potansiyeli gibi elektriksel çıktı parametrelerinin belirlenmesi için elde edilen ölçüm sonuçları kullanılarak karakteristik $C^{-2} - V$ grafiği çizilmiştir. Frekans ve uygulanan gerilime bağlı olarak Schottky diyotun difüzyon potansiyeli (V_D), alıcı atomların katkı konsantrasyonu (N_A), Fermi enerji seviyesi (E_F), tüketim tabakası genişliği (W_D) ve bariyer yüksekliği (Φ_B) gibi temel elektriksel parametreleri hesaplanmıştır. Bu elektriksel çıktı parametrelerinin, voltaj ve uygulanan gerilimle güçlü bir şekilde değiştiği görülmüştür. Ayrıca, aygıt performansını etkileyen arayüzey durumlarının değişimi ve dağılımı düşük-yüksek frekans ve kondüktans metotları kullanılarak incelemiştir.

2. TEORİK BİLGİLER

2.1. İletkenler, Yalıtkanlar ve Yarıiletkenler

Atomun yapısında; çekirdek, çekirdeğin etrafındaki yörüngelerde yer alan elektronlar bulunur. Bu yörüngelerin en dışında bulunan yörüngedeki elektronlara ise valans elektronları denir. Bir maddenin elektriksel özelliğini o maddenin valans elektronlarının sayısı belirler. Herhangi bir dış etki sonucu, valans bandında yer alan elektronlar yeteri kadar enerji kazanırlarsa, bağlı oldukları atomdan ayrılarak serbest elektron haline geçerler. Serbest elektronlara sahip ve elektrik akımına karşı hiç direnç göstermeyen veya çok az direnç gösteren malzemelere; iletken denir. İletken malzemelerin valans bandı ile iletim bandı çakışık durumdadır. Bakır (Cu), Altın (Au), Alüminyum (Al), Gümüş (Ag) çok iyi iletken malzemelere örnek olarak verilebilir. İletken malzemelerde iletkenlik derecesi, atomun son yörüngesindeki valans elektron sayısının azlığına bağlıdır. Ancak, çoğu malzeme serbest elektrona sahip değildir ve elektronlarını kolay paylaşma eğiliminde de değildir. Bu nedenle de elektrik akımını iletmezler. Bu yapıdaki malzemelere yalıtkan denir. Bu malzemelerin son yörüngeleri elektrona doymuş haldedir ve bu yörüngelerden elektron koparmak zordur. Bu durum, Şekil 2.1.'de verilen malzemelerin enerji band yapısına göre sınıflamasını gösteren şema ile açıklanabilir. Buna göre, yalıtkanlarda iletim bandı ile valans bandı arasında yer alan yasak bölge, dışarıdan uygulanacak herhangi bir enerji ile bile aşılamayacak kadar geniştir. Başka bir ifadeyle, elektronlar atomlara sıkı sıkıya bağlı oldukları için, normal sıcaklıklarda ne termal titreşim ile ne de normal elektrik alan ile elektronlar atomdan koparılamazlar. Ayrıca, son yörüngelerindeki elektron sayısı azaldıkça elektron koparmak daha kolay hale geleceğinden yalıtkanlık dereceleri düşer.

İletkenler ile yalıtkanlar arasında bulunan maddelere ise yarıiletken denir. Bu malzemeler ne iyi bir yalıtkan ne de iyi bir iletkendir [12–13]. Bir yarıiletken mutlak sıfırda (0 K) mükemmel bir yalıtkan gibi davranır. Bunun nedeni bandlarının tamamen dolu veya tamamen boş olmasıdır. Elektronların bazıları mutlak sıfırdan daha yüksek sıcaklıklarda gerekli enerjiyi kazandıklarında, valans bandından yasak enerji aralığını aşabilecek kadar enerji alarak, boş olan iletim bandına geçebilir, bu sayede elektriksel iletkenliğe katkı sağlayabilirler [14]. Bir yarıiletken malzemenin özelliklerini anlatmak ve kavramak için iş

fonksiyonu (Φ_s), Fermi enerji seviyesi (E_F) ve elektron yakınlığı (χ_s) gibi parametrelerden yararlanılmaktadır. Bu parametrelerin tanımları aşağıda kısaca verilmiştir.

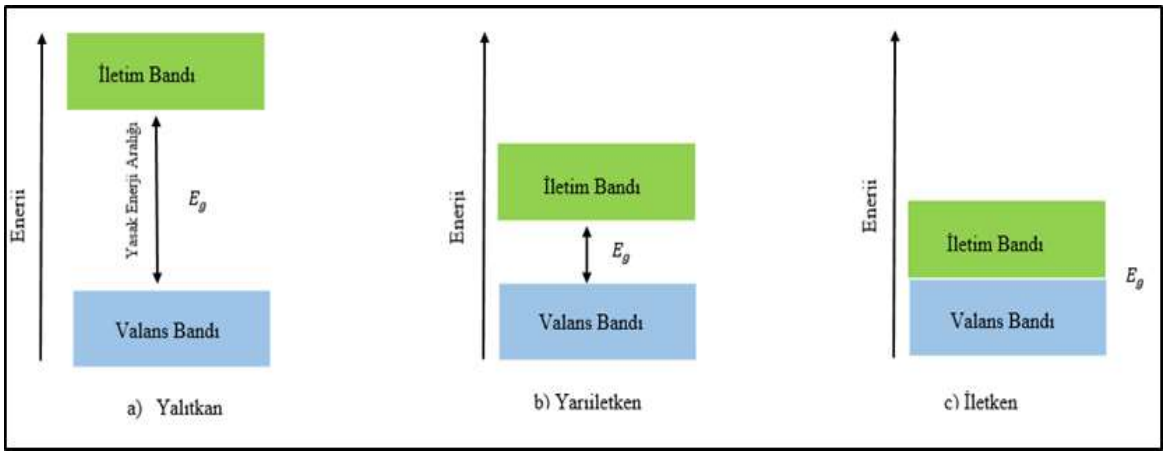
Fermi enerji seviyesi (E_F); 0 K sıcaklığında elektronun maksimum enerjisini tanımlar. Dolu enerji seviyesi ile boş enerji seviyesini birbirinden ayıran seviyedir.

Vakum seviyesi; metalin dışında bulunan ve hareket etmeyen, sıfır kinetik enerjili bir elektron için tanımlanan enerji seviyesidir.

Metalin iş fonksiyonu (Φ_m)*;* Metalin içindeki bir elektronu, Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarabilmek için ya da başka bir deyişle; metal içindeki elektronu serbest hale getirebilmek için gereken minimum düzeydeki enerji miktarıdır. En yalın haliyle, vakum seviyesi ile Fermi enerji seviyesi arasındaki enerji farkı şeklinde tanımlanabilir.

Yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s); Yarıiletken malzemenin Fermi enerji seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkı şeklinde tanımlanabilir. Yarıiletkende katkı atomlarının (donör ve akseptör) yoğunluğuyla Fermi enerjisi değiştiği için yarıiletkenin iş fonksiyonu da değişkendir.

Elektron yakınlığı (χ_s) ; Bir yarıiletkenin iletkenlik bandıyla vakum seviyesi arasındaki enerji farkı olarak tanımlanır [15].



Şekil 2.1. Yalıtkan, yarıiletken ve iletkenlerin band yapısının gösterimi

2.2. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklar

Metal ve yarıiletken arasında iki tip kontak oluşabilir. Bunlardan ilki Schottky Kontak diğer adı ile doğrultucu kontak olarak adlandırılan kontaklardır. Bu kontaklar, lineer olmayan doğrultucu akım-gerilim karakteristiğine sahiptir. Diğer kontak türü ise; doğrultucu olmayan ve lineer akım-gerilim karakteristiğine sahip Ohmik kontaktır. n-tipi yarıiletken kontaklarda $\Phi_m > \Phi_s$ ise doğrultucu kontak, $\Phi_m < \Phi_s$ ise ohmik kontak oluşur. p-tipi yarıiletken kontaklarda ise $\Phi_m > \Phi_s$ olursa ohmik kontak, $\Phi_m < \Phi_s$ olursa doğrultucu kontak oluşur [16].

2.2.1. Ohmik kontak

Metal ile yarıiletken arasında hollerin ve elektronların iki yönlüde kolaylıkla geçebildiği, doğrultucu olmayan, düşük dirence sahip kontaklardır. Kontağın akım-gerilim karakteristiği Ohm kanununa uyar. n-tipi yarıiletken kontaklarda metalden yarıiletkene geçiş ile, yarıiletkenden metale doğru geçişteki akım taşıyıcıların karşılaştığı engel yükseklikleri arasında büyük bir fark yoktur. Bundan dolayı akım yönden bağımsızdır. Dolayısıyla kontağın akıma karşı simetrik davranması, kontağın ohmik kontak olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak; kontağın ohmik olabilmesi için kontakta var olan yük taşıyıcıların birbirine homojen bir şekilde karışması gerekmektedir. Difüzyonun az olması iyi bir ohmik kontak oluşumunu engeller. Difüzyon ne kadar iyi ise ohmik kontak da o kadar iyi demektir.

2.2.2. Schottky kontak

Bir metal malzeme, yarıiletken malzeme ile kontak oluşturacak biçimde yan yana getirildiğinde Fermi enerji seviyeleri eşitlenir. Metal ile yarıiletken arasında termal denge sağlanana kadar karşılıklı olarak elektron alışverişi gerçekleşir. Bu geçişler gerçekleşirken, ara yüzeyde ortaya çıkan yük ayrımı bir potansiyel engeli oluşmasına neden olur. Bu ara yüzey bölgesi yarıiletken malzemenin olduğu tarafta meydana gelir. Bu kısımda hareketli yükler yoktur ve yüksek direnç vardır. Ara yüzey bölgesinde oluşan potansiyel engelinin, metal ve yarıiletken malzemelerin iş fonksiyonlarının arasındaki fark nedeniyle oluştuğu Schottky-Mott tarafından ortaya konulmuştur [17].

Schottky diyotlar; gerilim değişimlerine karşılık verebilen ve yüksek frekans değerlerinde çalışılabilen malzemelerdir. İletken yapıdan çok hızlı bir şekilde yalıtkanlık özelliğine geçiş yapabilirler. Bu özellikleri, yarıiletken fiziğinde sıklıkla kullanılmalarına imkân sağlamaktadır.

2.3. Gerçek Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Yapı

İdeal MIS yapılar aşağıda verilen özelliklere sahiptir;

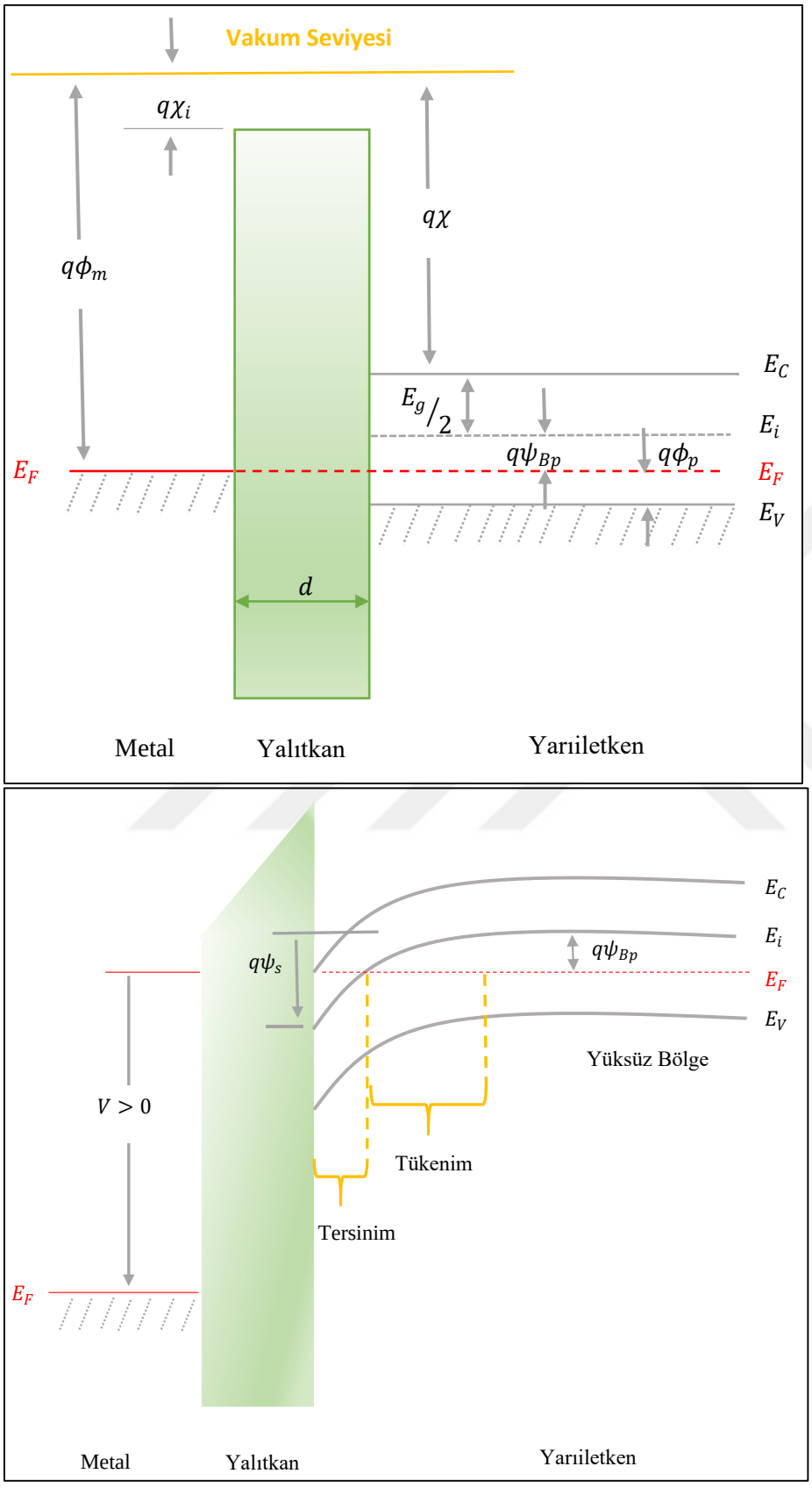
- Herhangi bir gerilim uygulanmadığı zaman; metalin iş fonksiyonu (Φ_m) ile yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) eşitlenir ve aralarındaki fark sıfır olur.

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_B\right) = 0 \qquad \text{n-tipi} \tag{2.1}$$

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_B\right) = 0 \qquad \text{p-tipi} \tag{2.2}$$

Eşitliklerde;
χ ; yarıiletkenin elektron yakınlığı,
E_g; yasak enerji aralığı,
ψ_B; Fermi enerji seviyesi (E_F) ile saf enerji seviyesi (E_i) arasındaki enerji farkını ifade etmektedir.

- Metal ile yarıiletken tabakalar arasında bulunan yalıtkan malzemenin bant aralığının oldukça büyük olması nedeniyle iletkenlik bandındaki yük taşıyıcı yoğunluğu oldukça düşük seviyede kalır ve dolayısıyla ihmal edilebilir.
- Yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde arayüzey durumları ile arayüzey yükleri yer almaz.
- Doğru akım (D.C.) beslem koşullarında yalıtkan bölgeye doğru taşıyıcı yük geçişi gerçekleşmez. Çünkü yalıtkanın teorik olarak özdirenci sonsuzdur ve elektriksel iletimi engeller.
- Beslem durumu fark etmeksizin yalıtkan tabakayla temas halinde bulunan metal yüzeyindeki yükler ve yarıiletkendeki yükler eşittir, ancak zıt yönlüdür.



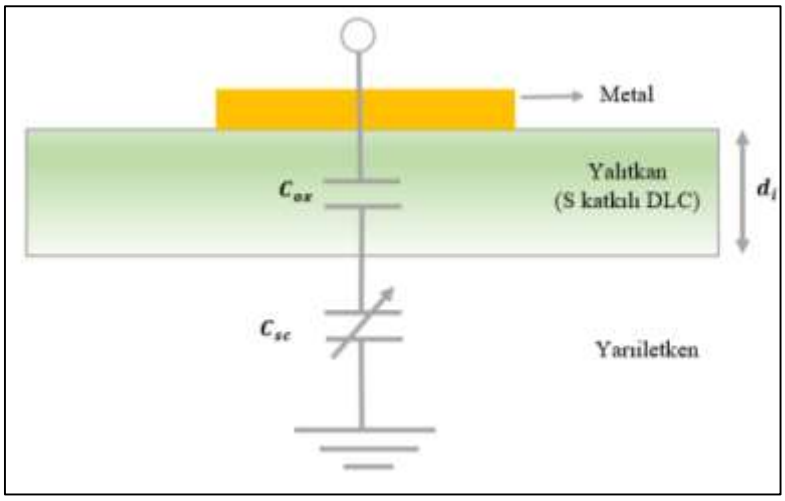
Şekil 2.2. MIS yapının enerji-bant diyagramı, (a)Bir dış gerilim yokken ($V = 0$), (b) Uygulanan bir dış gerilim altında ($V \neq 0$)

Metal malzemelerdeki serbest hareketli yük yoğunluğuna göre daha az olan yarıiletkenlerdeki serbest hareketli yük yoğunluğu, uygulanan gerilime bağlıdır. İdeal bir MIS yapısında, metal kontağa bir gerilim uygulandığında; yarıiletken içerisinde yük kaymaları gözlemlenir. Yarıiletken arayüzey bölgesinde bulunan bantların bükülmesine neden olan uzay yükleri (Q_{SC}) oluşur. Termal denge oluştuğunda, potansiyelin büyüklüğü arayüzey bölgesindeki uzay yük yoğunluğunu belirler. Yarıiletken malzemede bulunan yükler, n-tipi veya p-tipi olmasına göre yani katkılanma türüne göre çoğunluk ve azınlık taşıyıcılardır. Yarıiletken malzemelerde yer alan serbest olmayan yükler; uygulanan voltaja bağlı olarak, uzay yükü bölgesinde veya arayüzey bölgesinde yığılmalara sebep olur. Uygulanan geriliminin belirli bir miktarı yarıiletken üzerine, bir miktarı ise arayüzey tabakası üzerine düşer. Bu nedenle;

$$V_G = V_{ox} + \psi_s \tag{2.3}$$

ifadesi yazılabilir. Bu eşitlikte V_{ox} yalıtkan arayüzey tabakası üzerine düşen gerilimi, ψ_s arayüzeydeki bant gerilimi ifade eder [18].

Metal malzeme ile yarıiletken tabaka arasında bulunan yalıtkan tabakadan kaynaklı olarak, bu arayüzeyde bir C kapasitans oluşmasına neden olur. MIS kapasitansı olarak tanımlanan ve arayüzey tabakanın dielektrik sabitine bağlı olarak değişen bu kapasitansın özelliklerini, birbirine değen tabakalar arasındaki arayüzeyler belirlemektedir. Bir, MIS kapasitansını ifade eden devre gösterimi Şekil.2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3. MIS Kapasitansının eşdeğer devresi

Uygulama gerilimine bağlı olarak; yalıtkan tabakanın kapasitansı C_{ox}, uzay yükü kapasitansı ise C_{sc} olmak üzere, eşdeğer kapasitansları MIS kapasitörün C değerini vermektedir. Şekil 2. 3'te görüleceği gibi C_{sc} ve C_{ox} 'in seri bağlı devresi C değerini verir. Bu durum matematiksel olarak Eş. (2.4)'deki ile verilir.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_{ox}} \tag{2.4}$$

Yalıtkan tabakanın kapasitansı C_{ox} ise aşağıdaki eşitlikle ifade edilir;

$$C_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox}}{d_{ox}} A_{ox} \tag{2.5}$$

Eşitlikte;

ε_{ox} : Yalıtkan tabakanın dielektirik sabiti

d_{ox} : Yalıtkan tabakanın kalınlığıdır.

ε_{ox} yalıtkan tabakanın dielektirik sabiti ve d_{ox} yalıtkan tabakanın kalınlığı uygulanan gerilimden bağımsızdırlar. Bu nedenle yalıtkan tabakanın kapasitans değeri de uygulanan gerilimle değişmez. Dolayısıyla MIS yapısının kapasitansında meydana gelen değişimi sadece uzay yükü Q_{SC} kapasitansı belirler [19].

2.3.1. Yığılım

Metale uygulanan gerilim, geçit (flatband) voltajına eşit olduğu durumda $V_G = V_{FB}$ yarıiletkendeki bandta bir bükülme görülmez. İdeal bir MIS kapasitör için $V_{FB} = 0$'dır. Metal plakaya pozitif bir gerilim ($V_G > 0$) uygulandığı zaman, uygulanan gerilim nedeniyle ortaya çıkan elektrik alan sonucu yarıiletkenin elektronları yalıtkan-yarıiletken arayüzeyine doğru hareket eder ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde birikir. İletim bandı yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde Fermi seviyesine yaklaşacak ve değerlik bandı da buna bağlı olarak yukarı doğru bükülecektir. Ara yüzeyde meydana gelen çoğunluk taşıyıcıların birikmesi olayına "yığılım" denir.

2.3.2. Tükenim

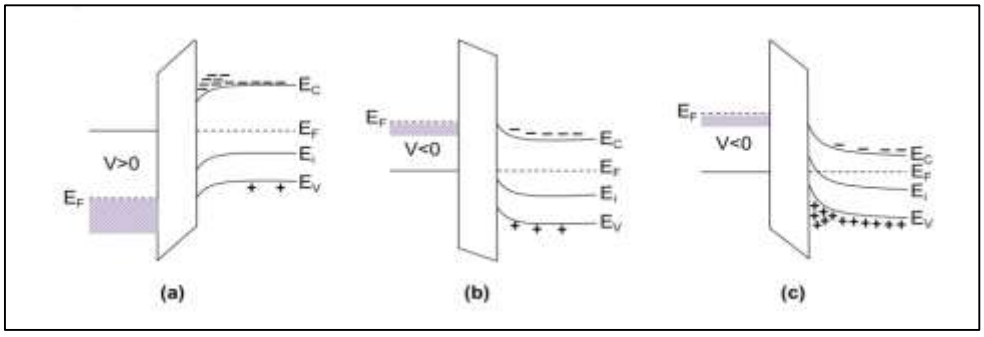
Metal plakaya negatif bir gerilim ($V_G < 0$) uygulandığında; yalıtkan tabaka içerisinde meydana gelen elektrik alan, yarıiletken arayüzeyinde bulunan elektronları yüzeyden uzaklaştırır ve elektronlar yarıiletkenin içerisine doğru hareket eder. Böylece, arayüzey bölgesinde iyonlaşan vericilerden kaynaklı olarak pozitif bir yük oluşur. Bu koşullar altında yarıiletken yüzeyindeki elektron yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındaki elektron yoğunluğuna kıyasla azalmaya başlar, buna bağlı olarak da enerji bantlarında yukarı doğru bir bükülme gözlemlenir. Yarıiletken yüzeyinde, elektronların azaldığı bir tüketim bölgesi oluşur. Bu bölgeye, tüketim tabakası (W_D) denir. Tüketim bölgesinin kalınlığı W_D ise;

$$W_D = \varepsilon_s A_{ox} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_{ox}}\right) \tag{2.6}$$

ile ifade edilir. Eşitlikte ε_s ; yarıiletkenin dielektrik sabitini ifade etmektedir.

2.3.3. Tersinim

Metale uygulanan negatif gerilim daha da artırılırsa ($V_G << 0$) arayüzeydeki bandlar yukarı doğru daha fazla bükülecek ve katkısız enerji (E_i) seviyesi Fermi enerji (E_F) seviyesinin üzerine çıkacaktır. Bu koşul altında ise yarıiletkenin arayüzey tarafında bulunan hollerin sayısı artarak elektron yoğunluğundan daha büyük olacaktır. Bu durumun bir sonucu olarak, n-tipi olan yarıiletken yüzeyi p-tipi bir yarıiletken gibi davranmaya başlar. Burada, uzay yükü bölgesinde yük yoğunluğu işaret değiştirdiğinden meydana gelen bu olaya "tersinim" denir.



Şekil 2.4. V ≠0 durumunda ideal MIS yapının enerji-bant şeması a)Yığılım b) Tükenim c) Tersinim

2.3.4. Gerçek MIS yapının arayüzey yükleri ve durumları

İdeal bir MIS yapısında, yalıtkan veya yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde yükün olmadığı kabul edilmiştir. Bu kabulün aksine, gerçek MIS yapılarda yalıtkan ve yarıiletken arayüzeyi, elektriksel olarak nötr değildir. Safsızlıklardan veya doymamış bağlardan dolayı kaynaklanan yalıtkan-yarıiletken arayüzeyindeki arayüzey durumları olarak ifade edilen tuzaklanmış yükler, oksidasyon sırasında seçilen yönteme göre ortaya çıkan hareketli iyonlar, tuzaklar, sabit oksit ile arayüzey yüklerinin varlığı; MIS yapılarının karakteristik yapılarını değiştirerek MIS yapının ideal özelliklerinde sapmalara yol açmaktadır [20–22].

Hareketli iyonik yükler

Bu yükler yapı içinde bulunan ve 100 °C'nin üzerinde olan sıcaklıklarda hareketli olan Li^{+}, K^{+}, Na^{++} gibi alkali iyonlarından kaynaklanırlar. Bu safsızlık iyonları, MIS yapılarının hazırlanma aşamalarında kullanılan kimyasal maddelerdeki safsızlıklar nedeniyle yapıya dahil olarak arayüzeye yerleşirler. Bu yükler, uygulama gerilimi altında oluşan elektrik alan etkisi ile hareketli hale gelerek, MIS yapıda kararsızlık oluşmasını sağlar.

Yalıtkanda tuzaklanmış yükler

Bir yalıtkan tabakada, iyonlaştırıcı radyasyon ile yüksek enerjili fotonlarla/parçacıklarla bombardıman ile elektron-hol çifti oluşturabilir. Bu elektron ve hollerden bazıları yalıtkan içerisinde tuzaklanabilir. Bu tuzaklar yalıtkan boyunca yayılırlar ve elektron yakalayarak veya bırakarak yüksüz duruma geçerler. MIS yapılarda bu tuzaklar düşük sıcaklıklarda tavlama ile kaldırılabilir [23].

Sabit oksit yükler

Sabit oksit yükleri, yalıtkan/yarıiletken arayüzeyine veya arayüzeye çok yakın alanlara yerleşmiş genellikle pozitif yüklerdir. Sabit oksit yükleri ile yarıiletken arasında yük alışverişi yoktur. Sabit oksit yük yoğunluğu yarıiletkenin tipinden, yalıtkan tabakanın kalınlığından ve yarıiletkendeki katkı konsantrasyonundan bağımsızdır. Oksidasyon işlemi sebebiyle bu yük yoğunluğu oksidasyon ortamına ve sıcaklığına, soğuma koşullarına, yarıiletken yönelimine ve en önemlisi son oksidasyon sıcaklığına bağlıdır.

2.4. Arayüzey Durumları

Yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde, yasak enerji bandı içerisinde yer alan ve kısa zaman ölçeklerinde yarıiletkenle yükleri değişebilen girilebilir enerji seviyeleri; arayüzey durumları (D_{it}) olarak tanımlanır. Yarıiletken malzemelerin kullanıldığı cihazlarda çok önemli rol almaktadır. Cihazın performansını etkileyen önemli kriterlerden biridir. Yarıiletken malzemenin yüzeyi detaylı bir şekilde temizlenmiş olsa da yarıiletken ile arayüzey tabaka arasında ve yasak enerji bandında birden fazla arayüzey durumları, alıcı (N_A) ve verici (N_D) katkı atomları, yarıiletkenin temizlenmesi sırasında ya da diyotun yapım aşamalarında oluşabilir. Bu oluşumlar, genel olarak arayüzey durumları (N_{ss}) ya da arayüzey tuzakları (D_{it}) şeklinde isimlendirilir [24]. Arayüzey durumu yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde bulunan bir enerji seviyesidir. Yarıiletken yüzeyi ile oksit ya da kullanılan arayüzey tabaka arasındaki sınırda bulunurlar. Arayüzey durumları alıcı (akseptör) veya verici (donor) olabilirler. Ayrıca valans bandı ve iletim bandı ile yük alışverişi yapabilirler. Çizelge 2.1 bahsi geçen alıcı ve verici tip arayüzey durumları ve yük alışverişi arasındaki durumu göstermektedir. Buna göre, enerji seviyeleri dolu olduğunda yüksüz durumlar alıcı, yüklü durumlar verici tip olarak; enerji seviyeleri boş olduğunda ise pozitif yüklü durumlar verici, yüksüz durumlar alıcı tip arayüzey durumlarına karşılık gelir.

Çizelge 2.1. Arayüzey durumları ve yük alışverişi

	Enerji Seviyeleri Dolu Olduğunda	Enerji Seviyeleri Boş Olduğunda
Alıcı Durumlar	Negatif yük taşırlar	Yüksüzdürler
Verici Durumlar	Yüksüzdürler	Pozitif yük taşırlar

Alıcı durumlar genellikle elektronları kabul edebilen seviyeler, verici durumlar ise genellikle elektronları serbest bırakabilen seviyeler olarak düşünülebilir. Arayüzey durumları değerlik bandı veya iletim bandı ile yük alışverişi yapabilir ve genel olarak arayüzeye çok yakın bir bölgede bulunur. MIS yapının kapasitansı için, arayüzey tuzakları önemli bir parametredir. Arayüzey durumların yük alışverişi sonucunda, değişen yük miktarı MIS yapının karakteristiğini etkiler ve MIS yapının kapasitansına katkıda bulunur. Bu nedenle, MIS yapılarda yarıiletkendeki yapı kusurlarının karakterizasyonu için, arayüzey durum yoğunluğunun bilinmesi oldukça önemli bir kriterdir [25].

2.4.1. Arayüzey durumları ve seri direncin empedans ölçümlerinden hesaplanması

Arayüzey durumları ve seri direnç içeren bir MS veya MIS tipi Schottky diyotun, elektrik devresi Şekil 2.4'deki gibi gösterilebilir. Arayüzey durumları genellikle kristal örgüdeki doymamış bağlardan, kristal örgü yapısına dahil olmuş yabancı atomlardan, oksijen boşluklarından, IIIA ve VA grup katkı atomları ile gerek kristal temizleme aşamasında giderilemeyen yüzeydeki düzensizliklerden, gerekse üretim süreci esnasında yarıiletken ile arayüzey tabakası arasına hapsolan safsızlıklardan kaynaklanır [26-27]. Bu durumlar, eklem bölgesinde ve yarıiletkenin yasak enerji bandı içerisine konumlanırlar ve yapının elektriksel karakteristiği üzerine olumsuz yönde etki ederler.

Seri direnç (R_s); metal-yarıiletken bölgesinde oluşan tükenim bölgesi dışında kalan yüksüz bölgenin diyot akımına karşı gösterdiği dirençtir. Seri direnç; genel olarak yarıiletken alttaşın ön arka yüzeyine oluşturulan doğrultucu ve ohmik kontaklardan, yarıiletken alttaşın gövde direncinden, elektriksel ölçümler için kullanılan teller ve homojen katkılanmamış alıcı (N_A) veya verici (N_D) katkı atomlarından kaynaklanır. Bu etkiler de, diyotun performansını düşürmektedir [26,28-30]. Arayüzey tuzak durumlarına yerleşen yük taşıyıcılarının, uygulanan dış gerilim veya elektrik alan etkisiyle, bulunduğu konumdan ayrılıp başka bir tuzak durumunu doldurması ile $C-V$ ve $G/\omega-V$ eğrilerinde sistematik bir değişim meydana gelir [26-30]. Bu nedenle, arayüzey durumlarının büyüklüğü ve yasak enerji band aralığı içindeki dağılım profili ile seri direnç değerlerindeki değişim eğilimin belirlenmesi, hazırlanan Schottky diyotların hem elektrik hem de dielektrik özelliklerini kayda değer biçimde etkilemesi nedeniyle göz ardı edilmeden hesaplamalar yapılmalıdır.

Uygulanan gerilimin bir fonksiyonu olarak MIS yapının herhangi bir noktadaki direnç değeri (R_i), aynı noktada ölçülen C_m ve G_m değerlerinden aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$R_i(V) = \frac{G_m(V_i)}{G_m^2(V_i)+(\omega C_m(V_i))^2} \tag{2.7}$$

Seri direnç (R_s) ,gerçek değerine güçlü yığılım bölgesinde ulaşır ve bu noktada yukarıdaki eşitlikte kapasitans (C_{ma}) ve kondüktans (G_{ma}) değerlerine karşılık gelerek bölgenin tanımlanmasını da sağlamış olur. ($Y_{ma} = 1/Z_{ma} = G_{ma} + j\omega C$).

$$R_s = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2+(\omega C_{ma})^2} \quad (2.8)$$

Eşitlik 2.8'e göre admitans ölçümlerinden hesaplanan ve yukarıda bahsedilen kaynaklardan ortaya çıkan seri direnç (R_s) etkisi ile, yüksek frekanslarda yapılan ölçümlerde kuvvetli yığılım bölgesinde bir bükülme meydana gelir. Seri direnç etkisiyle yapının gerçek $C_C - V$ ve $G_c/\omega - V$ profillerini elde etmek için Nicollian ve Brews'in geliştirdiği aşağıdaki eşitlikler kullanılabilir [28].

$$C_c = \frac{[G_m^2+(\omega C_m)^2]C_m}{a^2+(\omega C_m)^2} \quad (2.9a)$$

$$G_c = \frac{[G_m^2+(\omega C_m)^2]a}{a^2+(\omega C_m)^2} \quad (2.9b)$$

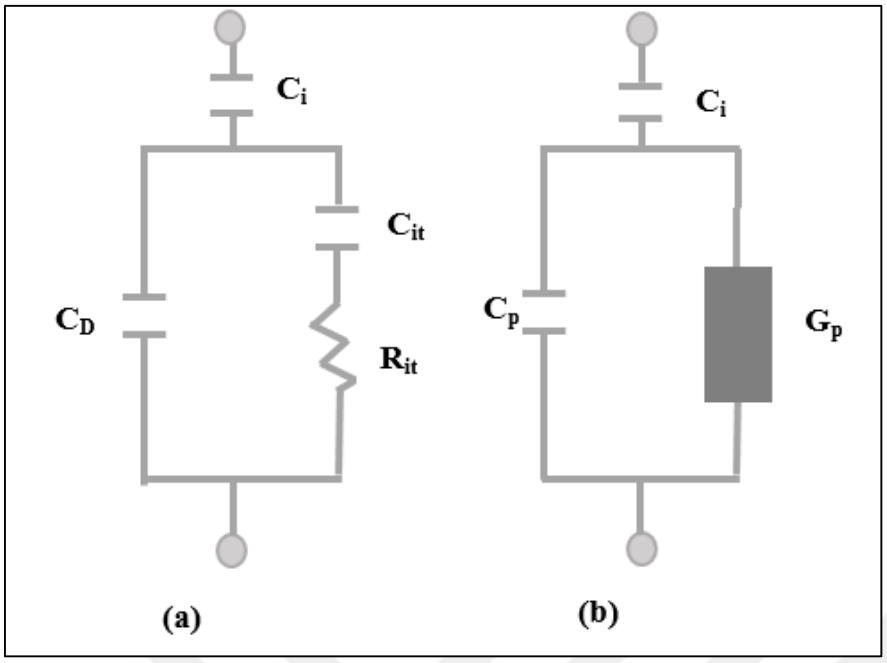
Burada,

$$a = G_m - [G_m^2 + (\omega C)^2]R_s \quad (2.9c)$$

ile verilen düzeltme parametresidir. Literatürde D_{it} değerlerinin ve uygulanan bir dış etkiyle (örneğin frekans, uygulama voltajı) nasıl bir değişim gösterdiğinin değerlendirilmesi için yarı deneysel ölçüm (empedans ölçümleri kullanılarak hesaplama yapılaması) çalışmalarında ele alınan çok sayıda metot vardır. Bu metotlardan başlıcaları; *düşük-yüksek frekans kapasitans* ve *paralel kondüktans (iletkenlik)* metodudur. Arayüzey durumlarının değerlendirilmesinde en doğru ve güvenilir bilgiyi veren metot ise Nicollian ve Goetzberger tarafından geliştirilen paralel kondüktans metodudur [28].

Kondüktans metodu

Arayüzey durum yoğunluklarını (D_{it}) belirlenmesinde en etkili yöntemlerden birisidir. Aynı zamanda tüketim bölgesi ve band aralığının bir parçası olan zayıf terslenim bölgesindeki durum yoğunlukları ile yüzey potansiyel dalgalanmaları hakkında bilgiler veren en eksiksiz yöntemdir. [31].



Şekil 2.5. Bir metal/arayüzey-tabaka/yarıiletken (MIS) tipi yapıların eşdeğer devresi (a) Arayüzey durumları ve seri direnç etkisi içeren, (b) Düşük ve orta frekans için

Kondüktans metodu, uygulama voltajı ve ölçüm yapılan sinyalin frekansına bağlı olarak bir MIS yapının eşdeğer paralel iletkenliğini $\left(\frac{G_p}{\omega}\right)$, ölçülen kapasitans (C_m) ve iletkenlik (G_m) değerleri kullanılarak Eş. 2.10 kullanılarak hesaplanmasına dayanır. Arayüzey tuzak durumlarına yerleşen ve yük taşıyıcı yayımı nedeniyle akım iletim mekanizmasındaki kayıpları temsil eden iletkenlik, arayüzey tuzakları yoğunluğunun bir ölçüsüdür. Kondüktans yöntemine uygun MIS yapı için eşdeğer devre Şekil 2.5'de verilmiştir. Burada C_i (C_{ox}) yalıtkan veya oksit tabakanın kapasitansı, C_D yarıiletken kapasitansı, C_{it} arayüzey durumlarının kapasitansı ve R_{it} arayüzey tuzakların yük taşıyıcıları yakalayıp yayarken oluşturduğu kayıp mekanizmayı temsil eden dirençtir. Şekil 2.5 (b)'deki devre sadeleştirilmiş hali ile G_p değerlerini hesaplamada kullanılan devre için uygundur. Paralel kondüktans (G_p) değerleri de aşağıdaki gibi temsil edilir.

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{\omega C_i^2 (G_m - \omega^2 C_m^2 R_s - R_s G_m^2)}{(\omega^2 C_i R_s C_m - G_m)^2 + \omega^2 (C_i - C_m - C_i R_s G_m)^2} = \frac{qAD_{it}}{2\omega\tau_p} \ln(1 + \omega^2\tau^2) \qquad (2.10)$$

Bu eşitlikte, A kontak alanı, τ tuzağın ömrü, $\omega = 2\pi f$ ise açısal frekanstır. Bu modele göre yukarıdaki eşitlik ile tanımlanan G_p/ω değerlerinin frekansa göre değişimi, bize D_{it} değerlerini hesaplama imkânı sunar. Buradan çizilen $G_p/\omega - In(f)$ grafiği her voltaj değerinde bir pik vermekte ve bu pikin maksimum değeri $\omega\tau = 1{,}98$ değerine karşılık

gelmektedir. Dolayısıyla, her voltaj için $(G_p/\omega)_{max}$ ve bu değere karşılık gelen açısal frekans $\omega = {}^{1,98}/_{\tau}$ değeri hesaplanarak, D_{it} değerleri ve ortalama yaşam süreleri tou (τ) değerleri aşağıdaki Eş. 3.12 ve 3.13 hesaplanmıştır.

$$D_{it} = (G_p/\omega)_{max}/0{,}402qA \tag{2.11}$$

$$\tau = 1{,}98/2\omega = 1{,}98/2\pi f \tag{2.12}$$

Düşük yüksek frekans metodu

Bu yöntemde, eğer tuzaklanan yükün ömrü (τ) uygulanan sinyalin periyodundan $(T = 1/2\pi f)$ daha küçük $(\tau < T)$ ise, mevcut yüzey durumlarının neredeyse tamamı, uygulanan AC sinyalini takip edebilir ve sonuç olarak deneysel olarak elde edilen C_m ve G_m/ω değerine fazlalık bir katkı getirir. Tuzaklanan yükün ömrü (τ), uygulanan sinyalin periyodundan (T) daha büyük $(\tau > T)$ olması durumunda ise süreçler tam tersidir ve fazlalık katkı vermez. Diğer bir deyişle, AC sinyaline karşı arayüzey durumlarının tepkiselliği uygulanan frekansın artması ile azalır [26,28]. Bu metotta, yüksek ve düşük frekans C_m ve G_m/ω eğrileri arasındaki alandan, N_{ss} değerleri ölçüm yapılan aralıkta ve her voltaj için aşağıdaki eşitlikten yararlanarak hesaplanabilir. Arayüzey durumlarının mantık olarak basit ancak doğru ve hızlı olarak hesaplaması için kullanılan bir yaklaşımdır.

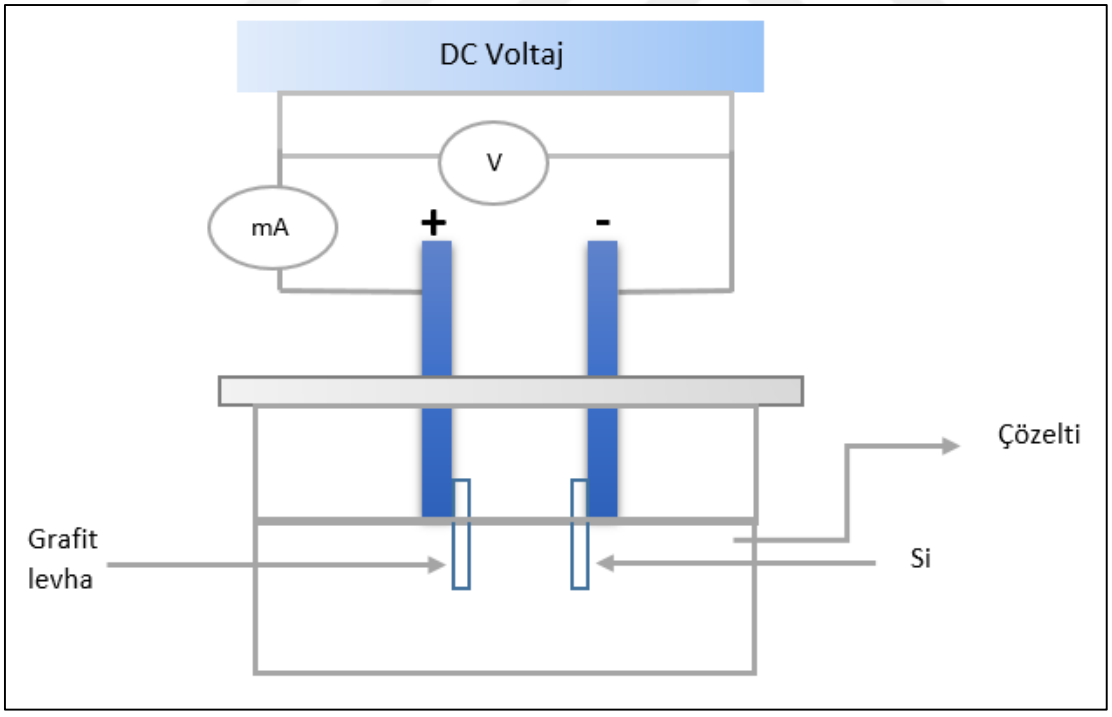
$$\mathrm{qA}N_{SS} = \left[\left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_i}\right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_i}\right)^{-1}\right] \tag{2.13}$$

Bu eşitlikten görülen sırasıyla A, C_{LF}, C_{HF} ve C_i terimleri, sırasıyla; doğrultucu kontak alanını, düşük-yüksek frekanslı kapasitansı ve ara yüzey tabakası kapasitansını temsil etmektedir.

3. DENEYSEL SONUÇLAR

3.1. S katkılı DLC Filmlerin Üretimi

DLC filmi elde etmek için iki elektrotlu elektro-biriktirme düzeneği kullanılmıştır. Biriktirme düzeneğinin şematik diyagramı Şekil 3.1'de verilmiştir [31]. Biriktirmeden önce, 10-20 $\Omega. cm$ dirençli p-tipi silisyum alttaş, elektrolite daldırılmadan önce etanol ve deiyonize su kullanılarak ultrasonik bir temizleyici ile temizlendi. Daha sonra, Si alttaş negatif elektrot üzerine sabitlendi ve karşı elektrot grafit plakadan yapıldı. İki elektrot yaklaşık 4 mm mesafeye yerleştirilmiştir. Biriktirme voltajı 550 V iken, kaplama oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Elektrotlar daha önce hazırlanan 50 μL tiyofen + 90 mL metanol ve 1.5 mL SO2 nano parçacıkları içeren çözelti içine daldırıldı. Burada S-DLC filmini elde etmek için yaklaşık 5 saatlik bir süre zarfında elektroliz yöntem ile silisyum üzerine S katkılı DLC ince filmi biriktirildi.



Şekil 3.1. S katkılı DLC ince film üretimi için kullanılan elektrokimyasal biriktirme yönteminin şematik gösterimi.

3.2. Omik ve Doğrultucu Kontakların Oluşturulması

Saçtırma (sputterring) yöntemi, genel olarak hedef atomlarının termal olmayan işlemlerle alt tabakaya birikmesini ve büyütülmesini sağlayan, fiziksel buhar fazlı biriktirme (PVD) kaplama tekniklerinden biridir. Bu teknikte kullanılan tabanca, çözeltinin yoğunluğu ve miktarı, altlık sıcaklığı, püskürtme hızı, püskürtme mesafesi ve püskürtme süresi, kaplama kalitesini direk etkileyen önemli etkenlerdir [31-33]. Bu yöntem üç ana aşamadan oluşmaktadır;

- Yüksek enerjili iyonların katod üzerine momentum iletmesi
- Hedef materyalden atomların koparılması
- Ayrılan atomların kaplanacak alt tabaka (anot) üzerine birikmesinin sağlanması şeklindedir.

Bu çalışmadaki örneklerin hazırlanmasında kullanılan manyetik alan DC-RF saçtırma cihazı Resim 3.1'de gösterilmiştir.



Resim 3.1. Manyetik alan DC-RF saçtırma ünitesi

Ohmik temas elde etmek için, p-Si alt tabakanın arka yüzeyi saçtırma yöntemi kullanılarak %99,999 saflıkta Au kaplandı ve omik davranış sergilemesi için $550°C$'de tavlanarak yarıiletken içerisine nüfuz etmesi sağlandı. Örneğin fabrikasyon sürecinin tamamlanması

için $150\ nm$ kalınlığında ve $0.0314\ cm^2$ alanlı doğrultucu Al kontağın termal buharlaştırma yoluyla büyütülerek gerçekleştirildi. Omik kontak oluşturulduktan sonra (S katkılı DLC) ince film üzerine, doğrultucu kontakları oluşturmak için öncelikle fotorezist maskeler yerleştirildi ve 10^{-6} Torr'da Al kullanılarak filmin üzerine biriktirildi. Bu işlemlerin sonucunda Al/(S katkılı DLC)/p-Si/Au diyotların hazırlık süreci tamamlanmıştır.

3.3. Yüzey Karakterizasyonu

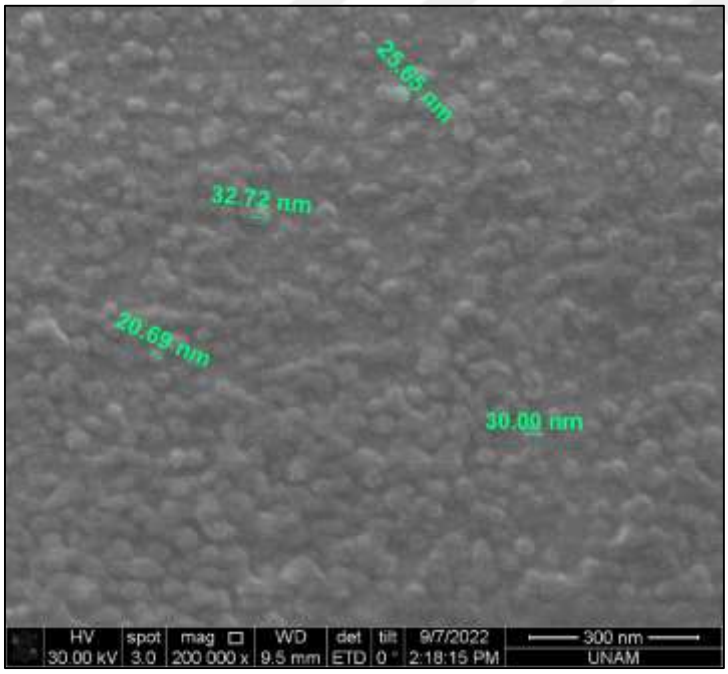
3.3.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), yüksek çözünürlüklü görüntüler elde etmek amacıyla kullanılan bir mikroskop türüdür ve büyütülen yapıyı görüntülemek ve yapısal özelliklerini analiz etmek için yüksek enerjiye sahip elektronlardan faydalanan bir yöntemdir. Yüksek çözünürlükte, yüksek büyütme oranı ve mikro düzeyde detaylı odaklanma gibi özelliklere sahip olması ile kolay gözlemlenebilmeye olanak sağlaması, birçok araştırma dalında kullanılmasına imkân vermektedir. Taramalı elektron mikroskobunda görüntü almak için öncelikle analizi yapılacak olan numunenin yüzeyine odaklanmış yüksek voltaj vasıtasıyla hızlandırılan bir elektron demeti gönderilir. Gönderilen elektron demetleri ile numune taratılır ve bu esnada elektron ile kullanılan numune atomları arasında girişimler oluşur. Bu tez çalışmasında, kullanılan ve Bilkent Üniversitesi, Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde (UNAM) bulunan ESEM: FEI Quanta 200EF model Scanning Electron Microscope (Nano-SEM) cihazı Resim 3.2'de verilmiştir [31].

Resim 3.3'de verilen SEM görüntülerinden silikon yüzeyinin tamamen DLC film ile kaplandığı, yüzey üzerinde küresel parçacıkların ve adacıkların oluştuğu gözlendi. Film yüzeyinde oluşan adacıkların filmin her yerinde neredeyse homojen bir şekilde dağıldığı ve tane boyutlarının $21\ nm$ ile $33\ nm$ arasında değiştiği görüldü [35].



Resim 3.2. ESEM: FEI Quanta 200EF model Scanning Electron Microscope (Nano-SEM) cihazı



Resim 3.3. S-katkılı DLC nanokompozit filmin SEM görüntüsü

3.3.2. X Işınları fotoelektron spektroskopi (XPS)

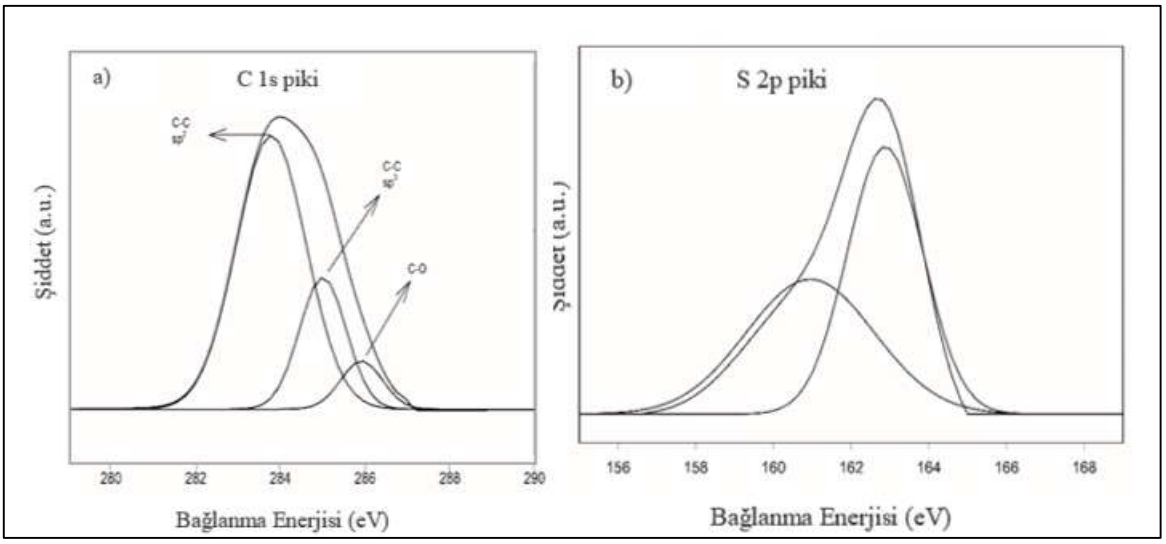
X ışınları Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) cihazı; kimyasal analiz için malzemenin elektronik yapısını, kimyasal ve elektronik durumlarını, bileşimini, yüzey analizlerini ve

kimyasal bağlarını incelerken fotoelektrik olayları ve X-ışınlarını kullanır [31, 34]. XPS analizi ile numune zarar görmeden, materyalleri analiz etmek için kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemle; kullanılan numunenin yüzeyi tek dalga boyuna sahip olan X-ışınları yoğun bir şekilde gönderilerek, numuneden salınan fotoelektronların enerji dağılımları ölçülerek analiz gerçekleştirilir. Yapılan bu analiz ile kullanılan numunenin kimyasal yapısı hakkında bilgi edinilir. Atomların türü, miktarı ve kimyasal bağ durumları hakkında bilgi edinmek amacıyla X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) kullanılmaktadır. Bu çalışmada, XPS analizleri Gazi Üniversitesi bünyesinde bulunan, tek renkli K_α X-ışını kaynağına sahip bir SPECS marka fotoelektron spektrometresi ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan cihaza ait görüntü Resim 3.4'te sunulmuştur.



Resim 3.4. Tek renkli bir K_α X-ışınına sahip bir SPECS fotoelektron spektrometresi (XPS)

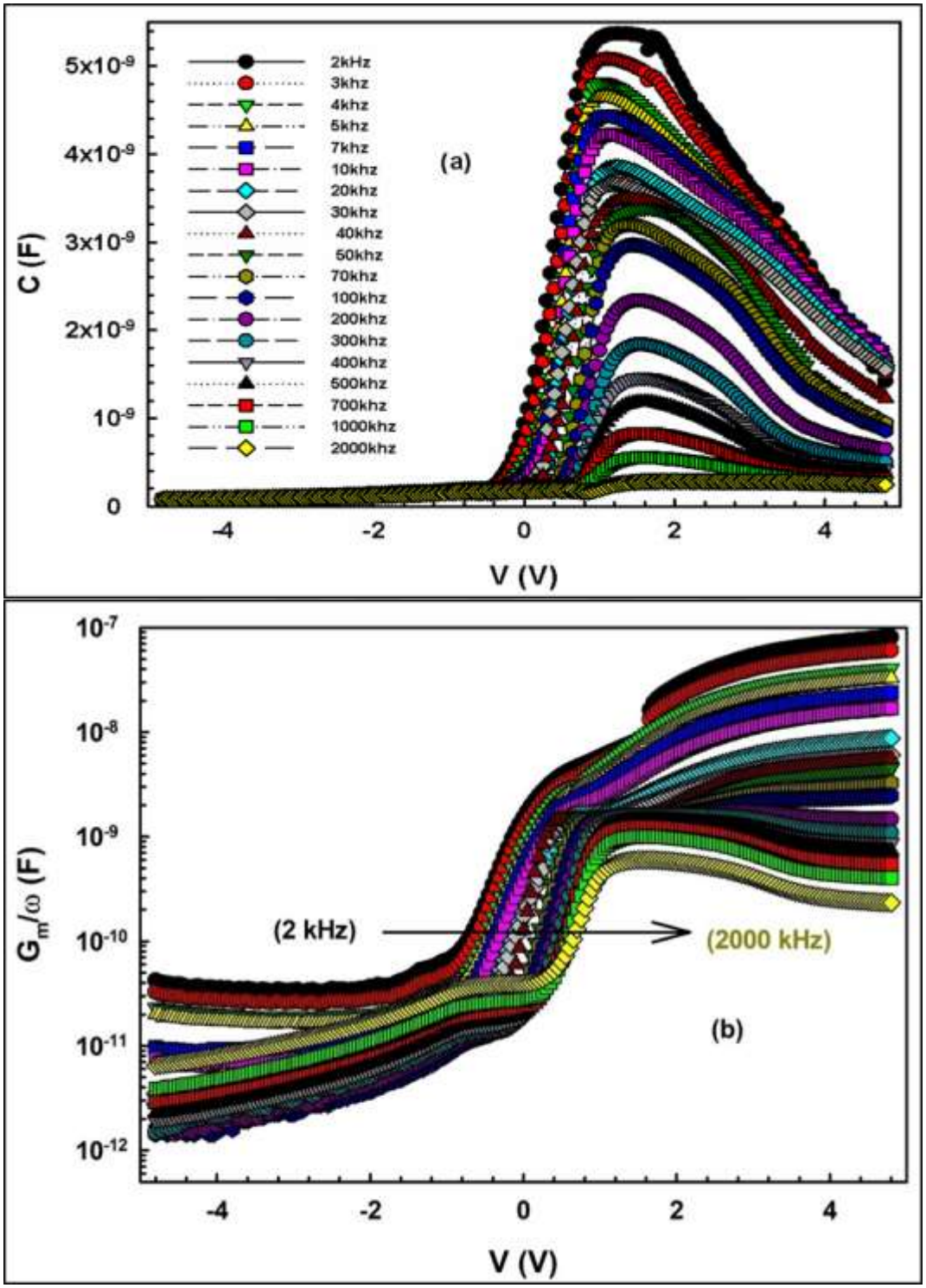
Şekil 3.2 a ve b, üretilen yapının C 1s ve S 2p XPS spektrumlarını göstermektedir. Şekil 3.2a'da C1'in spektrumu sırasıyla C-S, C-C ve C-OOH'ye atfedilen üç tepeye ayrıştırılmıştır [22]. S 2p spektrumu, sülfit bileşiklerine (C-S-C ve H_2S gibi) atanan 167,8 eV civarında ortaya çıkmıştır [14]. XPS spektrumları, DLC filmine S katkısının başarıyla yapıldığını göstermektedir [35].



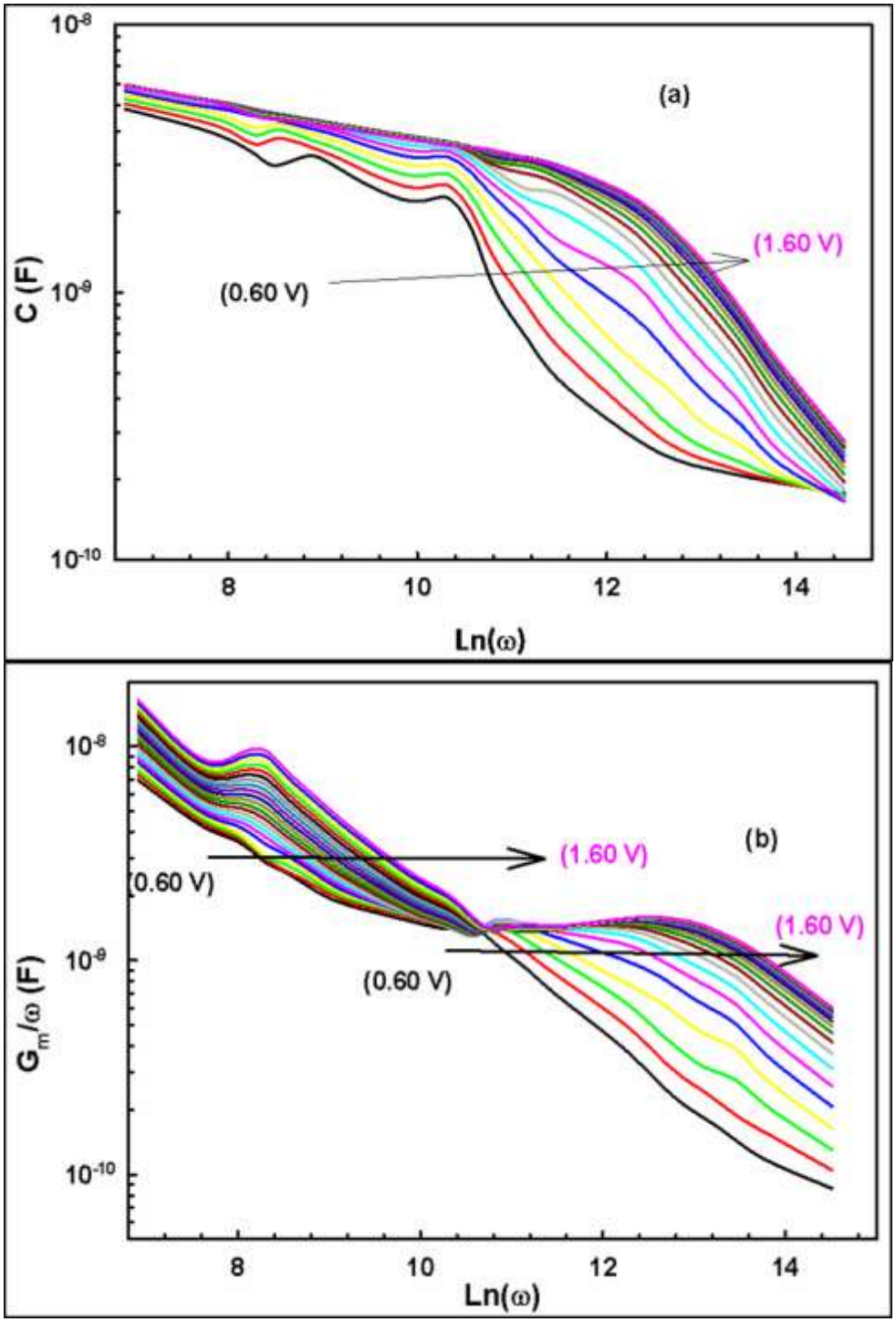
Şekil 3.2. Üretilen S-katkılı DLC yapının XPS spektrumları a) C 1s ve b) S 2p

3.4. Admitans Yöntemi ile Elektriksel Karakterizasyonu

Bu çalışma p tipi silisyum alttaş üzerine kaplanan S-katkılı DLC yapının elektriksel davranışının frekans ve voltaja bağlı karakteristiğinin incelenmesi üzerine kurulmuştur. Burada geniş bir frekans ve uygulanan gerilim bölgesi seçilmiştir. Böylece yapının düşükten yüksek frekansa kadar tüm spektral tepkisi ile ters ve düz besleme gerilimi altındaki davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Değerlendirme yöntemi olarak kapasitans-voltaj ($C-V$) ve iletkenlik-voltaj ($G_m/\omega-V$) ölçümlerini içeren admitans yöntemi ile elde edilen veriler kullanılmıştır. 2 kHz-2 MHz frekans ve $-5<V<+5$ voltaj aralığında gerçekleşen ölçümler bize incelenen yapıların metal-yarıiletken arayüzeyinde oluşan potansiyel engelinin yapısı ve genişliği, ana elektriksel parametrelerinin voltaj ve frekansa bağlı nasıl değiştiğine dair yeterli ve güvenilir bilgi sağlamaya yetecek kadar geniştir. Elde edilen veriler Şekil. 3.3 (a,b) ve Şekil. 3.4 (a,b)'de verilmiştir. Her iki şekilden de görüldüğü gibi, $C-V$ hem de ($G_m/\omega-V$) eğrilerinin uygulanan gerilime ve frekansa bağlı tepkisi yüksek olup üç farklı bölgeye sahiptir. Bu bölgeler, tersinim (düşük gerilim:$\sim -5<V<-0{,}9$), tükenim (orta gerilim: $\sim -0{,}9<V<3$) ve yığılım (yüksek gerilim: $\sim 3<V<5$) olarak isimlendirilir.



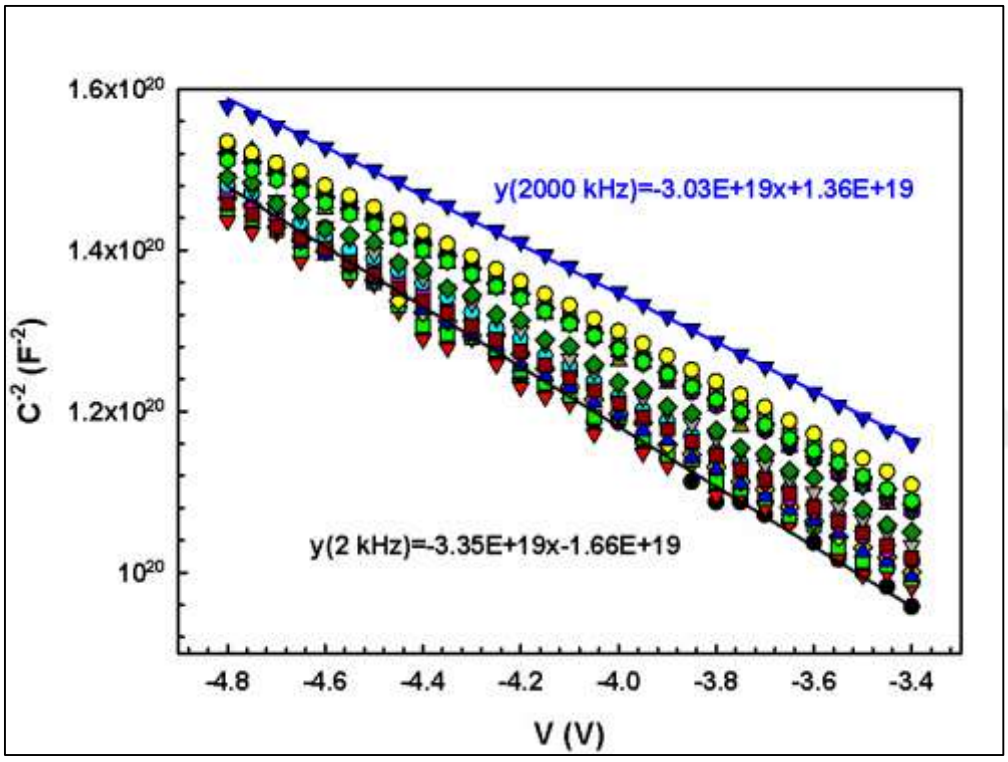
Şekil 3.3. Al/(S Katkılı DLC)/p-Si yapısı için a) $C-V$ b) $C-\ln(\omega)$ eğrileri



Şekil 3.4. Al/(S Katkılı DLC)/p-Si yapısı için a) $\frac{G_m}{\omega} - V$ b) $\frac{G_m}{\omega} - \ln(\omega)$ eğrileri

Şekil 3.3.a ve Şekil 3.4.a'da görüleceği gibi C ve G_m/ω değerlerinin frekansa bağlı değişimi tükenim ve yığılma bölgelerinde dikkat çekmektedir. Kapasitans değerleri tüm frekanslarda artan frekans değeri ile azalma eğilimindedir. Tükenim bölgesinde düşük frekanslar için bir pik değerine ulaşmakta ve daha sonra hızla azalmaktadır. Bu davranışın sebebi tükenim ve yığılma bölgelerinde yüzey durumları, yüzey ve dipol polarizasyonuna atfedilirken, yığılım

bölgesinde ise seri direnç varlığı ile açıklanmaktadır. Ayrıca, $C-V$ grafiğinde düşük frekanslarda ve tükenim bölgesinde mevcut pikler silisyum ile S katkılı DLC tabaka arasında ve silisyumun yasak enerji aralığına lokalize olmuş arayüzey durumlarının istisnai bir dağılımına atfedilebilir [1-15]. $C-V$ ve $G_m/\omega - V$ değerleri ileri beslem voltajının yüksek değerlerinde birbirlerine göre zıt bir davranış sergilemektedir. Burada kapasitans değerleri hızlıca azalırken iletkenlik değerleri ise aynı hızla artmaktadır. Bu tersine davranış mevcut literatürde "iletken (inductive)" davranış olarak bilinir [36]. Yapı burada, artık bir kapasitör gibi davranmak yerine iletken gibi davranır.



Şekil 3.5. Al/ (S Katkılı DLC)/p-Si/Au yapı için farklı frekanslarda elde edilen ters beslem $C^{-2}-V$ eğrileri

Bir MIS yapının uzay yükünün (Q_{sc}) birim alan başına değeri aşağıdaki gibi verilir [1-3]:

$$Q_{sc} = \sqrt{2q\varepsilon_s\varepsilon_0 N_D\left(V_d - V - \frac{kT}{q}\right)} \tag{3.1}$$

$C = Q/\Delta V$ ise tükenim bölgesi kapasitansı C için aşağıdaki ifade elde edilir [1-3]:

$$C = \frac{|\partial Q_{SC}|}{\partial V} = \sqrt{\frac{q\varepsilon_s\varepsilon_0 N_D}{2\left(V_d - V - \frac{kT}{q}\right)}} \tag{3.2}$$

Eşitlik 3.2'de $V_D = V_0 + kT/q$ difüzyon potansiyeli iken V_0, $C^{-2} - V$ eğrisinin $y = 0$ için x-eksenini kestiği değeridir. Burada C ifadesinden faydalanarak, C^{-2} için uygulama voltajının fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi bir ifade elde edilir [1-3].

$$C^{-2} = \frac{2\left(V_d - V - \frac{kT}{q}\right)}{q\varepsilon_s\varepsilon_0 N_A} \tag{3.3}$$

Eşitlik 3.3 kullanılarak, N_A için, deneysel olarak $C^{-2} - V$ grafiğinin eğimi $\tan(\theta) = \frac{dC^{-2}}{dV}$ olmak üzere Eşitlik 3.4 ile verilen ifade ile hesaplanır [1-3].

$$N_A = \frac{2}{q\varepsilon_s\varepsilon_o A^2 \tan(\theta)} = \frac{2}{q\varepsilon_s\varepsilon_o A^2\left(\frac{dC^{-2}}{dV}\right)} \tag{3.4}$$

Eşitlik 3.4'de A, ε_s, ε_0, nicelikleri doğrultucu kontak alanı, yarıiletkenin dielektrik sabiti, boşluğun dielektrik sabitidir. S katkılı DLC için hesaplanan deneysel N_A değerleri ve p tipi Si için teorik $N_V = 2[2\pi m_h^* m_0 kT/h^2]^{1.5}$ değeri kullanılarak E_F değerleri Eş. 3.5'ten hesaplanır.

$$E_F = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right) \tag{3.5}$$

Burada; m_0 serbest ya da durgun elektronun kütlesi olmak üzere, $m_h^* = 0{,}55m_0$ Si için deşiklerin etkin kütlesidir [1,2,5, 30-34]. MIS yapının tükenim tabakasının kalınlığı (W_D), Al/Si ekleminde oluşan maksimum elektrik alan ($E_{\max}$) ve bariyer yüksekliği (Φ_b)aşağıda verilen Eş. 3.6(a), 3.6(b) ve 3.6(c)'den hesaplanır:

$$W_D = \left[\frac{2q\varepsilon_s\varepsilon_0}{qN_A}\right]^{1/2} \tag{3.6a}$$

$$E_m = \left[\frac{2qN_A V_0}{\varepsilon_s\varepsilon_0}\right]^{1/2} \tag{3.6b}$$

$$\Phi_b = V_0 + kT/q + E_F \tag{3.6c}$$

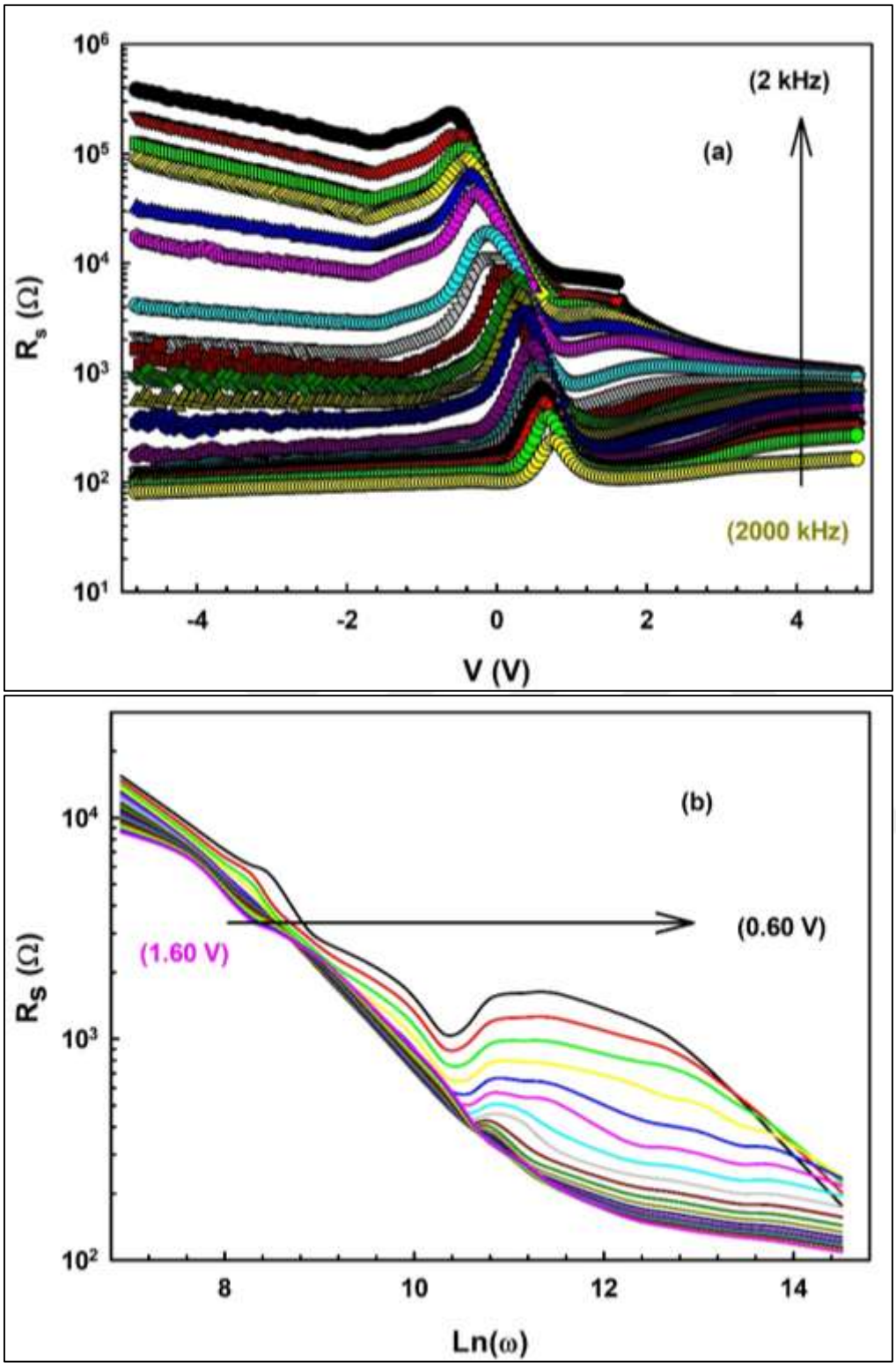
Çizelge 3.1. 2 kHz- 2 MHz frekans aralığında $C^{-2} - V$ eğrilerinden, Al/(S katkılı DLC)/p-Si yapısı için hesaplanan elektriksel çıktı parametreleri

Frekans (kHz)	V_o (V)	Eğim $(\times 10^{19})$	N_A $(\times 10^{14})$ (cm^{-3})	V_D (V)	W_D (μm)	E_F (eV)	Φ_b (eV)	E_{max} (V/m)
2	0,496	3,35	3,62	0,521	0,137	0,2815	0,802	7228
3	0,443	3,34	3,63	0,468	0,130	0,2814	0,750	6824
4	0,392	3,32	3,66	0,417	0,122	0,2813	0,698	6409
5	0,428	3,34	3,63	0,453	0,128	0,2814	0,735	6701
7	0,357	3,33	3,65	0,382	0,117	0,2814	0,664	6093
10	0,358	3,35	3,62	0,383	0,117	0,2815	0,665	6083
20	0,294	3,33	3,65	0,319	0,107	0,2814	0,600	5479
30	0,194	3,18	3,82	0,219	0,087	0,2802	0,499	4446
40	0,128	3,21	3,78	0,153	0,073	0,2804	0,433	3455
50	0,058	3,23	3,76	0,083	0,050	0,2806	0,364	1946
70	0,078	3,25	3,74	0,103	0,060	0,2808	0,384	2473
100	0,058	3,27	3,71	0,083	0,054	0,2809	0,364	1940
200	0,253	3,29	3,69	0,279	0,099	0,2811	0,560	5083
300	0,089	3,13	3,88	0,114	0,062	0,2798	0,394	2754
400	0,067	3,14	3,87	0,092	0,056	0,2799	0,371	2219
500	0,117	3,09	3,93	0,142	0,069	0,2795	0,422	3336
700	0,167	3,06	3,97	0,192	0,079	0,2793	0,471	4150
1000	0,222	3,07	3,95	0,247	0,090	0,2793	0,527	4891
2000	0,449	3,03	4,01	0,474	0,124	0,2790	0,753	7214

Hazırlanan Al/(S katkılı DLC)/p-Si/Au (MIS) yapıya ait ve yukarıda tanımlanan ana elektriksel parametreler 2 kHz – 2 MHz aralığında ölçüm yapılan tüm frekanslar için hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 3.1'de verilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi,

metal ve yarıiletken arasında oluşan potansiyel engel yüksekliği, 200 kHz frekansa kadar artan frekansla azalırken, sonrasında artma eğilimi göstermektedir. Çizelge 3.1'de verilen sonuçlara göre, $\Phi_b$bariyer yüksekliği, V_D difüzyon potansiyeli ve tüketim tabakası genişliği W_D değerleri artan frekans ile önce azalma sonra tekrar artma eğilimi göstermektedir. Bu durum doğal olarak oluşan bariyerin düzgün bir yapıda olmadığının göstergesidir. Artan frekansla E_F değerlerinin sabit olması beklenen bir durumdur. Bizim yapımız için yaklaşık $0{,}28\ eV$ olarak hesaplanmıştır. 2 kHz – 200 kHz frekans aralığında N_A değerlerinde görülen dalgalanma, S katkılı DLC/Si arayüzeydeki tuzaklanan yüklerin, uygulama gerilimi ile oluşturulan elektrik alan etkisi ile bulundukları konumlardan hareket ederek yeni enerji seviyelerine hareket etmelerine, böylece yeni yüzey durumları oluşturmalarına atfedilebilir [14]. Bu durum çizelgede verilen E_{max}, yapı içinde kurulan elektrik alan değerlerindeki dalgalanmada da açıkça görülmektedir.

Şekil 3.6 a ve b'de yapının hesaplanan seri direnç (R_s) değerlerinin, voltaj ve frekansa göre değişimi görülmektedir. Seri direnç; katkılanan malzemenin dağılımındaki homojensizliklerden, kontaklardaki ya da yarı iletkendeki deformasyondan, eklem bölgesinde amaca uygun oluşturulan veya doğal olarak kendiliğinden oluşan ara katman varlığından, bulk yarı iletkenin direncinden ve olası safsızlıklardan kaynaklanır. Şekil 3.6'dan görüleceği gibi tuzaklanan yükler, frekansın artmasıyla birlikte R_s'nin büyüklüğünde azalmaya neden olur. Yeterince yüksek frekanslarda ve uygulama voltajının yüksek değerlerinde R_s değerindeki değişme oldukça küçüktür. Ayrıca yüzey polarizasyonu, özellikle düşük frekanslarda, azalan frekansla birlikte R_s değerlerindeki artıştan sorumludur. Her frekans için R_s değerlerinde (2 kHz için $\sim -0{,}50\ V$ ve 2 MHz için $\sim +0{,}80\ V$) bir pik noktası vardır. Bu pik değerinin konumu, frekanstaki artışla birlikte pozitif voltaj bölgesine doğru kayar. Bu kayma, tuzak seviyelerinde bulunan yük taşıyıcılarına etkiyen, böylece, yüzey durumlarının dağıtılmasından ve yeniden düzenlenmesinden sorumlu olan elektrik alanının varlığına atfedilebilir.

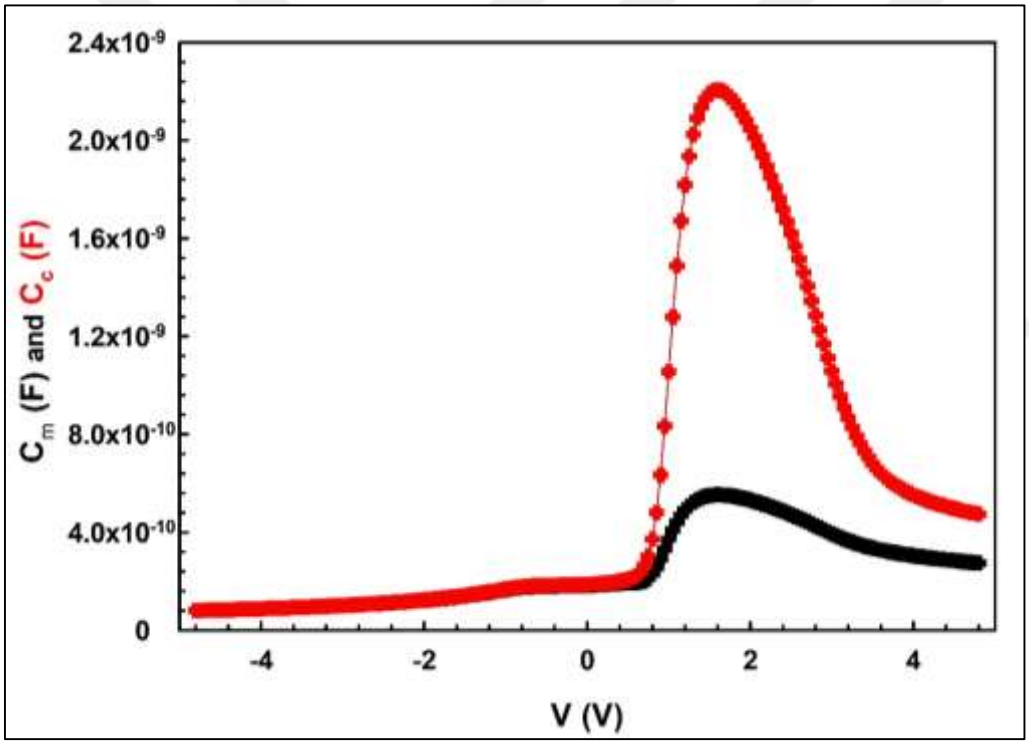


Şekil 3.6. Al/(S Katkılı DLC)/p-Si/Au yapı için farklı frekanslarda hesaplanan seri direnç değerlerinin a) voltaja b) frekansa göre değişim grafiği

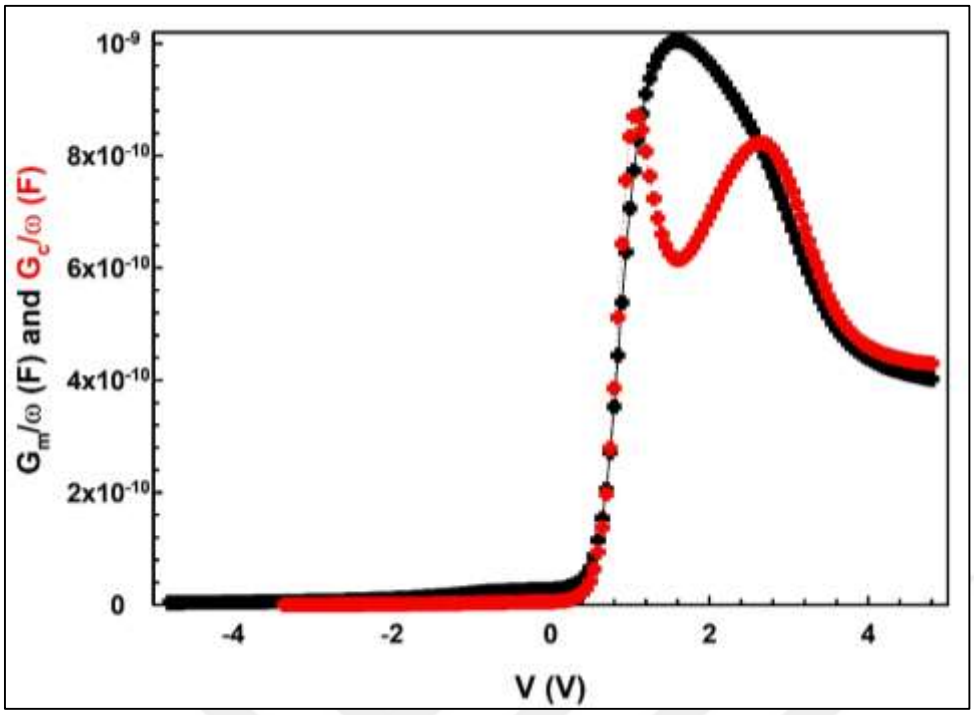
Şekillerden R_s'nin dağılımı ve değeri eş zamanlı olarak frekansa ve uygulanan gerilime güçlü bir şekilde bağlı olduğu ve bölgeden bölgeye değiştiği görülmektedir. Bu sonuç, band

aralığındaki durumlarda yerleşip tuzaklanan yüklerin enerjisinin, iletkenlik bandına atlamak için yeterli olduğu anlamına gelir.

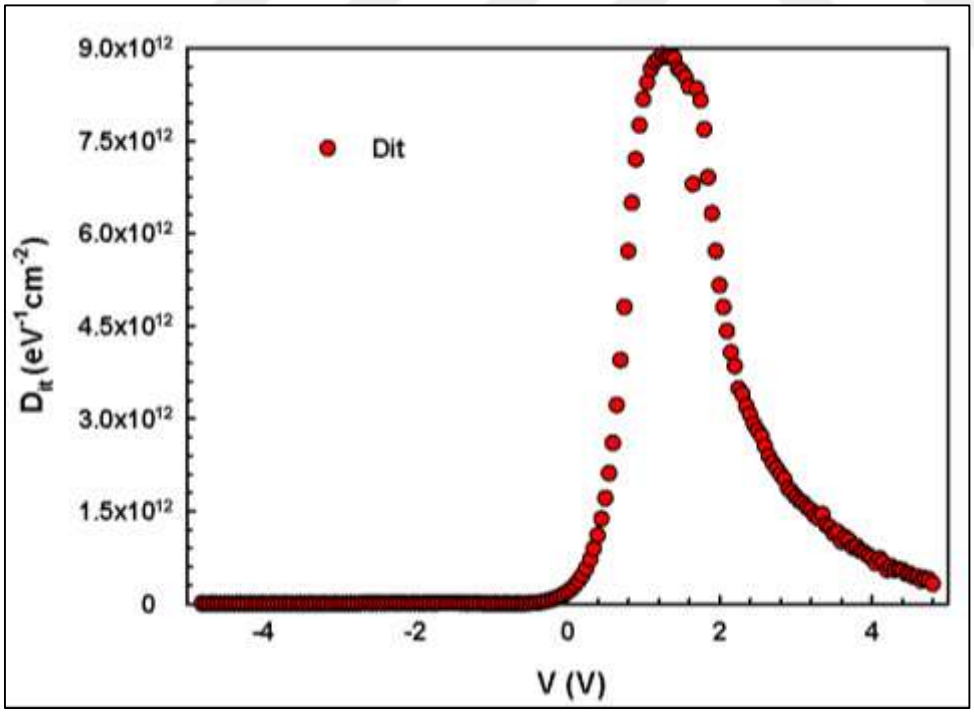
Şekil 3.7 ve 3.8, 2 MHz frekansta ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerlerinden Eş. 2.9 a ve b'yi kullanılarak hesaplanan düzeltilmiş kapasitans ve kondüktans değerlerini göstermektedir. Burada, kapasitanstaki önemli değişikliğin tükenme ve tersinim bölgelerinde olduğu açıktır. Kapasitans eğrisi değerlerinde görülen düzeltmenin nedeni yüzey durumlarının kontakta yerleşmesi ile ilişkilendirilebilir. Şekil 3.7 ve 3.8'den açıkça görülebileceği gibi, R_s etkisi özellikle tersinim bölgesinde ve tükenim bölgesinin ortalarına kadar düşük olduğu için göz ardı edilebilir [28].



Şekil 3.7. 2 MHz frekansta ölçülen kapasitans C_m değerlerinden hesaplanan düzeltilmiş C_c değerleri



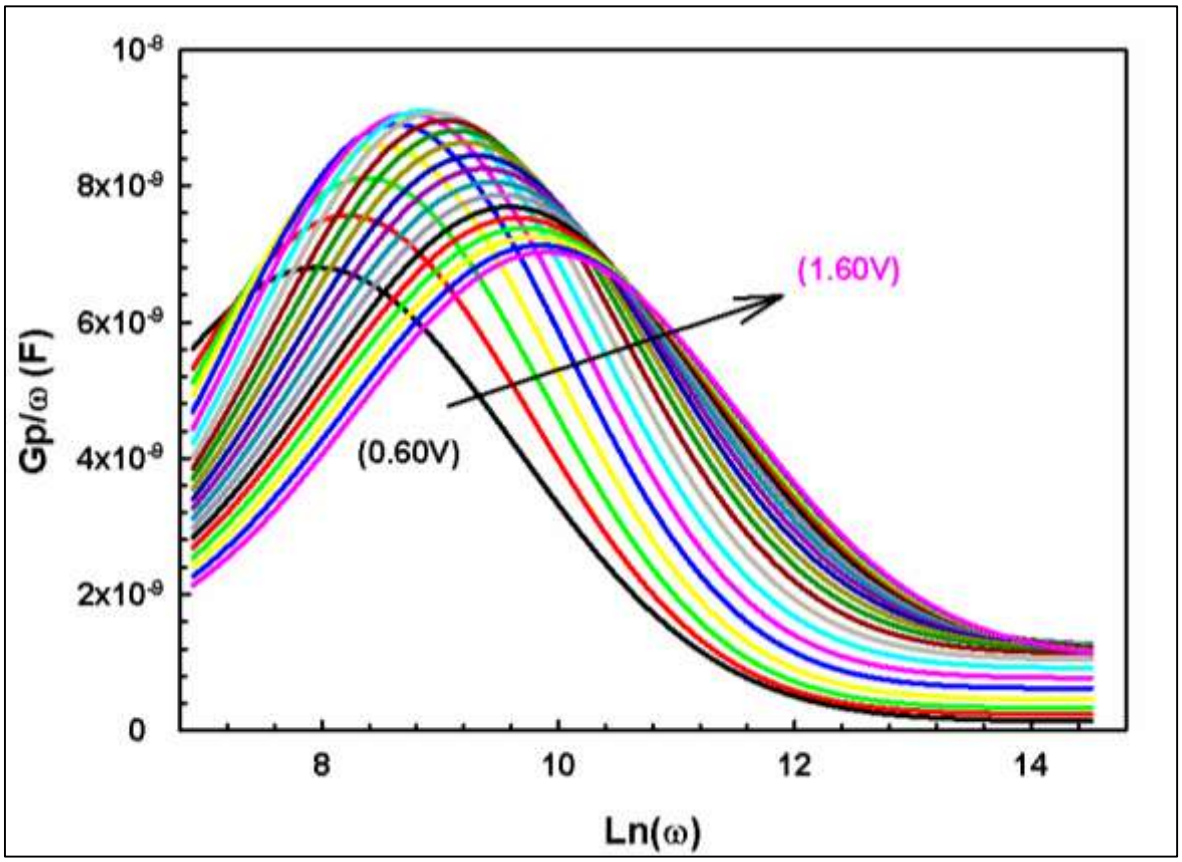
Şekil 3.8. 2 MHz frekansta ölçülen iletkenlik G_m/ω değerlerinden hesaplanan düzeltilmiş G_c/ω değerleri



Şekil 3.9. Düşük yüksek frekans kapasitans yöntemi ile elde edilen yüzey durumları dağılım grafiği

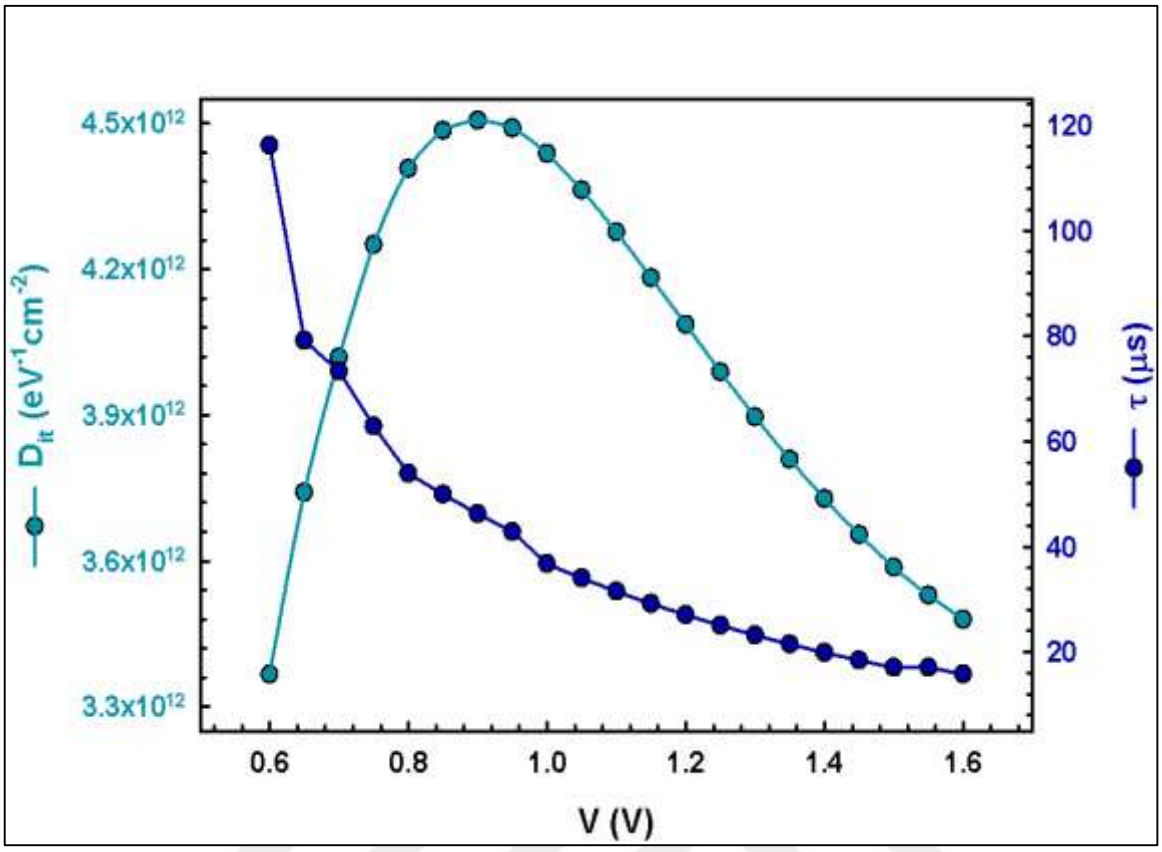
Eşitlik 2.13. kullanılarak düşük yüksek frekans kapasitans yöntemi ile elde edilen ve uygulama voltajına bağlı dağılımını gösteren $D_{it} - V$ grafiği Şekil 3.9' da verilmiştir. Şekil

3.9'dan görüldüğü gibi, dağılım $1{,}0\,V$ yakınında, tepe değeri $9{,}0 \times 10^{12} eV^{-1}cm^{-2}$ mertebesinde olan bir pik vermektedir. Elde edilen değerler kondüktans metodundan elde edilen değerlerle de uyuşmaktadır.



Şekil 3.10. $0{,}60\,V$ ile $1{,}60\,V$ arasında hesaplanan $\frac{G_p}{\omega} - ln\,\omega$ eğrileri

Şekil 3.10., Eş. 2.12 ile verilen her frekans için $0{,}60\,V$ ile $1{,}60\,V$ arasında $0{,}05\,V$ adımla hesaplanan G_p/ω eğrileri görülmektedir. Hesaplanan aralıkta her voltaj için eğriler net bir pik vermektedir. Bu piklerin büyüklüğü artan voltaj ile bir ters U davranışı sergileyecek şekilde değişirken pikin konumu ileri frekans değerlerine doğru kaymaktadır. Pik değerlerindeki artış ve gerilim eksenine göre bulundukları yerin ileri gerilim bölgesine doğru kayması ise ara yüzey tabaka ile yarıiletken arasındaki yasak enerji aralığına yerleşmiş ara yüzey durumlarının istisnai bir dağılımına ve uygulama gerilimine bağlı olarak yapı içinde oluşan elektrik alan altında dağılıp yeniden yerleşmeleri ile şekillenmelerine atfedilebilir.



Şekil 3.11. Al/(S Katkılı DLC)/p-Si/Au yapısının kondüktans metodu ile hesaplanan ve uygulama gerilimine bağlı D_{it}ve τ dağılım grafikleri

Şekil 3.11 Al/(S katkılı DLC)/p-Si/Au yapısının, hesaplanan D_{it} ve zaman sabiti τ değerlerinin voltaja göre dağılımı görülmektedir. Burada, D_{it} değerleri ters U şeklinde bir dağılım göstermektedir. Bu U davranışının pik değeri olan $4{,}50 \times 10^{12} eV^{-1} cm^{-2}$ değeri düşük yüksek frekans kapasitans yöntem ile elde edilen sonuçlarla uyumlu bir sonuç vermektedir. $0{,}60\ V$ için hesaplanan τ değeri yaklaşık $120\ \mu s$ iken $1{,}60\ V$ için $16\ \mu s$ olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan aralıkta τ değeri artan voltaj ile üstel olarak hızla azalmaktadır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma p tipi Si yarıiletken üzerine elektrokimyasal biriktirme yöntemi ile kaplanan S katkılı DLC katmanın yapısal, bu tabaka üzerine oluşturulun Schottky kontağın admitans yöntemi ile temel elektriksel çıktı parametrelerinin incelenmesi üzerine kurulmuştur.

Yapısal inceleme için öncelikle yarıiletken tabaka üzerinde S katkılı DLC katmanın nasıl dağıldığını göstermek için SEM görüntüleri alınmıştır. Buna göre, silikon yüzeyinin tamamen DLC film ile kaplandığı, yüzey üzerinde küresel parçacıkların ve adacıkların oluştuğu gözlendi. Tane boyutları $21\ nm$ ile $33\ nm$ arasında değişen adacıkların filmin her yerinde neredeyse düzgün bir şekilde dağıldığı görülmüştür.

Atomların türü, miktarı ve kimyasal bağ durumları hakkında bilgi edinmek amacıyla (XPS) analizi kullanılmıştır. Bu ölçüm sonuçlarında hedeflenen S katkılı DLC yapısının C 1s ve S 2p XPS spektrumları açıkça elde edilmiştir. C1'in spektrumu sırasıyla C-S, C-C ve C-OOH'ye atfedilen üç tepeye ayrıştırılmıştır. S 2p spektrumu, sülfit bileşiklerine (C-S-C ve H_2S gibi) atanan $167{,}8\ eV$ civarında ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak XPS spektrumları, DLC filmine S katkısının başarıyla yapıldığını göstermektedir.

Yapısal incelemesi tamamlanan S katkılı DLC filmin temel elektriksel çıktı parametrelerinin hesaplanmasında C ve G/ω ölçümlerini içeren admitans yöntemi kullanılmıştır. Bu ölçümler için Al/(S Katkılı DLC)/p-Si/Au MIS yapısında bir Schottky kontak oluşturulmuştur. Frekans ve uygulama gerilimi sırasıyla 2 kHz-2 MHz ve $\mp 5\ V$ seçilerek yeterince geniş bir spektrumda inceleme yapılması hedeflenmiştir. Kapasitans değerleri tüm frekanslarda artan frekans değeri ile azalma eğiliminde olmanın yanında, düşük frekanslarda tükenim bölgesinde yüzey durumlarının yoğun olduğu bir bölgenin varlığına atfedilen bir pik değerine ulaşmakta ve daha sonra hızla azalmaktadır. $C - V$ ve $G_m/\omega - V$ değerleri literatürde "iletken" davranış olarak bilinen ve ileri beslem voltajının yüksek değerlerinde görülen bir davranış sergilemektedir.

Elektronik aygıtların performansını etkileyen başlıca faktör olan seri direnç karakteristiği, frekans ve uygulama gerilimin birer fonksiyonu olarak çıkarılmıştır. R_s değerlerinin frekanstaki artımla birlikte tüm uygulama voltajı bölgesinde azaldığı görülmektedir.

Yeterince yüksek frekanslarda ve uygulama voltajının yüksek değerlerinde R_s değerindeki değişme oldukça küçüktür. Ayrıca yüzey polarizasyonu, özellikle düşük frekanslarda, azalan frekansla birlikte R_s değerlerindeki artıştan sorumludur. Eğrilerde her frekans için R_s değerlerinde (2 kHz için $\sim -0{,}50\ V$ ve 2 MHz için $\sim +0{,}80\ V$) bir pik noktası vardır. Bu pik değerinin konumu, frekanstaki artışla birlikte pozitif voltaj bölgesine doğru kayar. Bu kayma, tuzak seviyelerine yerleşen yüklere ve bu yüklerin elektrik alan etkisi ile yerlerinin değişip yeni tuzak seviyelerine yerleşmelerine bağlı olarak açıklanabilir.

Bu çalışmanın temel kısmını oluşturan ve deneysel olarak eklem bölgesi kapasitansını elde etmemizi sağlayan $1/C^2$ grafikleri çizilmiştir. Bu eğrilerin doğrusal kısmının eğim ve voltaj eksenini kestiği noktalar belirlenerek elektriksel çıktı parametrelerinden N_A, V_D, W_D, E_{max} ve Φ_B değerleri tüm frekanslar için elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, 2 kHz ve 2 MHz frekanslarında elde edilen değerler sırasıyla $3{,}62 \times 10^{14} cm^{-3}$, $0{,}521\ V$,$0{,}137 \mu m$, $7228\ V/m$ ve $0{,}832\ eV$ ve $4{,}01 \times 10^{14} cm^{-3}$, $0{,}474\ V$,$0{,}124 \mu m$, $7214\ V/m$ ve $0{,}753\ eV$ şeklindedir.

Son olarak incelenen yapının D_{it} değerleri düşük-yüksek frekans kapasitans metodu ve kondüktans metodu kullanılarak hesaplanan C ve G_m/ω değerlerinden hesaplanmıştır. Düşük yüksek frekans metodunda $9{,}0 \times 10^{12} eV^{-1} cm^{-2}$ tepe değerine ulaşan yüzey durumlarının mertebesi $4{,}5 \times 10^{12} eV^{-1} cm^{-2}$ değerine ulaşan bir ters U şeklindedir. Bu yüzey durumlarının ortalama ömürleri ise $0{,}60\ V$ yaklaşık $120\ \mu s$, $1{,}60\ V$ için $16\ \mu s$ olarak hesaplanmıştır. τ değerinin artan voltaj ile üstel olarak azaldığı görülmüştür.

Sonuç olarak, S katkılı DLC filmlerin elektrokimyasal biriktirme yöntemi başarılı bir şekilde yarıiletken yüzeylere kaplanabildiği, oluşturulan Al/(S Katkılı DLC)/p-Si/Au MIS yapısında arayüzey tabaka olarak yer alan bu tabakanın, elde edilen temel elektriksel çıktı parametrelerinin mevcut literatürle uyum içinde olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Rhoderick, E. H. (1978). *The Physics of Schottky Barriers*. (7.Baskı) Oxford: Clarendon Press.

2. Sharma, B. L. (1984). *Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their Applications*. New York:Plenum Press.

3. Sze, S. M., Crowel C. R., Khang, D., (1964). Photoelectric Determine of the Image Force Dielectric Constant for Hot Electrons in Schottky Barriers. *Journal of Applied Physics*, 35(8),2534- 2536.

4. Nevill M, (1938). The contact potential between a metal and a semiconductor. *Proceedings of the Royal Society of London A:Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 165(921), 391-399.

5. Shockley W., (1949). The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junctions in transistors. *Bell System Technical Journal*, 28(3),435-489.

6. Sze, S. M., (2007). *Physics of Semiconductor Devices* (3. Baskı). New Jersey: John Wiley and Sons, 362-390.

7. Singh, A., (1985). Characterisation of Interface States at Ni/nCdF_2 Schottky Barrier Type Diodes and the Effect of CdF_2 Surface Preparation. *Solid-State Electronics*, 28 (3), 223-232.

8. Bengi, A., Altındal, S., Özçelik, S., Mammadov,T.S., (2007). Gaussian distribution of inhomogeneous barrier height in $Al_{0.24}Ga_{0.76}As$/GaAs structures. *Physica B: Condensed Matter*, 396, 22-28.

9. Aydemir, U., Taşçıoğlu, İ., Altındal, Ş., Uslu, İ., (2013). A detailed comparative study on the main electrical parameters of Au/n-Si and Au/PVA:Zn/n-Si Schottky barrier diodes. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 16(6), 1865-1872.

10. Sharma, R., Barhai, P. K., Kumari, N. (2008). Corrosion resistant behaviour of DLC films. *Thin Solid Films*, 516(16), 5397–5403.

11. Michler, T., Grischke, M., Traus, I., Bewilogua, K., Dimigen, H. (1998). DLC films deposited by bipolar pulsed DC PACVD. *Diamond and Related Materials*, 7(2–5), 459–462.

12. Dikici, M., (2012). *Katıhal fiziği*. Ankara: Seçkin Yayıncılık.

13. Kittel, C., (2004). *Introduction to Solid State Physics* (8.Baskı). New York: Wiley.

14. Aydoğan, Ş., (2011). *Katıhal Fiziği*. Ankara:Nobel Yayıncılık, 221-230.

15. Çankaya, G., (2003). *Hidrostatik basınç altında metal/p-tipi Schottky diyotların elektriksel karakterizasyonu*. Doktora Tezi, Erzurum Atatürk Üniversitesi,

16. Sharma,M., Tripathi,S.K., (2013). Analysis of interface states and series resistance for Al/PVA:CdS nanocomposite metal-semiconductor and metal-insulator-semiconductor diode structures. *Applied Physics A: Materials Science& Processing*, 113(2),491-499.

17. Rhoderick, E.H., Williams, R.H., (1988). *Metal-Semiconductor Contacts*. Oxford: Clarendon Press.

18. Neamen, D. A., (1997). *Semiconductor Physics and Devices:Basic Principles* (2. Baskı). New York: Mc Graw-Hill Higher Education, 420-450, 517-523.

19. Cooke, M. J., (1990). *Semiconductor Devices*. New York: Prentice Hall, 294-308.

20. Ghandhi, S. K., (1983). *VLSI Fabrication Principles*. New York: John Wiley and Sons, 401-405.

21. Goetzberger, A., Klausmann, E., Schulz ,M. J., (1976). Interface states on semiconductor/insulator surfaces. *CRC Critical Reviews in Solid State Sciences*, 6(1), 1-43.

22. Grove, A. S., (1967). *Physics and Technology of Semiconductor Devices.* New York: John Wiley and Sons, 91-106, 334-357.

23. Schroder, D.K., (2006). *Semiconductor Material and Device Characterization* (3.Baskı). New Jersey: John Wiley and Sons,Inc., 319-371.

24. Kao.W.C., (2015). *Characterization of interface state in silicon carbide metal oxide semiconductor capacitors* (Doktora Tezi)., Arizona State University, 105.

25. Dios, A.D., Castan, E., Bailon, L., Babbolla, J., Lozand, M., Lons-Tamaya, E., (1990). Interface properties of semiconductor structures. *Solid-State Communications*, 75, 987.

26. Sze, S.M., Ng, K.K., (2006). *Physics of Semiconductor Devices* (3.baskı). Hoboken, NJ: John Wiley and Sons.

27. Akın, B., Altındal, Ş., (2020). On the frequency and voltage-dependent main electrical parameters of the Au/ZnO/n-GaAs structures at room temperature by using various methods. *Physica B Condens Matter*. 594.

28. Nicollian, E. H., Brews, J. R., (2002)., *MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology*. Wiley – Interscience.

29. Nikravan, A., Badali ,Y., Altındal, Ş., Uslu, İ., Orak, İ. (2017). On the Frequency and voltage-dependent profiles of the surface states and series resistance of Au/ZnO/n-Si structures in a wide range of frequency and voltage.*Journal of Electron Materials*, 46(10), 5728–5736.

30. Güçlü, Ç. Ş., Tanrıkulu, E. E., Dere, A., Altındal, Ş., Azizian-Kalandaragh , Y., (2023). A comparison of electrical characteristics of the Au/n-Si Schottky diodes with (ZnCdS:GO(1:1) and (ZnCdS:GO(1:0.5) doped PVP interlayer using current-voltage (I-V) and impedance-voltage (Z-V) measurements. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(28), 1909.

31. Feizollahi Vahid, A., (2024). *Nanokompozit Cu:DLC ince film tabakalı Al/(Cu:DLC)/p-Si Schottky diyotların hazırlanması, elektrik ile dielektrik özelliklerinin geniş frekans ve voltaj aralığında incelenmesi*. Doktora Tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

32. Demirci, B., (2006). *İndiyum katılı ZnO ince filmlerinin bazi fiziksel özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

33. Bal, H., (2006). *Püskürtme yöntemiyle elde edilen In_2O_3'ün elektriksel özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

34. Castner, D. G., Hinds, K., Grainger, D. W., (1996). X-ray photoelectron spectroscopy sulfur 2p study of organic thiol and disulfide binding interactions with gold surfaces. *Langmuir*, 12(21), 5083–5086.

35. Balcı, E., Feizollahi Vahid, A., Altındal Ş., (2025). Al/(S:DLC)/p-Si/Au (MIS) structure-based temperature sensors for moderate and high temperatures at enough high frequencies (0.1, 0.5, and 1 MHz). *Diamond and Related Materials*, 154, 112229.

36. Arslan, E., Şafak, Y., Altındal, Ş., Kelekçi, Ö., Özbay, E., (2010). Temperature dependent negative capacitance behavior in (Ni/Au)/AlGaN/AlN/GaN heterostructures. *Journal of Non-Crystalline Solids* 356 (14-15), 1006–1011.



Gazili olmak ayrıcalıktır