



**Au/(NiS:PVP)/n-Si (MPS) YAPISININ KAPASİTANS-VOLTAJ (C-V) VE
İLETKENLİK-VOLTAJ (G/ω-V) ÖLÇÜMLERİNİ KULLANARAK
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN FREKANS BAĞLI İNCELENMESİ**

Murat ULUSOY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2021

ETİK BEYAN

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

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

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

Murat ULUSOY

29/06/2021

Au/(NiS:PVP)/n-Si (MPS) YAPISININ KAPASİTANS-VOLTAJ (C-V) VE
İLETKENLİK-VOLTAJ (G/ω -V) ÖLÇÜMLERİNİ KULLANARAK ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN FREKANS BAĞLI İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Murat ULUSOY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2021

ÖZET

Tezin araştırma konusu olan diyot yapımızın arayüzeyi için hazırlanan NiS yapısı, mikrodalga destekli yöntem ile elde edilmiştir ve bu yöntem son zamanlarda nano-ölçekli sentezlerde büyük ilgi görmektedir. Arayüzey için ayrıca kullanılan polivinilpirolidon (PVP) polimer yapısı, bir yarı kristaldir ve geniş bir kristallik aralığına sahiptir. Özellikle hem suda hem de birçok organik çözücüde iyi çözünürlüğü sayesinde, toksik olmayan karakterleri, benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle endüstriyel birçok alanda kendine yer bulmuştur. Metal-yarıiletken kontaklarda da bu organik polimerler özellikle metal veya metal bileşikleriyle birlikte katkılanarak cihaz performansını önemli ölçüde etkileyen arayüzey durumlarını ortadan kaldırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Toz halinde elde edilen NiS nano-yapıları uygun bir PVP solüsyonu elde etmek için çözelti olarak deiyonize suda çözündürüldükten sonra oluşan NiS:PVP çözeltisi oda koşullarında karıştırılıp spin kaplama yöntemi ile yarıiletken kristal yüzeyine ince bir film tabaka şeklinde kaplanmıştır. Kristal arka yüzeyine kaplanan omik kontak ile Schottky kontaklar NiS:PVP yapısının üzerine termal buharlaştırma yöntemiyle kaplandı. Hazırlanan Au/(NiS:PVP)/n-Si diyot yapısının hem kapasitans-voltaj (C-V) hem de iletkenlik-voltaj (G/ω -V) karakteristikleri, oda sıcaklığında, geniş bir frekans ve voltaj aralığında incelendi. Ölçülen elektrofiziksel parametreler, tüketim ve yığılma bölgesinde güçlü frekans bağımlılığı özellikleri göstermiştir. Bu etkilerin nedeni arayüzey durumları (N_{ss}), seri direnç (R_s) ve polarizasyonun yanı sıra organik arayüzey katmanının (NiS:PVP) varlığından kaynaklanmaktadır.

Bilim Kodu	: 20227
Anahtar Kelimeler	: (NiS:PVP) organik polimer arayüzey tabakası, frekans-voltaj karakteristiği, iletkenlik-voltaj karakteristiği, Schottky diyot yapısı
Sayfa Adedi	: 60
Danışman	: Doç. Dr. Perihan DURMUŞ

INVESTIGATION OF ELECTRICAL PROPERTIES OF Au/(NiS:PVP)/n-Si (MPS)
STRUCTURE USING CAPACITANCE-VOLTAGE (C-V) AND CONDUCTANCE-
VOLTAGE (G/ω -V) MEASUREMENTS DEPENDING ON FREQUENCY

(M. Sc. Thesis)

Murat ULUSOY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2021

ABSTRACT

The NiS structure prepared for the interface of our diode structure, which is the research subject of the thesis, was obtained by the microwave-assisted method, and this method has recently attracted great attention in nano-scale syntheses. The polyvinylpyrrolidone (PVP) polymer structure also used for the interface is semi-crystalline and has a wide crystallinity range. Especially, thanks to its good solubility in both water and many organic solvents, it has found a place in many industrial areas due to its non-toxic characters and unique physical and chemical properties. In metal-semiconductor contacts, these organic polymers are widely used in order to eliminate the interface conditions that significantly affect the performance of the device by doping them with metal or metal compounds. The NiS nano-structures obtained in powder form were dissolved in deionized water as a solution to obtain a suitable PVP solution, and the NiS:PVP solution formed was mixed under room conditions and coated with a thin film layer on the semiconductor crystal surface by spin coating method. With ohmic contact coated on the crystal back surface, Schottky contacts on NiS:PVP structure were covered by the thermal evaporation method. Both capacitance-voltage (C-V) and conductivity-voltage (G/ω -V) characteristics of the prepared Au/(NiS:PVP)/n-Si diode structure, at room temperature, have a wide frequency and voltage. The measured electrophysical parameters showed strong frequency dependency characteristics in the depletion and accumulation region. These effects are due to the presence of the organic interfacial layer (NiS:PVP) as well as the interfacial states (N_{ss}), series resistor (R_s), and polarization.

Science Code : 20227

Key Words : (NiS:PVP) organic polymer interface layer, frequency-voltage characteristic, conductivity-voltage characteristic, Schottky diode structure

Page Number : 60

Supervisor : Assoc. Prof. Perihan DURMUŞ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam kapsamında olsun ve dahi diğer tüm konularda olsun yardımlarını ve ilgisini benden hiçbir zaman esirgemeyen sevgili danışman hocam Doç. Dr. Perihan DURMUŞ'a öncelikli olarak teşekkürlerimi bir borç bilirim. Özellikle tez çalışmamız alanında engin bilgi ve tecrübeye sahip olan sayın Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL hocama, bana bu çok değerli bilgi ve tecrübelerini özenle, sabırla ve inançla aktardığı için teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Benden çoğu zaman kilometrelerce uzakta olsalar da özlemleriyle hep yanımda olan sevgili annem, babam ve kardeşime varlıklarından ötürü minnettar olduğumu bildirmek isterim.

Ayrıca hayatımın en güzel ve en zor anlarında hep yanımda olan, öğretmenlik yaptığım dönemlerde olsun ve sonrasında akademik çalışmalar yaptığım zamanlarda olsun aslında en büyük dayanağım, destekçim ve metanetim olan sevgili eşime sonsuz minnettar olduğumu bildirmek isterim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİLER.....	7
2.1. Metal-Yarıiletken (MS) Kontklar	7
2.1.1. Doğrultucu ve omik kontak	8
2.1.2. Katılarda enerji bant teorisi	9
2.1.3. Metal/n-tipi yarıiletken yapılarda Schottky (Doğrultucu) kontaklar	10
2.1.4. Metal/n-tipi yarıiletken yapılarda omik kontaklar	14
2.2. Schottky Teoremi Üzerine Düzenlemeler	15
2.2.1. Hayali kuvvet etkisiyle Schottky bariyer düşmesi (Hayali Schottky).....	16
2.2.2. Arayüzey durumları	18
2.2.3. Seri direnç etkisi (R_s).....	24
2.2.4. Hareketli iyonlar/yükler	25
2.2.5. Tünelleme mekanizması	25
2.3. İdeal Metal-Yalıtkan/Polimer-Yarıiletken (MIS/MPS) Yapılar	25
2.3.1. Yığılma bölgesi	30
2.3.2. Tüketim bölgesi	30
2.3.3. Terslenim bölgesi	31

Sayfa

2.4. MIS Yapılarda Arayüzey Durum Yoğunluğu Teorisi (Gerçek MIS Yapısı) ...	32
3. DENEYSEL YÖNTEM	37
3.1. NiS ve Polivinilpirolidon (PVP) Yapıları Hakkında Genel Bilgiler	37
3.1.1. Nikel sülfid (NiS) yapısının özellikleri.....	37
3.1.2. Polivinilpirolidon (PVP)	38
3.2. Au/(NiS:PVP)/n-Si Schottky Yapısının Oluşturulması.....	38
3.2.1. Kristal temizleme	38
3.2.2. Omik kontak.....	39
3.2.3. (NiS:PVP) arayüzey tabakasının oluşturulması	39
3.2.4. Doğrultucu kontak	40
3.3. Deneysel Ölçüm Sistemi	41
4. DENEYSEL BULGULAR	43
4.1. Geniş Voltaj ve Frekans Aralığında C-V ve G/ ω -V Karakteristikleri	43
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	51
KAYNAKLAR.....	55
ÖZGEÇMİŞ.....	59

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Metal ve yarıiletkenlerin iş fonksiyonlarına bağlı olarak doğrultucu ve omik kontak oluşumu	8



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Bir MS yapısının şematik gösterimi	7
Şekil 2.2. Katılara ait enerji bant diyagramı	9
Şekil 2.3. Bir metal ile n-tipi bir yarıiletkenin (a) kontak öncesi ve (b) kontak sonrası enerji bant diyagramı (Schottky kontak)	10
Şekil 2.4. Metal/n-tipi yarıiletken için ileri (doğru) beslem (a) ve ters beslem (b) altında enerji bant diyagramı	13
Şekil 2.5. Bir metal ile n-tipi bir yarıiletkenin (a) kontak öncesi ve (b) kontak sonrası enerji bant diyagramı (omik kontak)	14
Şekil 2.6. Schottky kontak, omik kontak ve PN eklem için akım-gerilim grafiği	15
Şekil 2.7. Sabit bir elektrik alan varlığında hayali kuvvetten dolayı potansiyel engel düşüşü	17
Şekil 2.8. Si kristali için kırık kovalent bağlar (sarkan bağlar)	19
Şekil 2.9. n-tipi bir Yarıiletkende oluşan arayüzey durumlarının varlığında (a) kontak öncesi ve (b) kontak sonrası enerji bant diyagramı	19
Şekil 2.10. Bir MIS/MOS kesitinde yarıiletken/oksit tabaka bulunan arayüzey durumları	21
Şekil 2.11. İletkenlik yöntemi için eşdeğer devreler; (a) standart MOS kapasitör devresi, (b) MOS kapasitörün basit devresi, (c) ölçülen sistem devresi	22
Şekil 2.12. Basit bir MIS/MPS yapısının şematik gösterimi	26
Şekil 2.13. Termal dengede ($V = 0$) ideal bir MIS yapının enerji bant diyagramı, (a) n-tipi yarıiletken, (b) p-tipi yarıiletken	27
Şekil 2.14. MIS/MPS kapasitans eşdeğer devresi	28
Şekil 2.15. Uygulanan giriş voltajına bağlı olarak n-tipi bir MIS yapıya ait C-V eğrisi	29
Şekil 2.16. İdeal bir MIS yapısına ait eşdeğer kapasitans şeması, (a) yığılma, (b) tüketim, (c) terslenim	30
Şekil 2.17. İdeal durumda $V \neq 0$ için n-tipi MIS/MPS yapıda enerji bant durumları, (a) yığılma, (b) tüketim, (c) terslenim	32
Şekil 3.1. NiS bileşiğine ait kristal kübik yapı	37

Şekil	Sayfa
Şekil 3.2. Doğrultucu ve omik kontaklar için metal buharlaştırma sistemi.....	39
Şekil 3.3. NiS nano-yapısına ait XRD analiz grafiği	40
Şekil 3.4. Au/(NiS:PVP)/n-Si yapısına ait şematik gösterim	41
Şekil 3.5. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri için kullanılan ölçüm sistem şeması.....	41
Şekil 4.1. Au/(NiS:PVP)/n-Si yapısına ait frekans ve voltaja bağlı C-V grafiği.....	43
Şekil 4.2. Au/(NiS:PVP)/n-Si yapısına ait frekans ve voltaja bağlı G/ω -V grafiği.....	44
Şekil 4.3. Au/(NiS:PVP)/n-Si yapısının çeşitli frekanslarda R_i değişim karakteristikleri.....	45
Şekil 4.4. Au/(NiS:PVP)/n-Si yapısının çeşitli voltajlarda C-ln(f) karakteristikleri	46
Şekil 4.5. Au/(NiS:PVP)/n-Si yapısının çeşitli voltajlarda G/ω -ln(f) karakteristikleri .	47
Şekil 4.6. Au/(NiS:PVP)/n-Si yapısının yüksek frekansta (1MHz) C_m -V ve C_c -V karakteristik eğrisi	48
Şekil 4.7. Au/(NiS:PVP)/n-Si yapısının yüksek frekansta (1MHz) G_m -V ve G_c -V karakteristik eğrisi	48

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A	Kontak alanı
A_i	Yalıtkan tabaka yüzey alanı
Au	Altın
$\text{\AA}$	Angstrom
A^*	Richardson sabiti
C	MIS/MPS yapı kapasitansı
C_c	Düzeltilmiş kapasitans
C_{ox}/C_i	Yalıtkan tabaka kapasitansı
C_m	Ölçülen kapasitans
C_p	Paralel kapasitans
C_{sc}	Birim alan başına yarıiletken uzay yükü kapasitansı
C_{ss}	Arayüzey durumlarının kapasitansı
d_i	Yalıtkan/Arayüzey tabaka kalınlığı
E_C	İletim bandı alt enerji seviyesi
E_F	Fermi enerji seviyesi
E_i	Saf Fermi enerji seviyesi
E_g	Yasak bölge enerji seviyesi
E_v	Valans bandı üst enerji seviyesi
G_c	Düzeltilmiş iletkenlik
G_m	Ölçülen iletkenlik
G_p	Paralel iletkenlik
H_2O_2	Hidrojen peroksit
I_0	Doyma akımı
k	Boltzman sabiti
m_e	Elektron kütlesi
m_e^*	Elektron etkin kütlesi
n	İdealite faktörü

Simgeler**Açıklamalar**

N_2	Azot gazı
N_{ss}	Arayüzey durum yoğunluğu
$NaOH$	Sodyum hidroksit
Na_2S	Sodyum sülfür
NH_4OH	Amonyum hidroksit
$NiCl_2$	Nikel klorür
NiS	Nikel sülfür
Q_{sc}	Arayüzey uzay yükü
Q_{ss}	Arayüzey yüzey yükü
R_s	Seri direnç
V_D	Difüzyon potansiyeli
V_F	İleri beslem gerilimi
V_G	Uygulanan giriş voltajı
V_i	Arayüzey tabaka üzerine düşen voltaj
V_R	Ters beslem gerilimi
V_{Rs}	Seri direnç üzerine düşen voltaj
V_{ss}	Arayüzey durumları üzerine düşen voltaj
W_D	Tüketim bölgesinin genişliği
Y	Admittans
Z	Empedans
Φ_B	Schottky potansiyel engeli
Φ_M	Metalin iş fonksiyonu
Φ_S	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
Φ_0	Nötral arayüzey potansiyel engeli
$\Delta\Phi$	Schottky potansiyel engel düşüşü
χ	Yarıiletken elektron yakınlığı
τ	Arayüzey durumlarının gevşeme süresi
ω	Harici voltaj açısal frekansı
Ψ_{Bn}	Saf Fermi ile Fermi enerji seviyesi farkı
ϵ_0	Boşluk için dielektrik katsayısı
ϵ_i	Arayüzey tabaka için dielektrik katsayısı
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik katsayısı

Kısaltmalar**Açıklamalar****ac**

Alternatif Akım

C-V

Kapasitans-Voltaj

G/ ω -V

İletkenlik-Voltaj

MS

Metal-Yarıiletken

MOS

Metal-Oksit-Yarıiletken

MIS

Metal-Yalıtkan-Yarıiletken

MPS

Metal-Polimer-Yarıiletken

PVP

Polivinilpirolidon

XRD

X-Işınları kırınımı

TE

Termiyonik emisyon

TFE

Termiyonik alan emisyonu

1. GİRİŞ

Yarıiletkenler; ışık, uygulanan voltaj veya sıcaklık gibi dış etkenler tarafından kontrol edilebilen elektronik, optik özellikleri sayesinde günlük yaşantımızın önemli bir parçası olan elektronik cihazlar için en temel malzemelerden birisi konumundadır. Yarıiletkenlere dair ilk temel bilgiler 1822 yılında kurşun sülfür için Seebeck [1] ve 1833 yılında gümüş sülfür için Faraday [2] tarafından ortaya koyulmuştur. Bir aygıt olarak en eski yarıiletken aygıtların temelini oluşturan metal-yarıiletken aygıtların ilk uygulaması, 1874 yılında yarıiletken kristaller üzerine bakır (Cu) ve demir (Fe) gibi bazı metallerin nokta kontaklarının doğrultucu özelliğini gözlemleyen Braun'un keşfine dayanır [3].

Bu nokta kontak diyotlar, telsiz telgrafın erken dönemlerinde radyo dalga detektörü olarak, 2. Dünya savaşı dönemlerinde ise frekans dönüştürücü ve düşük seviyeli mikrodalga detektörü olarak kullanılmıştır. Aynı dönemlerde nokta kontak diyotların kendi özellikleri açısından son derece güvenilir olmadıkları belirlendikten sonra bu diyotlar yerini, vakum ortamında yarıiletken yüzeyine ince film metal büyütülmesiyle uygun şekilde hazırlanmış metal-yarıiletken diyotlara bırakmıştır. Bu şekilde geliştirilen diyotlar çok daha üstün özellikler sergilemiştir ve günümüzde metal-yarıiletken (MS) diyotlar hakkındaki bilgimiz bu tür yapılar üzerindeki çalışmalardan elde edilmektedir [4].

Metal-yarıiletken (MS) kontakların davranışını anlamaya yönelik ilk önemli adım Walter Schottky tarafından metal ile yarıiletken arasındaki arayüzeyde bir potansiyel engelin fark edilmesiyle atıldı [5]. Schottky'nin bu açıklamasından dolayı, onun adına metal-yarıiletken diyotlar genellikle *Schottky engel diyotları* (*Schottky barrier diodes*) (SBD) olarak isimlendirilir. Daha sonra Schottky [6] ve Sir Neville Mott [7] potansiyel engelin oluşum mekanizmasını birbirinden bağımsız olarak açıkladılar ve bu engel yüksekliği ile engel şeklini hesaplamak için çeşitli modeller önerdiler. Schottky ve Mott'un engel yüksekliğini veya bir diğer ifadeyle bariyer yüksekliğini anlamak için önerdiği modele göre bu yükseklik, metalin iş fonksiyonu (Φ_m) ile yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) arasındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır [4].

Mott, oluşan potansiyel bariyer bölgesinde yüklü safsızlıklar olmadığını ve buna bağlı olarak bu bölgede elektrik alanın sabit, elektrostatik potansiyelin mesafeyle doğrusal olarak değiştiğini varsaymıştır. Bu açıklamanın aksine Schottky, bariyer bölgesinin sabit bir yüklü

safsızlık yoğunluğu içerdiğini, böylece elektrik alanın metale yaklaştıkça doğrusal olarak, elektrostatik potansiyelin ise Poisson denklemine göre kuadratik olarak arttığını ifade etmiştir [8]. Başka bir önemli açıklama 2. Dünya savaşı sırasında Hans Albrecht Bethe'nin bariyer üzerindeki akım iletim mekanizması olarak *Termiyonik Emisyonu* (TE) teoremini önermesiyle gerçekleşti [9]. Bu teoreme göre yeterli termal enerjiye sahip iletim bandı elektronları potansiyel engelini aşarak yarıiletken metale doğru hareket eder ve bu durum neticesine bir yük akışı meydana gelir. Termal denge durumunda ise engel yüksekliği kT değerinden oldukça yüksektir ve bu durumda yük akışı yoktur.

Yarıiletken teknolojisinde metal kontakların önemli ölçüde geliştirilmesiyle 1960'larda Schottky diyotlar üzerine araştırma ve geliştirme çalışmalarında kayda değer bir canlanma görülür. 1970'lerde ise çalışmalar esas olarak iki yönlü olmuştur. İlki önceki on yılda elde edilen bilgiler ile Schottky diyotlar kullanılarak endüstriyel cihazların üretimi şeklindedir. İkincisi ise metal-yarıiletken arayüzeyinin daha eksiksiz bir şekilde anlaşılması için yapılan teorik çalışmalardır [4]. Son çeyrek yüzyıldır, Schottky diyot temelli bileşenlerin mikroelettronik alanında kullanımı gittikçe artmaktadır ve bariyer oluşumu ve metal-yarıiletken arayüzler boyunca mevcut taşıma fiziğinin tam olarak anlaşılması amacıyla araştırma faaliyeti devam etmektedir [8]. Metal-yarıiletken kontaklar veya yaygın adıyla Schottky engel diyotlar, günümüzde yarıiletken elektronik ve optoelektronik aygıtlarda en çok kullanılan doğrultucu kontakların başında gelmektedir. [10–12]. Ayrıca, son yıllardaki deneysel ve teorik çalışmalar metal-yarıiletken arayüzeyi boyunca akım iletim mekanizmasının ve engel biçiminin fiziğini açıklamaya yönelik olarak sürmektedir.

Bir metal ile yarıiletkenin temas ettirilmesi, bir başka ifadeyle sıkı kontak haline getirilmesi sonucu oluşan arayüzeyin en önemli özelliklerinden birisi, metal-yarıiletken arayüzeyi boyunca, yarıiletkende hareketli taşıyıcılardan göreceli olarak yoksun ve yüksek dirençli bir bölge oluşmasıdır [4]. Bu şekilde metal-yarıiletken arayüzeyinde bant yapılarındaki süreksizlikten ötürü oluşan potansiyel farka Schottky engel bariyeri denilmektedir. Bu bariyer, akım iletiminin yanı sıra metal-yarıiletken yapısının kapasitans davranışını da kontrol etmekten sorumludur [13].

Metal-yarıiletken yapılara dair birçok deneysel ve teorik çalışmalar yapıyor olmasına rağmen hala bu yapılar hakkındaki araştırmalar tüm hızıyla devam etmektedir. Bunun nedeni ise; yapıların iletkenliği ve potansiyel engel yüksekliğinin sıcaklık, frekans, uygulanan

voltaja, MS arayüzeyinde yarıiletkenin yasak enerji aralığına karşılık gelen arayüzey durumlarına, diyotun seri direncine, radyasyon ve yine MS arayüzeyindeki yalıtkan tabaka ile engelin biçimi gibi birçok farklı nedene bağlı olmasındandır [4, 8, 13].

Son yıllarda metal-yarıiletken aygıtların iletkenlik ve kapasitans özelliklerini arttırmak için metal ile yarıiletken arasına yerleştirilen farklı arayüzey malzemeleri kullanılmaya başlanmıştır. Bu şekilde oluşturulan metal-yarıiletken (MS) yapılar, arayüzey tabakalı metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS), metal-oksit-yarıiletken (MOS) veya metal-polimer-yarıiletken (MPS) tipi Schottky engel diyotları (SBDs) elektronik endüstrisinde oldukça fazla kullanılmaktadır. Hazırlanan bu farklı MS, MIS, MOS veya MPS tipi diyotların elektriksel özellikleri yapının seri direnci, MS arayüzeyinde oluşan arayüzey durumları, engelin biçimi, numunenin sıcaklığı, uygulanan voltaj, MS arayüzeyinde doğal veya yapay olarak oluşan engelin kalınlığı ve homojenliğine oldukça bağlıdır [4, 8, 14-17]. Metal-yarıiletken kontaklar bir diğer ismiyle Schottky kontaklarda malzemeler bir araya getirilirken ara yüzeylerde istenmeyen bir oksit tabaka meydana gelmektedir. Bu tabaka varlığının da diyot parametrelerini önemli bir şekilde etkilediği bilinmektedir.

Metal ile yarıiletken arasında bir yalıtkan tabaka ister deneysel yollarla oluşturulsun ister kendiliğinden oluşsun, bu tabakanın varlığı ve türü aygıtın farklı karakteristiklerini etkiler. Örneğin, Si yarıiletkeni temizlenirken ne kadar dikkat edilirse edilsin Si yüzeyindeki doymamış bağlar hava ile reaksiyona girerek oksit bir yalıtkan tabaka oluşturur. Bu yalıtkan tabakanın kalınlığı arttıkça aygıtın farklı özellikleri de bu durumdan etkilenir. Metal ve yarıiletken arasında oluşan yalıtkan bir tabaka temel olarak aygıtlar üzerinde üç tür etkiye sahiptir [8]. Bunlar;

1. Arayüzeyde potansiyel düşmesi olacağı için, sıfır beslemdeki engel yüksekliği yalıtkan tabaka yokken ki engel yüksekliğinden daha düşük olacaktır.
2. Elektronlar yalıtkan içerisinden tünelleme yapmak zorunda kalacakları için aygıtın akımı, ideal bir Schottky diyot akımından düşük olacaktır ve Richardson sabiti de beklenen değerinden çok düşük çıkacaktır.
3. Diyota bir dış gerilim uygulandığında gerilimin bir kısmı yalıtkan tabaka boyunca düşeceğinden engel yüksekliği, uygulanan dış geriliminin bir fonksiyonudur.

Schottky diyotların elektriksel ve optik özelliklerini iyileştirmek için hem esnek yapıları ve düşük maliyetleri nedeniyle hem de iyi performans özellikleri sayesinde katkılı organik iletken polimer/polimer kompozit arayüzey katmanı kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır [18-22]. 1980'li yıllarda başlayan yarıiletken organik polimer araştırmalarının başarıyla sonuçlanmasının ardından bu polimerler, elektriksel ve mekanik özelliklerinden dolayı elektronik endüstrisinde yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Mekanik açıdan güçlü, ucuz ve kolay hazırlanabilir olmaları açısından da avantajlı olan iletken polimerler, bilim dünyasının teknolojik gelişmeler ışığında üzerine eğilmesinin önemini açıklar [23]. Ayrıca iletken polimerler metallerle kontak oluşturduğu zaman fotovoltaik ve doğrultucu etki gösterdiğinden son zamanlarda elektronik teknolojisinde daha da önemli bir yere sahip olmaya başlamışlardır [18-22, 24].

İletken polimerleri diğer polimerlerden ayıran en önemli özellik, her adımda değişen bağ yapısına sahip olmalarıdır. Bu durumdaki bağ yapısına konjugasyon denir. Sadece konjuge olmuş polimerler elektriği iletebilirler [28-29]. Konjuge polimerlerin en önemli uygulama alanlarından biri de Schottky diyotlardır. Konjuge olmuş polimerler, metaller ile Schottky engeli oluşturur. Metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan veya polimer tabakanın varlığı ara yüzey tabaka ve ara yüzey durumlarını etkiler ve metal-yarıiletken yapıların elektriksel özelliklerinin değişmesine neden olur [31-33]. Bu polimer ara yüzey tabakanın varlığı hem metal ile yarıiletkeni birbirinden izole eder hem de metal ile yarıiletken arasındaki yük geçişlerini düzenler. Ayrıca ara yüzey tabakaları yüzeyi pasivize eden, sızıntı akımını en aza indiren, doğrultucu özelliğe yaklaşacak yüksek dielektrik sabitli malzemelerden seçilir. Bu yüzden ara yüzeyde polimer kullanılması diyotun doğrultma davranışına katkıda bulunmaktadır [30]. Bu polimerler arasında özellikle Polivinilpirolidon (PVP) ve Polivinilalkol (PVA) suda çözünür ve toksik olmayan polimerlerdir ve geniş bir kristallik, yüksek dielektrik dayanım, daha düşük iletkenlik ve daha iyi yük depolama kapasitesine sahiptirler. Bununla birlikte, MS yapılarında yüksek dielektrikli bir arayüzey tabakası sağlamak, bize sabit ve kontrol edilebilir bir bariyer yüksekliğini korumak, doğrultma oranını (RR) arttırmak gibi bazı avantajlar da sağlar. Örneğin MS yapılar için önemli bir parametre olan doğrultma oranını (RR), arayüzeyinde PVP polimer bulunan bir MS yapı ve bulunmayan bir MS yapı ile kıyaslandığında, polimer bulunan yapıda bu oranın 55 kat daha fazla olduğu görülmüştür [34].

Yaklaşık son otuz yılda hem akademik hem de endüstriyel araştırma laboratuvarlarının büyük çabaları sayesinde, organik yarı iletken cihazlar hızlı bir şekilde ilerlemiş ve buna bağlı olarak organik ışık yayan diyotlardan (OLED'ler) yapılmış ekranlar ile organik alan etkili transistörler (OFET'ler) veya organik fotovoltaiik hücreler (OPV'ler) temelinde güneş enerjisi toplama modülleri içeren ilk ticari ürünler ortaya çıkmıştır [25].

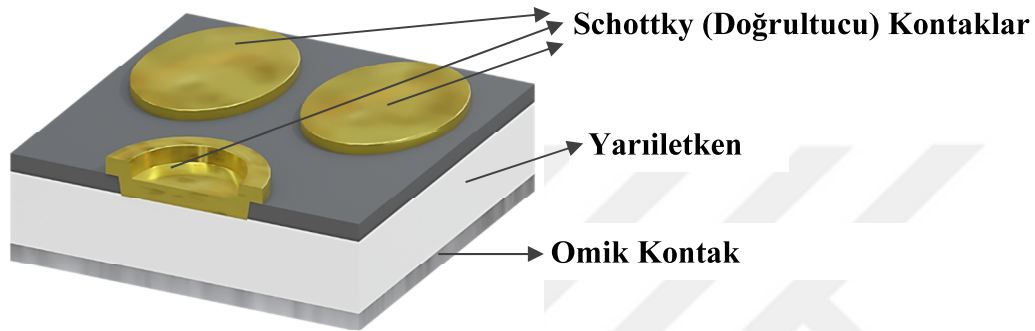
Polimer yapılar sadece tek başlarına değil bazen de farklı tür metal veya metal oksit/sülfid bileşikler ile katkılanarak da arayüzey tabaka olarak kullanılırlar. Özellikle yüksek dielektrik katsayılı metal oksit/sülfid yapılar iyi yalıtım ve yük (enerji) depolayabilme özellikleri sayesinde sıkça tercih edilmektedir [15-18, 21, 22, 49, 50]. Çeşitli enerji depolama sistemleri arasında geçiş metali sülfidleri, yüksek güç yoğunlukları, kısa şarj-deşarj süreleri ve üstün çevrim ömürleri nedeniyle elektrokimyasal kapasitörler veya süperkapasitörler olarak adlandırılır [26]. Metal sülfidler arasında da nikel sülfidler (NiS), iyi elektronik iletkenlik, yüksek redoks aktivitesi, düşük maliyet ve imalat kolaylığı avantajları ile büyük ilgi görmektedir [27]. Ayrıca nikel sülfidler, gelecek vaat eden süperkapasitans elektrot malzemeleri olarak araştırılan ve iyi performans gösteren NiS, NiS₂ ve Ni₃S₂ gibi birçok farklı faza da sahiptir [26].

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışma Au/(NiS:PVP)/n-Si (MPS) Schottky engel diyotlarının hem frekans hem de voltaja bağlı elektriksel özelliklerini inceleyen bir çalışmadır ve toplam beş bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm olan giriş bölümünde, metal-yarıiletken (MS) yapılar ile ilgili tarihsel sürece ve yüzeysel olarak teorik bilgilere değinilerek bu yapılar ve kullanım alanları ile ilgili özet bilgilere yer verilmiştir. İkinci bölümde, MS yapıların kontak ve arayüzey durumları ile elektriksel özelliklerine dair bazı temel teorik bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde; NiS ve PVP hakkında bazı temel bilgilerin yanında, Au/(NiS:PVP)/n-Si (MPS) yapılarının hazırlanması ve deneysel ölçüm sistemleri hakkında gerekli bilgiler verildi. Dördüncü bölümde; hazırlanan Au/(NiS:PVP)/n-Si (MPS) Schottky engel diyotlarının frekansa bağlı ölçümler sonucu elde edilen elektriksel verileri ve grafikleri incelenerek yorumlandı. Beşinci bölüm olan son bölümde ise elde edilen tüm deneysel sonuçlar literatür karşılaştırması ve gerekçeleri ile yorumlanarak gerekli öneriler sunuldu.

2. TEORİK BİLGİLER

2.1. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklar

Metal-yarıiletken (MS) kontaklar adından da anlaşılacağı gibi bir metal ile yarıiletkenin atomik boyutta bir araya getirilmesiyle oluşturulur. Bu şekilde oluşturulan yapılar Schottky kontaklar olarak da bilinir. Bir MS yapısının şematik diyagramı Şekil 2.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Bir MS yapısının şematik gösterimi

Bir metal ile yarıiletken atomik boyutta bir araya getirildiğinde, her iki malzemenin iş fonksiyonuna bağlı olarak iki tür kontak oluşur. Bunlar, *Doğrultucu (Schottky) kontak* ve *Omik kontak* olarak adlandırılır. Bu kontak türlerine daha detaylı bakmadan önce enerji bant diyagramlarını daha iyi kavrayabilmek adına bazı fiziksel tanımlara değinmek gerekir. Bunlar;

- Metalin iş fonksiyonu (Φ_M): Metalin Fermi enerji seviyesinde bulunan bir elektronunu vakum seviyesine çıkarmak veya bir başka ifadeyle çekirdeğe olan bağlılığını tamamen ortadan kaldırıp elektronu serbest parçacık haline getirmek için verilmesi gereken minimum enerji miktarıdır.
- Fermi enerjisi (E_F): Metaller için Fermi enerjisi, mutlak sıfır sıcaklığında (0 K’de) elektronlar tarafından işgal edilmiş olan en yüksek enerjili dolu seviyeye denir. Yarıiletkenlerde ise bu enerji seviyesi, taşıyıcı yoğunluğuna ve sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik göstermekle birlikte valans ve iletkenlik bantları arasındaki yasak enerji bölgesinde bulunur. Fermi enerjisi, n-tipi yarıiletkenlerde iletim bandının alt seviyesine yakinken, p-tipi yarıiletkenlerde ise valans bandının üst seviyesine yakındır.

- Vakum seviyesi: Metal yüzeyinin hemen dışında sıfır kinetik enerjiye sahip bir elektron için tanımlanan enerjisi seviyesidir. Bir MS yapıda bariyer yüksekliğinin belirlenmesindeki en önemli nokta bu vakum seviyesinin yapı boyunca sürekli kalması gerektiridir [4].
- Yarıiletken iş fonksiyonu (Φ_S): Yarıiletkenin Fermi enerji seviyesindeki bir elektronunu vakum seviyesine çıkarabilmek için verilesi gereken minimum enerji miktarıdır. Yarıiletkenlerde Fermi seviyesi katkı atomlarının yoğunluğu ile değişkenlik gösterdiği için Φ_S ’ de değişkenlik gösterir.
- Elektron yakınlığı (χ): Bir diğer ifadeyle elektron ilgisi, yarıiletkende iletkenlik bandının taban seviyesinde bulunan bir elektronun enerjisi ile vakum seviyesi arasındaki farka denir ve bu ifade katkı atomları yoğunluğuna bağlı değildir [4].

2.1.1. Doğrultucu ve omik kontak

MS yapılarda yarıiletken malzemeye kontak edilecek olan alt ve üst metallerin seçimi oldukça önemlidir. Kontakın omik veya doğrultucu olması seçilen metaller ile yarıiletkenin iş fonksiyonlarına bağlıdır. Yarıiletken ile metal kontak edildiğinde eğer yük taşıyıcıları (elektronlar veya holler) tek bir yönde kolayca hareket edebiliyorsa bu tür kontaklara *doğrultucu kontak* veya *Schottky kontak* denir. Bu tür kontaklarda uygulanan harici voltajın işaretine bağlı olarak akım bir yönde çok iyi iletilirken tersi yönde hemen hemen hiç iletilmez. *Omik kontaklar* ise uygulanan harici voltajın işaretine bağlı olmaksızın yük taşıyıcıların her iki yönde de kolayca hareket edebildiği kontaklardır. Yarıiletkenlerin türüne ve iş fonksiyonları durumuna bağlı olarak kontak türleri Çizelge 2.1’ de verilmiştir.

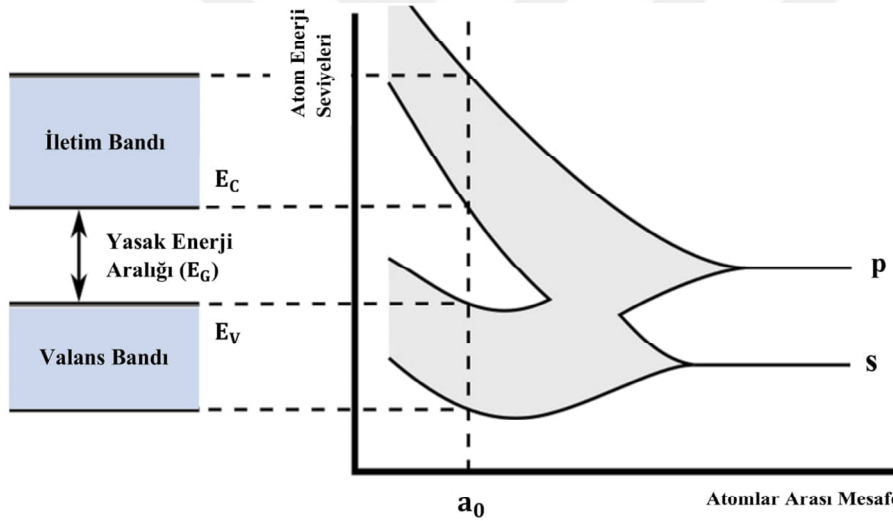
Çizelge 2.1. Metal ve yarıiletkenlerin iş fonksiyonlarına bağlı olarak doğrultucu ve omik kontak oluşumu

Yarıiletken Türü	İş Fonksiyonları Durumu	Kontak Türü
n-tipi	$\Phi_M > \Phi_S$	Doğrultucu
n-tipi	$\Phi_S > \Phi_M$	Omik
p-tipi	$\Phi_S > \Phi_M$	Doğrultucu
p-tipi	$\Phi_M > \Phi_S$	Omik

Metal ve yarıiletkenin kontak edilmesi sırasında kullanılacak olan her tür malzeme yüzeyinin oldukça temiz ve pürüzsüz olması ve bunun yanında kontakların atomik boyutta elde edilmesi istenir. Bu sayede oluşturulan ideal kontaklar sayesinde metal-yarıiletken diyotların karakteristik parametrelerinin daha iyi anlaşılabilmesi sağlanır [35].

2.1.2. Katılarda enerji bant teorisi

Katılarda *enerji bant teorisi*, katıların iletken, yalıtkan ve yarıiletken olma durumlarını açıklar. Katı içerisindeki atomlar birbirine oldukça yakın konumdadırlar ve dolayısıyla elektronların enerji seviyeleri etkileşerek üst üste biner. Bu etkileşme sonucunda da izinli kuantum seviyeleri ayrışır ve izinli enerjilerin bir bandına dönüşür. Şekil 2.2’de enerji bant diyagramı görülmektedir.



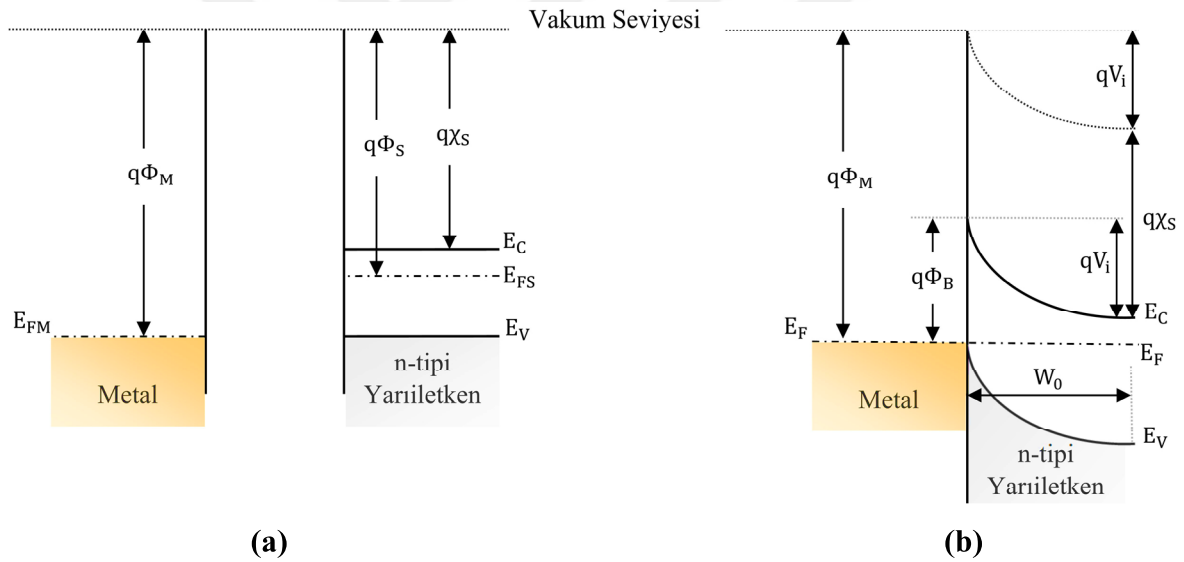
Şekil 2.2. Katılara ait enerji bant diyagramı

Mutlak sıfır sıcaklığında elektronlar tarafından tam dolu olan üst enerji seviyelerinin oluşturduğu banda *valans bandı*, mutlak sıfır sıcaklığının hemen üzerinde elektronların iletme katıldığı ve valans bandından belli bir enerji aralığı (yasak enerji aralığı) ile ayrılmış en üst banda *iletim bandı* denir. *Yasak enerji aralığı* ise kuantum mekaniksel olarak bir kristal yapıda elektronlar tarafından işgal edilemeyecek olan bir enerji aralığıdır. İletkenlerde (metallerde) iletim bandı ile valans bandı iç içedir ve iletim bandı elektronlar tarafından kısmen işgal edilmiştir. Yarıiletkenlerde ise valans bandı elektronlar tarafından tamamen dolu iken iletim bandı, valans bandından yasak enerji aralığı (E_G) ile ayrılmış olup 0 K sıcaklığından itibaren elektronlar tarafından kısmen doludur. Fermi enerji seviyesi

metallerde iletim bandı içerisinde, yarıiletkenlerde ise yarıiletkenin türüne göre valans bandı veya iletim bandına daha yakın enerji seviyelerinde yer alır.

2.1.3 Metal/n-tipi yarıiletken yapılarda Schottky (Doğrultucu) kontaklar

Bir metal ile yarıiletken iş fonksiyonları arasında $\Phi_M > \Phi_S$ ilişkisi olacak şekilde seçilip sıkı kontak edildiğinde oluşan kontak biçimine *doğrultucu kontak* veya *Schottky kontak* denir. Kontak sonrasında yarıiletkenin iletim bandındaki elektronlar, metalin elektronlarına göre daha yüksek enerjiye ve dolayısıyla metale göre daha kararsız seviyeye sahip olduklarından MS yapısının Fermi seviyesi eşitleninceye kadar metale doğru hareket ederler. İdeal durumda bir metal ile n-tipi yarıiletkenin kontak öncesi ve kontak sonrası enerji bant diyagramı Şekil 2.3 de görülmektedir.



Şekil 2.3. Bir metal ile n-tipi bir yarıiletkenin (a) kontak öncesi ve (b) kontak sonrası enerji bant diyagramı (Schottky kontak)

Fermi seviyesinin eşitlenmesiyle *termal denge* durumu oluşurken yarıiletkenin iletim bandının en alt seviyesi (E_C) ile Fermi enerji seviyesi arasındaki ayırım, azalan elektron konsantrasyonu ile artar. Termal denge durumunda Fermi seviyesi sabit kaldığından yarıiletkenin iletim bandı Şekil 2.3 (b) deki gibi bükülür. Metale geçen iletim bandı elektronları arkasında pozitif yüklü donör atomları bırakır ve bu nedenle yarıiletkenin kontak bölgesine yakın tarafında elektronlardan yoksun, yüksek dirençli, yalıtkan ve pozitif yüklü bir bölge oluşur. Bu bölge termal dengede W_0 genişliğinde *tüketim bölgesi* olarak

adlandırılır. Yarıiletkeniden metale geçen elektronlar ince bir negatif yük tabakası oluştururken yarıiletken tarafında kalan pozitif yüklü atomlar ise *pozitif bir uzay yükü bölgesi* oluşturur. Bu durum sonucunda yarıiletkeniden metale doğru (pozitif yüklerden negatif yüklere doğru) bir iç elektrik alan meydana gelir.

Yarıiletkenin yasak enerji aralığı (E_g) metal ile kontak edildiğinde değişmeyeceğinden valans bandı da iletkenlik bandına paralel olarak onunla birlikte bükülür. Bir diğer önemli parametre olan yarıiletkenin elektron yakınlığı (χ_s) da kontak sonrasında değişmez ve buna bağlı olarak vakum seviyesi yine iletim bandına paralel olarak Şekil 2.3 (b) deki gibi bükülür. Bu nedenlerle termal dengede bir metal-yarıiletken yapısı için bariyer yüksekliklerini (Φ_B, V_i) belirleyen en önemli unsur, vakum seviyesinin yapı boyunca sürekli kalması gerektiğidir [4]. O halde termal denge durumunda yapı üzerindeki bant bükülme miktarı, metal ve yarıiletken taraflarındaki vakum seviyesi farkına bir başka ifadeyle iş fonksiyonlarının farkına eşittir. Bu miktar;

$$qV_i = q\phi_M - q\phi_s \quad (2.1)$$

eşitliği ile verilir [4, 8, 13]. Burada qV_i , iletim bandındaki elektronların yarıiletkeniden metale doğru geçebilmeleri için aşmak zorunda oldukları eV mertebesinde enerji miktarıdır ve *engel yüksekliği* veya *bariyer yüksekliği* olarak adlandırılır. V_i , volt birimindedir ve kontak potansiyel farkı veya eklem yerleşik potansiyeli olarak adlandırılır. Öte yandan metal tarafındaki elektronlar için ideal bariyer yüksekliğini yazacak olursak;

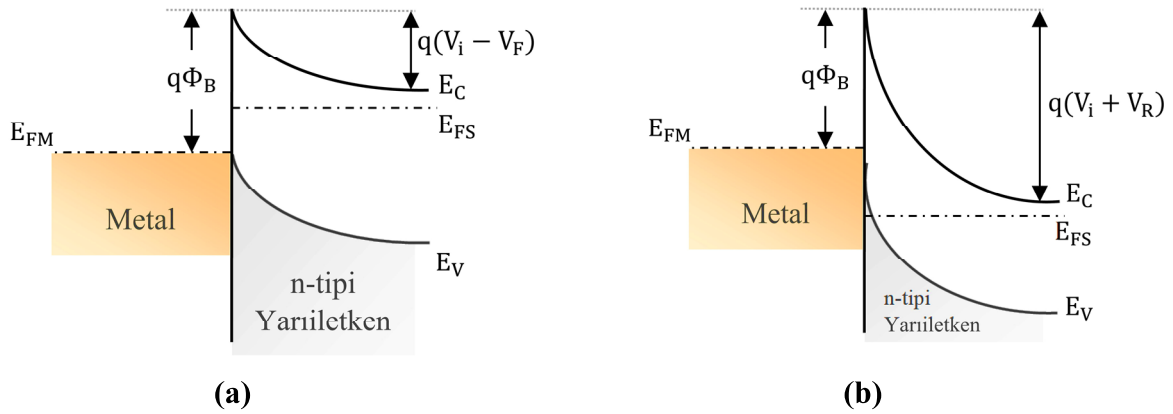
$$q\phi_B = q\phi_M - q\chi_s = qV_i + (E_C - E_F) \quad (2.2)$$

eşitliği ile ifade edilir [4, 8, 13]. Bu eşitlik birbirinden bağımsız olarak Schottky ve Mott tarafından elde edilmiştir [8]. Burada Φ_B , *Schottky engel yüksekliği* olarak bilinir ve yarıiletkenin katkılama yoğunluğuna bağlı olmaksızın sadece metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin elektron yakınlığına bağlıdır. Buna göre Schottky engel yüksekliğini belirlemek adına uygun iş fonksiyonuna sahip metaller kullanmak bu amacı kolaylaştırabilir ancak uygulama aşamasında yani pratikte farklı iş fonksiyonuna sahip metaller kullanarak bu yüksekliği değiştirmek zordur [36].

Çoğu durumda bariyer yüksekliği oda sıcaklığında kT/q değerinden daha büyüktür ve çok az sayıda elektron kazandıkları termal enerji ile bu engeli aşabilir. Termodinamik dengede bir dış gerilim olmaksızın yarıiletken den metale geçen bu elektronların oluşturduğu akım ($I_{M \rightarrow S}$), metalden yarıiletkene geçen elektronların oluşturduğu akım ($I_{S \rightarrow M}$) tarafından dengelenir ve bu durumda toplam net akım sıfır olur. Yapıya bir dış voltaj uygulandığında termal denge durumundaki enerji band diyagramı uygulanan dış gerilimin işaretine ve büyüklüğüne bağlı olarak değişkenlik gösterir ve bu durumda diyot yapısından bir akım geçişi başlamış olur.

Yarıiletken içerisinde oluşan tüketim bölgesi az sayıda hareketli taşıyıcıya sahip olduğundan direnci, metalin ve nötr yarıiletkenin dirençlerine kıyasla oldukça yüksektir ve pratikte yapıya uygulanan dış voltajın neredeyse tümü bu bölge üzerine düşer. Uygulanan dış voltaj, tüketim bölgesi boyunca bariyer potansiyelini arttırarak veya azaltarak değiştirecektir [4].

Eğer Şekil 2.3 (b)' deki yapıya yarıiletken tarafı metale göre negatif uç olacak şekilde bir $V_F > 0$ voltajı uygulanırsa yarıiletken tarafındaki potansiyel engeli V_i ' den $(V_i - V_F)$ ' ye düşer. Şekil 2.4 (a)' de bu durumdaki yeni band diyagramı görülmektedir. Bu voltaj uygulamasına *ileri beslem* veya *doğru beslem* durumu denir. Yarıiletkenin iletim bandındaki elektronlar artık azalmış bir potansiyel engel ile karşılaşır ve sonuç olarak yarıiletken den metale olan elektron akışı termal denge durumundaki değerinin üzerine çıkar. Buna karşın metalden yarıiletkene olan elektron akışı termal denge durumuna göre değişmeyecektir. Çünkü pratikte metal boyunca hiçbir voltaj düşmesi meydana gelmez ve sonuç olarak metal tarafındaki potansiyel engel (Φ_B) V_F 'den etkilenmez. Böylece ileri beslem durumunda yarıiletken den metale net bir elektron akışı vardır ki aynı zamanda metalden yarıiletkene net bir elektrik akımı ($I_{M \rightarrow S}$) meydana gelir.



Şekil 2.4. Metal/n-tipi yarıiletken için (a) ileri (doğru) beslem ve (b) ters beslem altında enerji bant diyagramı

İleri beslem durumunda oluşan net akım uygulanan dış voltaj V_F ile üstel olarak artar ve termiyonik emsiyon teorisine göre bu akım [4];

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_F}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

eşitliği ile verilir. Burada I_0 doyma akımıdır. I net akımı ise pozitifdir.

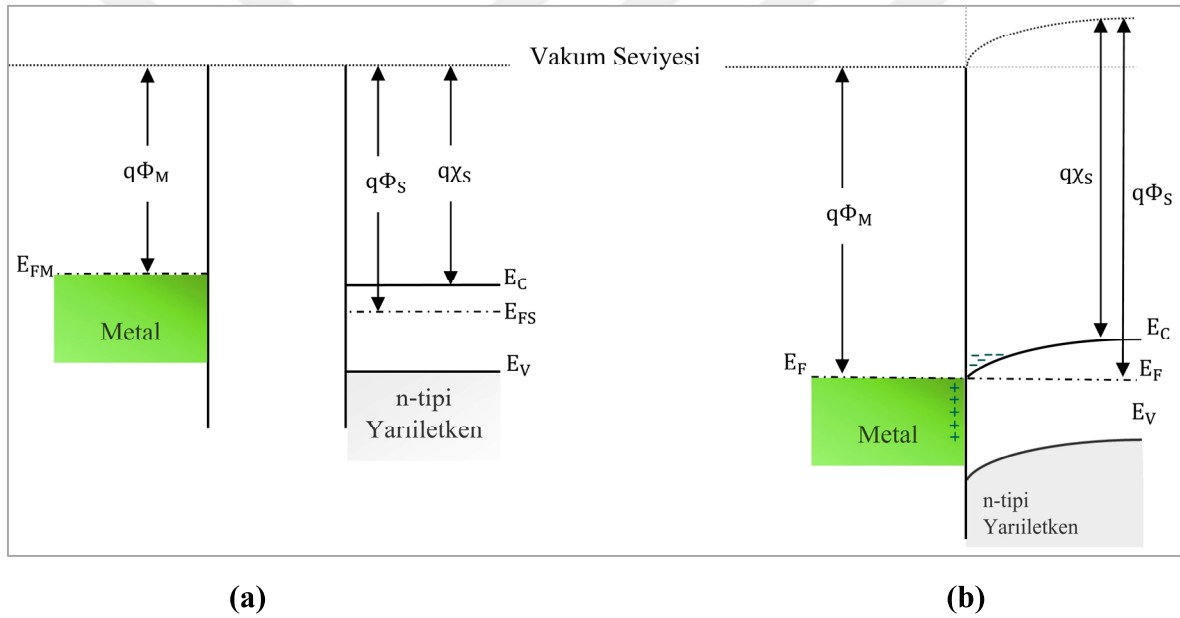
Ters beslem durumunda ise yarıiletkene, metale göre pozitif uç olacak şekilde $V_R < 0$ voltajı uygulanırsa yarıiletken tarafındaki potansiyel engeli V_i ' den $(V_i + V_R)$ ' ye yükselir. Şekil 2.4 (b)' de bu durumdaki yeni bant diyagramı görülmektedir. Bu voltaj uygulamasına *ters beslem* durumu denir. Artan potansiyel engeli nedeniyle yarıiletkenenden metale elektron geçişi azalırken metalden yarıiletkene geçen elektron sayısı yine sabit kalır. Ters beslem durumunda ileri beslem durumuna kıyasla yarıiletkenenden metale çok küçük bir akım meydana gelir ($I_{S \rightarrow M}$) ve bu akıma *sızıntı akımı* denir.

Bir diğer önemli değişim de tüketim bölgesi genişliğinde görülür. Termal denge durumuna göre tüketim bölgesi genişliği (W_0) ileri beslem durumunda azalırken ters beslem durumunda ise artmaktadır. Uygulanan dış voltaja bağlı olarak değişen tüketim bölgesi genişliği, MS yapılar ve ayrıca MIS/MPS yapılar için önemli bir parametre olan kapasitans özelliklerini önemli ölçüde değiştirmektedir [36].

Ayrıca ileri ve ters beslem durumları için verilen enerji bant diyagram şekillerine dikkat edilirse (Şekil 2.4 (a) ve Şekil 2.4 (b)) tek bir Fermi enerji seviyesi olmadığı görülür. Elektronların aktığı bölgedeki Fermi seviyesi, elektronların girdiği bölgedeki Fermi seviyesinden daha yüksektir.

2.1.4 Metal/n-tipi yarıiletken yapılarında omik kontaklar

Bir metal ile bir n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonları $\Phi_S > \Phi_M$ olacak şekilde seçilip sıkı kontak edilirse oluşan bu tür kontaklara *omik kontak* adı verilir. Şekil 2.5 de omik kantağa ait kontak öncesi ve kontak sonrası enerji band diyagramı görülmektedir.

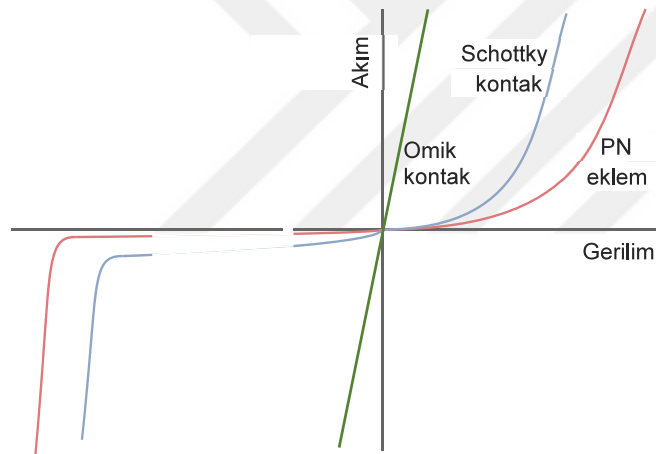


Şekil 2.5. Bir metal ile n-tipi bir yarıiletkenin (a) kontak öncesi ve (b) kontak sonrası enerji bant diyagramı (omik kontak)

Kontak sağlandıktan sonra metal elektronları yarıiletkenin iletim bandına doğru akarak metalin kontak bölgesinde pozitif, yarıiletken yüzeyinde ise negatif yük birikmesine neden olur. Bu durum Şekil 2.5. (b) de görülmektedir. Yapı termal dengeye ulaştığında Fermi seviyeleri eşitlenir ve yarıiletkenin Fermi seviyesi $(\Phi_S - \Phi_M)$ kadar yükselir. Yarıiletkendeki yığılma tabakası yükü Debye uzunluğu mertebesinde bir bölgede sınırlıdır ve aslında bir yüzey yüküdür. Metaldeki elektron konsantrasyonu çok büyük olduğundan metal taraftaki pozitif yük birikmesi de aynı zamanda bir yüzey yüküdür [4]. Dolayısıyla yarıiletkende bir uzay yükü bölgesi veya bir tüketim bölgesi oluşmaz ve metalden

yarıiletkenle veya yarıiletkenden metale elektron akışı için bir potansiyel engeli olmadığı açıktır.

Yapıya bir dış voltaj uygulandığında bu voltaj, tüketim bölgesi oluşmadığı için kontak bölgesinde değil yarıiletken boyunca dağılacaktır. Metal kısmına pozitif, yarıiletken kısmına da negatif bir voltaj uygulanırsa yarıiletkenden metale doğru akan elektronlar için bir engel yoktur ve elektronlar bu yönde kolayca hareket edebilir. Ters durumda ise metal elektronları için çok küçük bir engel yüksekliği söz konusudur ve bu durumda da elektronlar iletim bandına çok kolay akabilir. Böylece bu kontak durumunda akım her iki yönde kolayca oluşur [4]. Schottky (doğrultucu) kontaklarda akım-gerilim karakteristiği lineer olmayan yapıda iken omik kontaklarda bu durum lineer yapılıdır. Şekil 2.6.'da kontakların akım-gerilim grafikleri görülmektedir.



Şekil 2.6. Schottky kontak, omik kontak ve PN eklem için akım-gerilim grafiği

Omik kontaklar genelde doğrusal veya yarı doğrusal akım-gerilim özelliklerine sahiptir ancak bu özelliklere sahip olması gerekli değildir. Kontaklar, gerekli yapı akımını sağlayabilmeli ve dolayısıyla bu kontak durumundaki voltaj düşüşü Schottky kontaklardakine göre çok daha düşük olmalıdır [36].

2.2 Schottky Teoremi Üzerine Yapılan Düzenlemeler

Çeşitli etkiler Schottky bariyer yüksekliğinin teorik olarak verilen (Eş. 2.1) değerinden farklılaşmasına neden olur ve pratik uygulamalarda metal-yarıiletken kontaklar yukarıda

bahsedilen durumlara pek uymazlar. Bu başlık altında bu etkilerden bazılarına değinmeye çalışalım.

2.2.1 Hayali kuvvet etkisiyle Schottky bariyer düşmesi (Hayali Schottky)

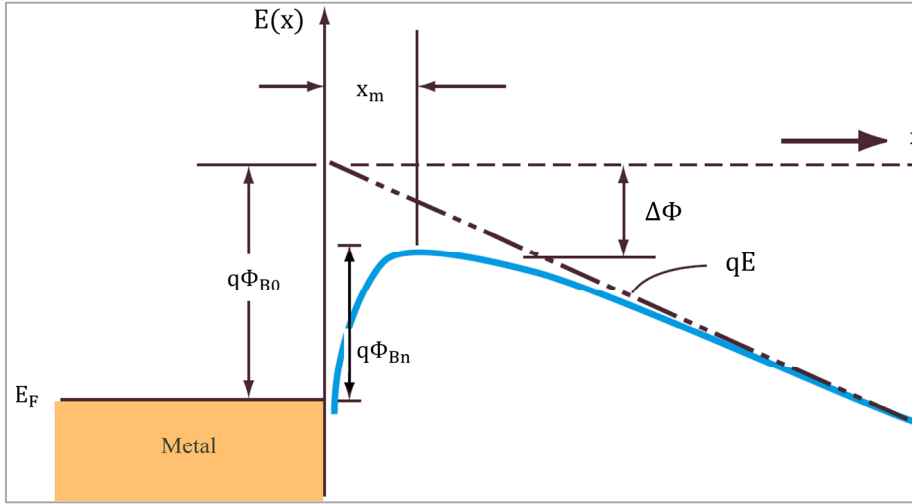
Bu tür etkilerden biri görüntü (hayali) yüklerin oluşturduğu kuvvetlerden dolayı bariyer potansiyel düşüşüdür. Bu durum hayali kuvvetlerin etkisi veya Schottky etkisi olarak bilinir. Bir metal-vakum sistemi düşünelim. Metalden x kadar uzaklıkta bir elektronun ($-q$) varlığında metalin yüzeyinde bir pozitif $+q$ yükü indüklenir. Bu elektron ile indüklenen pozitif yük arasındaki çekim kuvveti, elektron ile metal yüzeyinden $-x$ kadarlık konumda bulunan bir $+q$ yükü ile arasında var olacak olan kuvvete eşittir. Bu $-x$ konumunda bulunduğunu varsaydığımız pozitif yüke *görüntü yük* veya *hayali yük* denir. Bu yükler arasında oluşan etkileşim kuvveti bir diğer ismiyle *hayali kuvvet*, bir Coulomb kuvvetidir.

$$F = \frac{-q^2}{4\pi\epsilon_0(2x)^2} = \frac{-q^2}{16\pi\epsilon_0x^2} \quad (2.4)$$

Eşitliği ile verilen bu kuvvet için ϵ_0 , boşluğun elektriksel geçirgenliğidir. Bu görüntü yükün oluşturduğu elektrik alan (E) üzerinden mesafenin bir fonksiyonu olarak potansiyel enerji;

$$q\phi(x) = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0x} + q|E|x \quad (2.5)$$

ile verilir. Bu değer enerjinin maksimum değeridir. Şekil 2.7 de sabit bir elektrik alan varlığında ve hayali kuvvetlerinin etkisiyle bariyer potansiyelindeki düşüş görülmektedir.



Şekil 2.7. Sabit bir elektrik alan varlığında hayali kuvvetten dolayı potansiyel engel düşüşü

Hayali kuvvet etkisi (Schottky etkisi) sonucunda bariyer potansiyel düşüşü, $\Delta\Phi$ ve maksimum bariyer konumu, x_m , toplam potansiyelin türevi sıfır olacağından;

$$\frac{d[q\phi(x)]}{dx} = 0 \quad (2.6)$$

sınır şartından bulunabilir.

$$\frac{d[q\phi(x)]}{dx} = \frac{d}{dx} \left\{ q \left(\frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x} + q|E|x \right) \right\}_{x=x_m} = 0 \quad (2.7)$$

$$-\frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x_m^2} + qE = 0 \quad (2.8)$$

Buradan potansiyel engelin maksimum konumu elde edilebilir. Sonuçlar yazılmadan önce bir metal-yarıiletken sistemi düşünecek olursak elektrik alan, arayüzeyde uygun bir elektrik alanla, boşluğun elektriksel geçirgenliği yarıiletkenin elektriksel geçirgenliği ile değiştirilmelidir.

$$x_m = \sqrt{\frac{q}{16\pi\epsilon_s E_m}} \quad (2.9)$$

Elde edilen x_m değeri Eş. 2.5' de yerine yazılırsa Schottky etkisinden ötürü bariyer potansiyel düşüşü;

$$\Delta\phi = \sqrt{\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s}} \quad (2.10)$$

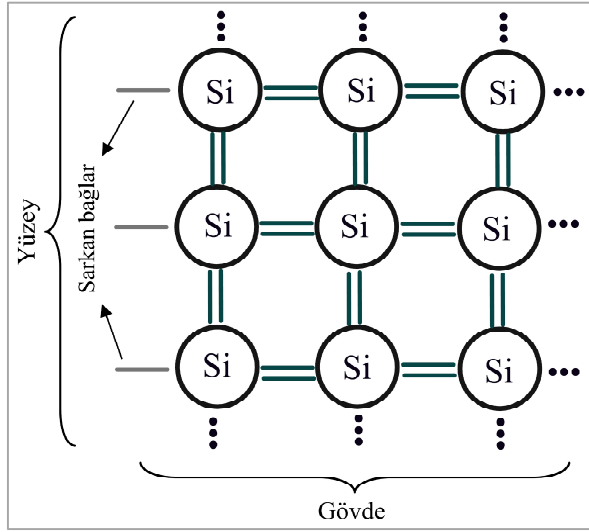
eşitliği ile verilir [4, 13, 38].

Schottky bariyer düşüşü küçük bir değer gibi görünse de bariyer yüksekliği ve bariyer düşüşü akım-gerilim ilişkisinde üstel terimlerde ortaya çıkacaktır. Dolayısıyla bariyer yüksekliğindeki küçük bir değişim diyot üzerinde oluşan akımda önemli bir etkiye sahip olabilir [38].

2.2.2 Arayüzey durumları

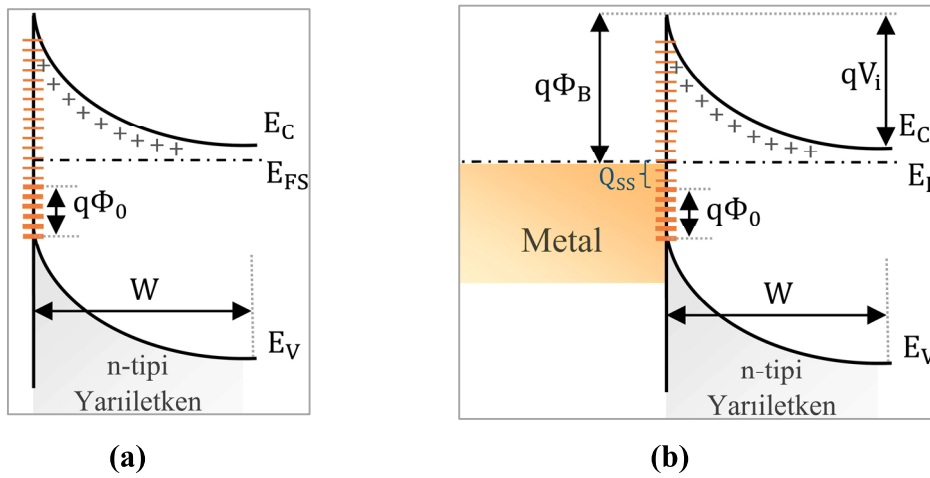
Özellikle Eş. 2.1 bariyer yüksekliğinin (Φ_B) metalin iş fonksiyonu ile doğrusal olarak arttığını göstermektedir. Bariyer yüksekliğinin Φ_M 'ye güçlü bağıllığı çoğunlukta iyonik yarıiletken yapılarda gözlenir. Birçok kovalent bağlı yarıiletken yapılarda (Si, Ge, GaAs vb.) bariyer yüksekliği, Eş. 2.1'deki metalin iş fonksiyonuna daha az bağlıdır ve bazı durumlarda Φ_M 'den neredeyse bağımsızdır [4].

Bu durum ilk olarak, bariyer yüksekliğinin belirlenmesinde arayüzey durumlarının (*surface states*) önemine işaret eden Bardeen tarafından açıklanmıştır [4, 37]. Bir yarıiletkenin kristal örgü yapısının periyodikliği, yüzeyinde (vakum seviyesinde) son bulur. Kovalent bağ yapılı bir yarıiletken kristalde (SiC vb.) yüzey atomlarının yalnızca yarıiletken tarafında kalan kısmında bağ yapabileceği komşu atomlar vardır. Yüzeyinde ise bağ yapabileceği bir komşu atomu bulunmaz. Bu nedenle vakum seviyesindeki yüzey atomlarının her biri için içinde yalnızca bir elektronun olduğu dolayısıyla bir elektronunun eksik olduğu kırık kovalent bağlar oluşur. Bu bağlar, *sarkan bağlar* olarak isimlendirilir. Şekil 2.8 de bu durumu temsil eden bir diyagram görülmektedir.



Şekil 2.8. Si kristali için kırık kovalent bağlar (sarkan bağlar)

Sarkan bağlar, yarıiletkenin yasak enerji aralığı boyunca uzanan ve yapı içerisindeki elektronların kolayca yerleşebileceği lokalize enerji durumlarının oluşmasına yol açar. Bu durumlar, *arayüzey durumları* veya *arayüzey tuzakları* olarak adlandırılır. Arayüzey durumları nötr bir Φ_0 seviyesi ile karakterize edilir. Bu nötr seviyenin konumu, yarıiletkende bant bükülmesi olmadığında arayüzey durumlarının elektronlar tarafından işgal edilerek yüzeyi nötr hale getireceği şekildedir. Yarıiletkende oluşan arayüzey durumlarının veya tuzaklarının bir metalle kontak öncesi ve sonrası oluşan enerji bant diyagramı Şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.9. n-tipi bir Yarıiletkende oluşan arayüzey durumlarının varlığında (a) kontak öncesi ve (b) kontak sonrası enerji bant diyagramı

Oluşan bu nötral bölgenin (Φ_0) altındaki enerji seviyeleri verici enerji seviyeleri gibi davranır. Buna karşın Φ_0 'ın üzerindeki enerji seviyeleri ise alıcı enerji seviyeleri gibi davranır. Arayüzey durumlarının varlığı tüketim bölgesindeki yükü değiştirir ve böylece bariyer yüksekliğini etkiler. Metal ile yarıiletken kontak edilmediğinde dahi yarıiletkenden gelen elektronlar nötral seviyenin üzerindeki arayüzey durumlarını işgal eder. Bir başka ifadeyle elektronlar bu seviyelerde tuzaklanır. Bu durum sonucunda yarıiletken yüzeyi negatif yüklü hale gelir ve bu yükler yüzey yükü biçimindedir (Q_{ss})(Şekil 2.9 (a)).

Bir metal ile n-tipi bir yarıiletken sıkı kontak edildiğinde ve bant bükülmesi oluştuğunda Fermi seviyesi üzerinde olan arayüzey durumları iletim bandında doğru sıkışır ve bu esnada tuzaklanmış olan bazı elektronlar iletim bandına, oradan da metale geçiş yapar. Bu süreç sistem termal dengeye ulaşınca kadar yani Fermi seviyesi sistem boyunca tek bir seviyeye gelene kadar devam eder (Şekil 2.9 (b)). Eğer arayüzey durumlarının yoğunluğu çok büyük ise E_F 'deki çok küçük değişime karşın çok sayıda yük alışverişi metal ile arayüzey durumları arasında gerçekleşir ve yarıiletkendeki uzay yükü neredeyse hiç etkilenmeden kalır [4].

Sonuç olarak Şekil 2.9 (b) durumu için bariyer yüksekliği, metalin iş fonksiyonundan bağımsız olarak;

$$q\phi_B = (E_g - q\phi_0) \quad (2.11)$$

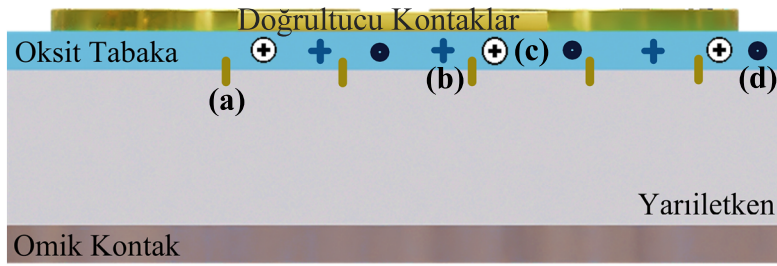
eşitliği ile verilir. Bu durumda bariyer yüksekliğinin ve Fermi seviyesinin arayüzey durumları tarafından sabitlendiği söylenebilir ve bu sabitlenmeye *Fermi seviyesi sabitlenmesi* denir.

Arayüzey durumları dört farklı grupta sınıflandırılabilir ve Şekil 2.10' da bu durumlar temsili olarak gösterilmektedir. Bunlar [13, 36, 39];

- a. *Arayüzey tuzak yükleri*: Arayüzeyde yarıiletkenin yasak enerji aralığında tuzaklanmış yüklerdir. Bu yükler; yapısal bozukluklar, oksidasyon kaynaklı kusurlar, metal kirlilikleri veya radyasyona bağlı olarak oluşan pozitif veya negatif yüklerdir. Arayüzey tuzakları, arayüzey üzerine düşen voltaja bağlı olarak yüklenip boşalabilir.
- b. *Sabit oksit yükler*: Arayüzeye yakın veya arayüzeyde sabit olan pozitif yüklerdir. Bu yük yoğunluğu oksidasyon süreci ile ilişkili olarak ortama, sıcaklığa, soğutma koşullarına ve

silikon yönelimine bağlıdır. Uygulanan dış gerilimden ve dolayısıyla elektrik alandan bağımsız olarak genelde hareketsiz yüklerdir.

- c. *Hareketli iyonik yükler*: Bu yükler genelde iyonik safsızlıkların (Na^+ , H^+ vb.) neden olduğu yüklerdir. Oksit yapının kendisinden dolayı veya metal-yalıtkan /yalıtkan-yarıiletken arayüzeyi içerisinde tuzaklanmış ve genellikle üretim sürecinde oluşurlar.
- d. *Tuzaklanmış oksit yükler*: Bu pozitif veya negatif yükler de oksit yapı içerisine dağılmış olarak tuzaklanmış elektron veya deşiklerden kaynaklanabilir. Yüksek enerjili radyasyondan (X-ışınları gibi.) veya enjeksiyon aşamalarından kaynaklı oluşabilirler.



Şekil 2.10. Bir MIS/MOS kesitinde yarıiletken/oksit tabaka bulunan arayüzey durumları

Arayüzey durumları veya arayüzeyde tuzaklanmış bu yükler, MOS, MIS veya MPS yapılarının ideal durumdan sapmalarına, elektriksel ve kapasitans özelliklerinin ciddi oranda değişmesine yol açmaktadır [13].

Bu durumlardan bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir [35];

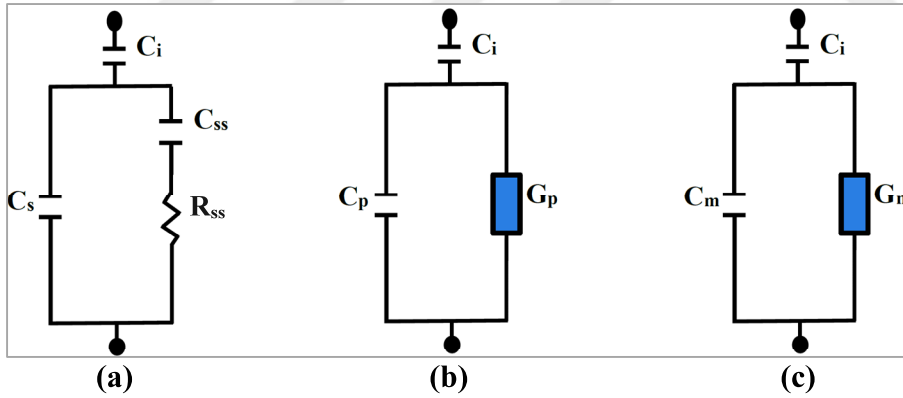
- X-ışınlarına maruz kalma neticesinde yapıda meydana gelen iyonize olmuş tuzaklar,
- Yarıiletkenin gövde kısmında veya arayüzeyde yer alan ve yasak enerji aralığında (E_g) izinli seviyeler gibi davranmaları,
- Yarıiletken yüzeyinde veya yakınında yer etmiş ve uygulanan dış voltajdan etkilenmeden neredeyse hareketsiz kalan sabit oksit yükleri.

MOS/MIS/MPS yapılarda arayüzey durumlarının ölçümü ve karakterizasyonu ile ilgili farklı yöntemler vardır. Bunlardan biri, nispeten daha düşük arayüzey durum yoğunluğuna sahip MOS kapasitörler için daha doğru bir sonuç veren ve hızlı bir değerlendirme sağlayan, Nicollian ve Goetzberger tarafından geliştirilen İletkenlik Yöntemi (Conductance Method)'dir [13, 40].

İletkenlik Yöntemi (Conductance Method)

Bu yöntem ilk olarak ilk olarak Nicollian ve Goetzberger tarafından geliştirilmiştir [40]. Arayüzey durum yoğunluklarının (D_{it}) belirlenmesinde en etkili yöntemlerden biridir. Arayüzey durum yoğunluklarının $10^9 \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ ve daha düşük olduğu durumlarda ölçümler yapılabilir. Aynı zamanda tüketim bölgesi ve bant aralığının bir parçası olan zayıf terslenim bölgesindeki durum yoğunlukları ile yüzey potansiyel dalgalanmaları hakkında bilgiler veren en eksiksiz yöntemdir [36].

Bu yöntem, ön gerilim ve frekansın bir fonksiyonu olarak bir MOS kapasitör yapının eşdeğer paralel iletkenliğini (G_p) ölçme temeline dayanır. MOS yapılarının ölçülen kapasitans (C_m) ve iletkenlik (G_m) ölçümleri üzerinden sonuçlar elde edilir. Arayüzeyde tuzaklanan yükler ve taşıyıcı emisyonları nedeniyle akım iletim mekanizmasındaki kayıpları temsil eden iletkenlik, arayüzey tuzakları yoğunluğunun bir ölçüsüdür [36]. İletkenlik yöntemine uygun, MOS kapasitör için basitleştirilmiş bir eşdeğer devre Şekil 2.11’de görülmektedir.



Şekil 2.11. İletkenlik yöntemi için eşdeğer devreler; (a) standart MOS kapasitör devresi, (b) MOS kapasitörün basit devresi, (c) ölçülen sistem devresi

Burada $C_i(C_{ox})$ yalıtkan veya oksit tabakanın kapasitansı, C_s yarıiletken kapasitansı, C_{ss} arayüzey durumların kapasitansı ve R_{ss} ise arayüzey tuzakların yük taşıyıcıları yakalayıp yayarken oluşturduğu kayıp mekanizmayı temsil eden dirençtir. Şekil 2.11 (a)’daki devrenin, C_p ve G_p değerlerini verdiği için Şekil 2.11 (b) devresiyle değiştirilmesi uygundur ve böylece;

$$C_p = C_s + \frac{C_{ss}}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (2.12)$$

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{q\omega\tau N_{ss}}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (2.13)$$

eşitlikleri yazılabilir. Burada $C_{ss} = q^2 N_{ss}$, $\tau = R_{ss} C_{ss}$ ve $\omega = 2\pi f$ dir. (τ , arayüzey tuzakların zaman sabiti ve f , ölçülen frekanstır.) Eş. 2.12 ve Eş. 2.13 bant aralığında tek bir enerji seviyesine sahip arayüzey tuzaklar için geçerlidir. Ancak arayüzey tuzakları oksit/yalıtkan/polimer tabakada yarıiletken bant aralığı boyunca sürekli bir enerji dağılımına sahiptir. Arayüzeyde tuzaklanan yükler için yakalanma ve salınma Fermi seviyesinin birkaç kT/q üzerinde veya altında meydana gelir. Bu durum zaman sabitinin (τ) dağılımına yol açar ve sonuç olarak normalize edilmiş iletkenlik;

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{qN_{ss}}{2\omega\tau_{it}} \ln \left[1 + (\omega\tau_{it})^2 \right] \quad (2.14)$$

eşitliği ile verilir [36]. İletkenlik frekansın bir fonksiyonu olarak ölçülür ve ölçümler $G/\omega - \omega$ veya $G_p/\omega - f$ grafiği olarak çizilir ve yorumlanır. Bu grafiklerden G_p/ω değerinin maksimum olduğu noktadan N_{ss} değeri, x-eksenindeki tepe iletkenlik konumundan ise τ_{it} değeri hesaplanabilir. Eş. 2.14'de G_p/ω 'nın maksimum değeri için $\omega \approx 2/\tau_{it}$ ve

$$N_{ss} = \frac{G_p/\omega}{0.402qA} \text{ olarak bulunur [36].}$$

Kapasitans ve iletkenlik ölçümlerinde ölçüm cihazları Şekil 2.11 (c)'deki gibi ölçülen yapının paralel C_m ve G_m kombinasyonlarından oluştuğu varsayar. Bu yüzden Şekil 2.11 (b)'deki devre yerine Şekil 2.11 (c)'deki baz alarak G_p/ω değerini, ölçülen kapasitans C_m , oksit/yalıtkan kapasitans C_{ox} ve ölçülen iletkenlik G_m cinsinden;

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{\omega G_m C_{ox}^2}{G_m^2 + \omega^2 (C_{ox} - C_m)^2} \quad (2.15)$$

eşitliği ile yazabiliriz. Burada, iletkenlik ölçümü geniş bir frekans aralığında gerçekleştirilmelidir. Ölçüm sıklığı doğru bir şekilde belirlenmelidir. Sinyal frekansı

harmoniklerinin yapay iletkenliklere yol açmasını önlemek için sinyal genliği yaklaşık 50 mV veya altında tutulmalıdır [36]. Bununla birlikte ince oksit yapılı MOS ya da MIS/MPS yapılı diyotlar için belli bir sızıntı akımından bahsedilebilir. Ayrıca yapıda özellikle yüksek frekanslarda etkili olan bir seri direnç etkisinden de söz edilebilir. Bu direnç diyot performansını önemli şekilde etkiler.

2.2.3. Seri direnç etkisi (R_S)

Yarıiletken cihazların ve devrelerin performansları seri (R_S) ve şönt (shunt) direncine, cihazın yapısına, cihazdan geçen akıma ve diğer birçok parametreye bağlı olarak değişir. Metal-yarıiletken (MS) Schottky kontaklarda yarıiletkenin gövde kısmının yani tüketim bölgesi haricindeki nötral bölgenin devre akımına karşı gösterdiği dirence *seri direnç* (*serial resistance*, R_S) denir. Ayrıca seri direnç, kontakların direncine ve bazen de geometrik faktörlere bağlıdır. Schottky diyotların seri direnci, idealite faktörü (n) ve I_{min} değerlerinden hesaplanır [36]. Ancak bu tez kapsamında I-V ölçümleri incelenmediği için bu hesaplamalara değinilmeyecektir.

MOS/MIS yapılarda seri direnç, arayüzey özelliklerinin ve katkılama profillerinin giriş ölçümlerinden elde edilmesinde ciddi hatalara neden olabilir. Bu hatalardan kaçınmak için numune imalatı sırasında mümkün mertebe yabancı atom içermeyen yapılar oluşturularak veya yüksek frekanslarda ölçümler yaparak seri direnç etkisi ihmal edilebilir düzeye ya da en düşük değerine indirilebilir. Seri direnç, beş farklı etkiden kaynaklanabilir ve bu etkiler şu şekilde sıralanabilir [41];

- Kontakten ölçüm alınırken giriş kısmında prob kablosu kullanmak,
- Yarıiletkene yapılmış olan arka omik kontak,
- Yarıiletken ile omik kontak arasında, kontak esnasında veya öncesinde oluşabilecek olan kirlilikler,
- Yarıiletkenin arka kontak ile tüketim bölgesi kenarı arasında kalan nötral gövde kısmı direnci,
- Yarıiletkendeki son derece düzensiz katkı atomlarının dağılımı.

Seri direncin ölçümü ve hesaplanması için Şekil 2.11 (a)'daki devrenin çıkışında bir R_S seri direnci düşünelim. Seri direnç hem kapasitans hem de paralel kondüktans ölçümlerinde

ölçümlerin ideal durumlarından sapmasına yol açabilir. Bu sapmalar özellikle uygulanan voltaja ve frekansa bağlıdır. Belli bir frekans değerinde bu etkinin en belirgin olarak meydana geldiği yer *güçlü yığılma* bölgesidir. Bu yüzden R_S 'yi belirlemek için MOS yapıya güçlü yığılma bölgesi oluşuncaya dek öngerilim uygulanır [41]. Bölüm 2.4'de seri direnç hesaplamalarına yer verilmiştir.

2.2.4. Hareketli iyonlar/yükler

Metal-yarıiletken yapıların yüzey özellikleri, üretim veya yapının çalışması sırasında çevreden kaynaklı küçük miktardaki kirlenmelerden önemli ölçüde etkilenir. Temel olarak bu kirleticiler Na^+ , Li^+ , K^+ gibi iyonlardır. Yapıya bir gerilim uygulandığında, yapı yüzeyi boyunca bu iyonlar nedeniyle bir yük akışı meydana gelir. Bu iyonik yüklerin varlığında metal-yarıiletken cihaz özelliklerinin kontrolsüz bir şekilde değişebileceği görülmüştür [41].

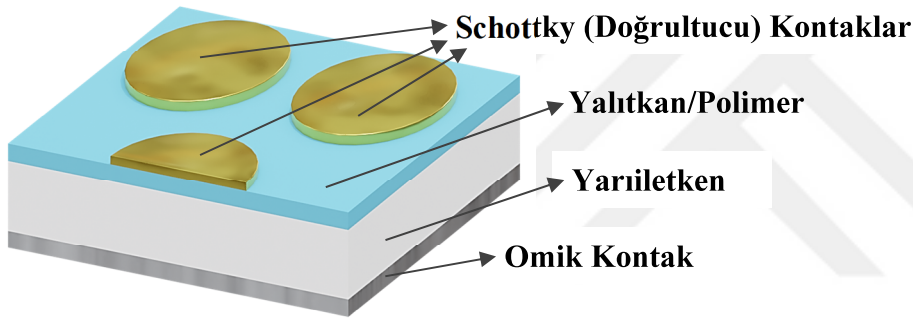
2.2.5. Tünelleme mekanizması

Bir yarıiletkenin yüksek katkılanması durumunda ve özellikle düşük sıcaklıklarda tüketim bölgesinin genişliği giderek azalır. Bu durumda yarıiletkendeki elektronlar iletim bandından metale engeli tamamen aşmadan, engel içerisinden direk geçiş yapabilirler. Bu olaya *tünelleme* denir. Bu durum metalden yarıiletkene geçen elektronlarda da görülebilir. Ayrıca bir metal ile n-tipi yarıiletken kontak edilip Şekil 2.4 (b)'deki gibi yapıya ters bir V_R gerilimi uygulanırsa tüketim bölgesinin genişliği, uygulanan bu voltaja bağlı olarak da azalır. Bu durumda yine her iki yönde (metalden yarıiletkene, yarıiletkenden metale) tünelleme sonucunda geçen elektronların sayısı atar. Öyle ki tüketim bölgesinin genişliği angström (Å) mertebesinde daralabilir ve bu neticede tünelleme akımı baskın akım mekanizması haline gelebilir [38]. Tünelleme, *Termiyonik Alan Emisyonu (Thermionic Field Emission)* (TFE) ve/veya *Alan Emisyonu (Field Emission)* (FE) olarak da adlandırılır. Tünelleme sonucunda hareket eden elektronlardan dolayı Schottky yapıların elektriksel özelliklerinde ideal durumlara kıyasla bozulmalar meydana gelir.

2.3 İdeal Metal-Yalıtkan/Polimer-Yarıiletken (MIS/MPS) Yapılar

Tüm yarıiletken cihazların güvenilirliği ve kararlılığındaki birçok problem, yüzey koşulları ile yakından ilişkilidir. Bu sebeple bu bölümde ele alınacak olan ideal metal-yalıtkan-

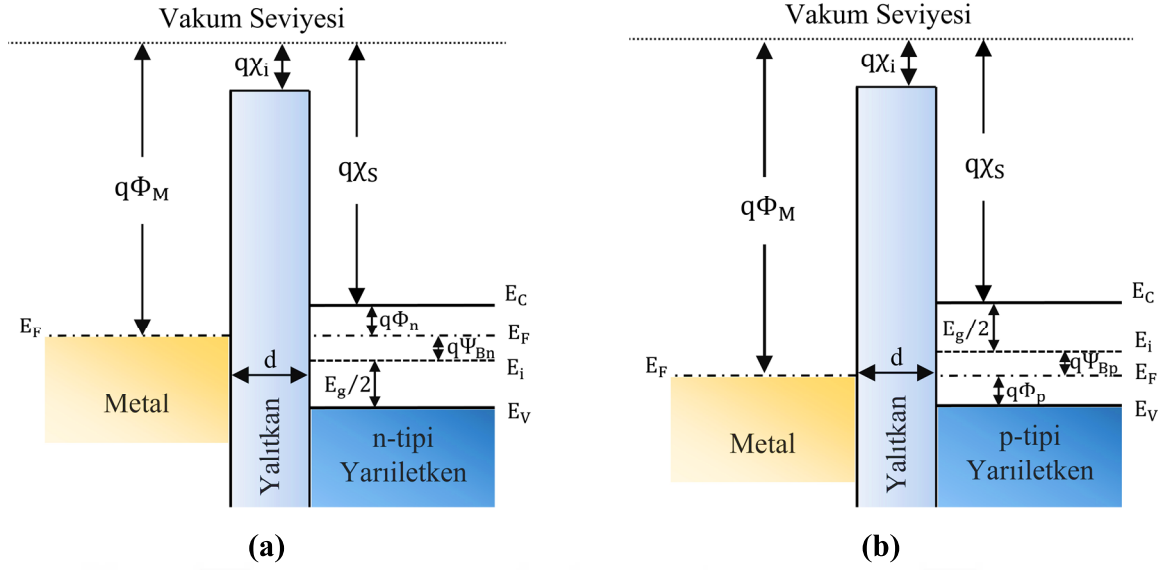
yarıiletken (metal-insulator-semiconductor, (MIS)) veya metal-polimer-yarıiletken (metal-polymer-semiconductor, (MPS)) yapılar, bu yapıların yüzey fiziğinin ve pratik cihaz işlevlerinin anlaşılması adına büyük önem taşımaktadır [13]. Bir MIS/MPS yapı en yaygın olarak yarıiletken ile metal yüzeyleri arasına farklı tekniklerle belli özelliklere sahip bir yalıtkan malzemenin yerleştirilmesi ile elde edilir. Bu tür MIS/MPS yapılarda anahtar bileşen işte bu yalıtkan malzemelerdir. Bu nedenle, minimum sızıntı akımı sağlayacak ve yüzey ile uyumlu optimize edilmiş termal ve kimyasal özelliklere sahip, yüksek dielektrik sabitli, kontrol edilebilir akım-iletim mekanizması gerçekleştirilmiş ve doğrultucu özelliğe yaklaşacak nitelikte yalıtım katmanları üretmek için büyük araştırma çabaları yapılmıştır [42]. Günümüzde de bu çalışmalar tüm hızıyla devam etmektedir. Şekil 2.12’ de bir MIS/MPS yapısına ait şematik diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.12. Basit bir MIS/MPS yapısının şematik gösterimi

İdeal bir MIS/MPS yapı, şu özelliklere sahip olmalıdır [13];

- Herhangi bir polarlama koşulu altında yapıda bulunabilecek yükler, yarıiletkende ve yalıtkana bitişik metal yüzeyinde eşit fakat zıt işaretli olan yüklerdir. Bir başka ifadeyle yapı içerisinde arayüzey tuzak yükü veya oksit yükleri yoktur.
- DC gerilim uygulamaları altında yalıtkan yapı üzerinde bir taşıyıcı akımı yoktur ve yalıtkan direnci sonsuzdur. Ayrıca dış voltaj yokken ($V = 0$) metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin iş fonksiyonu arasındaki fark (Φ_{ms}), Fermi enerji seviyesinin yapı boyunca termal dengede sabit olması gerektiğinden sıfırdır.



Şekil 2.13. Thermal dengede ($V = 0$) ideal bir MIS yapının enerji bant diyagramı, (a) n-tipi yarıiletken, (b) p-tipi yarıiletken

Şekil 2.13’de herhangi bir dış gerilim olmaksızın yani termal denge durumunda hem n-tipi hem de p-tipi bir MIS yapının enerji bant diyagramı görülmektedir. Bu diyagramlardan yararlanarak termal dengede $\Phi_{ms} = 0$ olmasından dolayı;

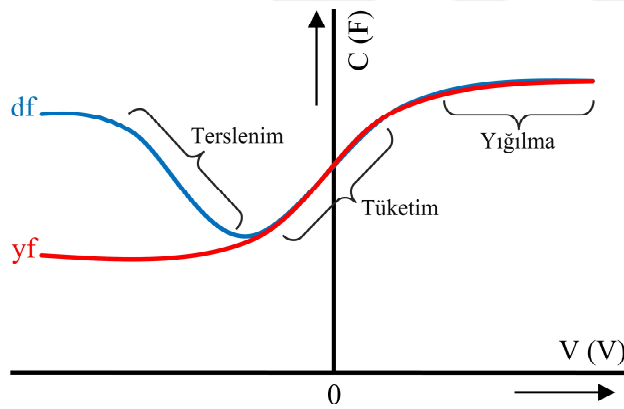
$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi_s + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bn} \right) = \phi_m - (\chi_s + \phi_n) = 0 \quad (\text{n-tipi}) \quad (2.16)$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi_s + \frac{E_g}{2q} + \psi_{Bp} \right) = \phi_m - \left(\chi_s + \frac{E_g}{q} - \phi_p \right) = 0 \quad (\text{p-tipi}) \quad (2.17)$$

eşitlikleri elde edilir. Burada Ψ_{Bn} ve Ψ_{Bp} , saf Fermi enerji seviyesi (E_i) ile Fermi enerji seviyesi arasındaki potansiyel farktır. Φ_n , n-tipi yarıiletken için iletim bandı en alt seviyesi ile Fermi enerji seviyesi arasındaki potansiyel fark, Φ_p ise p-tipi yarıiletken için Fermi enerji seviyesi ile valans bandı en üst seviyesi arasındaki potansiyel farktır. Bir MIS/MPS yapı, genellikle farklı yöntemlerle büyütülmüş yalıtkan/polimer tabakadan, vakum altında büyütülmüş uygun bir metal doğrultucu kontakten ve bir yarıiletken alt katman ile ona uygun olarak ilave edilmiş omik bir metal kontakten oluşur (Şekil 2.14). Bu tür yapılarda, yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde uzay yükü bölgesi oluşurken metal-yalıtkan tarafında ise yüzey yükleri oluşur ve bu oluşumdan dolayı yapıda bir dipol tabaka meydana gelir. Metal ile yarıiletken arasında var olan yalıtkan tabakadan ötürü de bu yapılar bir kondansatör gibi

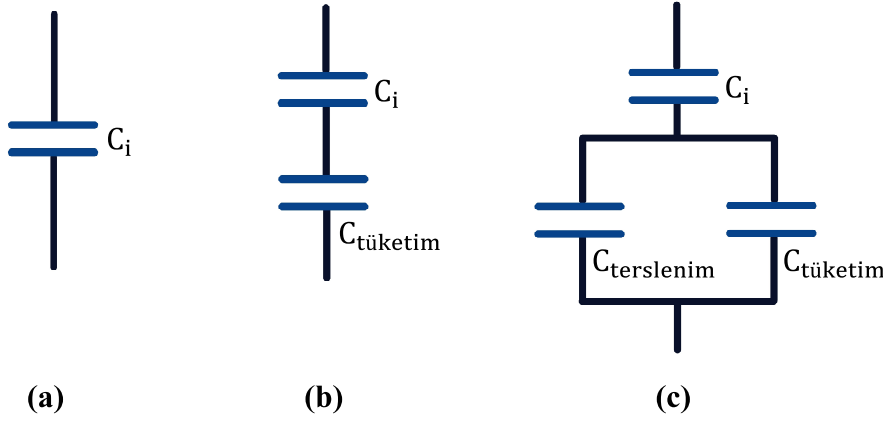
tüketim bölgesinin genişliğini değiştireceği için bu bölgedeki uzay yük yoğunluğu da değişecektir. Ayrıca yine harici olarak yapıya uygulanan ac sinyalin frekansına bağlı olarak tüketim bölgesinin yük konsantrasyonu, özellikle arayüzey durumlarının bu frekansı takip edebilme yeteneğine göre değişir. Bu sebeplerle bir MIS/MPS yapının kapasitansı özellikle yarıiletken kapasitansına bağlı olarak değişkenlik gösterir. [13].

Yapıya bir dış voltaj uygulanmadığında yani termal dengede yarıiletkenin enerji bant yapısı Şekil 2.13’de görüldüğü gibi yassı durumdadır. Yarıiletken bant diyagramının düz olması henüz yapıda harici bir yük birikmesi olmadığı anlamına gelir. İdeal bir MIS yapısına harici bir voltaj uygulandığında temel olarak yarıiletken yapı yüzeyinde uygulanan voltajın büyüklüğüne ve polarizasyonuna bağlı olarak üç temel durum meydana gelebilir [13]. Yapının C-V eğrisinde bu duruma karşılık gelen bölgeler; *terslenim bölgesi*, *tüketim bölgesi* ve *yığılma bölgesi* olarak adlandırılır.



Şekil 2.15. Uygulanan giriş voltajına bağlı olarak n-tipi bir MIS yapıya ait C-V eğrisi

Bu bölgeler, n-tipi bir MIS/MPS yapısı için düşük frekans (df) ve yüksek frekansta (yf) oluşan C-V eğrileri üzerinde Şekil 2.15’de gösterilmiştir. Ayrıca bu üç bölgeyi temsil eden eşdeğer kapasitans devleri Şekil 2.16’da verilmiştir.



Şekil 2.16. İdeal bir MIS yapısına ait eşdeğer kapasitans şeması, (a) yığılma, (b) tüketim, (c) terslenim

2.3.1. Yığılma bölgesi

n-tipi bir MIS/MPS yapı için, doğrultucu kontak metaline bir $V_G > 0$ voltajı uygulanıp denge durumundayken sabit olan metal Fermi enerji seviyesi düşürüldüğünde (metal kısım pozitif, yarıiletken kısım negatif uç) metalden yarıiletkeneye doğru bir iç elektrik alan oluşur ve bunun sonucunda n-tipi yarıiletken yüzeyinde elektron birikmesi meydana gelir. Bu birikme sonucunda da arayüzeye yakın bölgedeki yarıiletken bant seviyeleri yukarı yönlü bükülür (Şekil 2.17 (a)). Yarıiletken yüzeyinde biriken $-Q$ yüküne karşılık metal yüzeyinde $+Q$ yükü indüklenir. Yarıiletkenin arayüzeye yakın kısmında iletkenlik bandının Fermi seviyesine doğru yaklaştığı bu duruma, elektronların birikmesinden ötürü *yığılma* denir. Yığılma durumunda yarıiletken arayüzeyinde biriken yükün yüzey yükü olmasından ötürü yarıiletken kapasitansı sonsuza gider ($C_{sc} \rightarrow \infty$) ve dolayısıyla ölçülen yapı kapasitansı arayüzey tabakasının (yalıtkanın) kapasitansı olur ($C \rightarrow C_i$).

2.3.2. Tüketim bölgesi

n-tipi bir MIS/MPS yapı için, doğrultucu kontak metaline bir $V_G < 0$ voltajı uygulanıp denge durumundayken sabit olan metal Fermi enerji seviyesi yükseltildiğinde (metal kısım negatif, yarıiletken kısım pozitif uç) bu sefer yarıiletkenden metale doğru bir iç elektrik alan oluşur ve bunun sonucunda n-tipi yarıiletken yüzeyindeki elektronlar yüzeyden uzaklaşır. Uzaklaşma sonucunda arayüzey bölgesine yakın yarıiletken yüzeyinde iyonize atomların varlığından ötürü hollerin varlığı baskın olmaya başlar. Yarıiletken yüzeyinde elektron yoğunluğu azaldığından iletim bandı ile valans bandı bu kez aşağı yönlü bükülür (Şekil 2.17

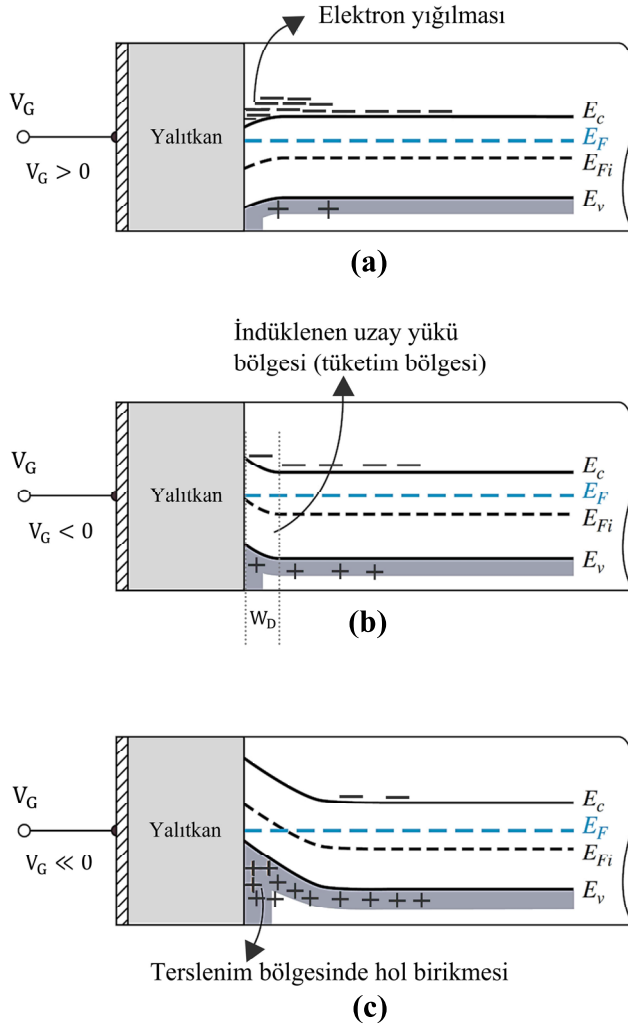
(b)). Elektronların yüzeyde azalmasından veya tükenmesinden ötürü bu duruma *tüketim* denir. Oluşan bu tüketim bölgesinin genişliği W_D ile gösterilir ve;

$$W_D = \epsilon_s A_i \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_i} \right) \quad (2.20)$$

eşitliği ile verilir. ϵ_s yarıiletkenin elektriksel geçirgenliği, A_i yalıtkan tabaka yüzey alanı ve C_i ise yalıtkan tabakanın kapasitansıdır. Bu bölgede yapının kapasitansını yarıiletkenin uzay yükü bölgesi ile yalıtkan/polimer tabakanın kapasitansları belirler.

2.3.3. Terslenim bölgesi

Bu kez yapıya daha büyük şiddette bir $V_G < 0$ voltajı uygulanıp metalin Fermi enerji seviyesi daha fazla yükseltildiğinde yarıiletken Fermi seviyesi, saf durumdaki Fermi enerji seviyesinin (E_i) altına geçmeye başlar (Şekil 2.17 (c)). Yarıiletken yüzeyindeki elektronların yoğunluğu iyice azalır ve öyle ki yarıiletken yüzeyinde hollerin yoğunluğu elektron yoğunluğundan çok daha fazla olur. Bu durumda n-tipi yarıiletken p-tipi yarıiletken gibi davranır ve yarıiletken yüzeyinde meydana gelen bu değişimden ötürü bu duruma *terslenim* denir. Bu durum altında MIS/MPS yapısının kapasitansı, elektronların uygulanan dış voltajın ac sinyalini takip edebilmelerine bağlıdır. Düşük frekanslarda elektronlar bu sinyali takip edebilir ve artan voltaj ile yapının kapasitansı artarak yalıtkan kapasitans (C_i) değerine yaklaşır. Yüksek frekanslarda ise elektronlar ac sinyalini takip edemez ve yapı kapasitansı minimum (C_{min}) değerine yaklaşır [4, 13, 41].



Şekil 2.17. İdeal durumda $V \neq 0$ için n-tipi MIS/MPS yapıda enerji bant durumları, (a) yığılma, (b) tüketim, (c) terslenim

2.4. MIS Yapılarda Arayüzey Durum Yoğunluğu Teorisi (Gerçek MIS Yapısı)

Bölüm 2.2’de bir MS yapısını idealden uzaklaştıran durumlardan bahsedilmişti. Bir metal-yarıiletken kontak hazırlanacağı zaman arayüzeyde ister istemez bir oksit veya yalıtkan tabaka oluşur. Yapının oluşum aşamalarına ne kadar dikkat edilse de laboratuvar koşullarının yeterince uygun olduğu düşünülse de birçok durumda hem yarıiletken büyütme sürecinde oluşan örgü kusurları veya kirlilik atomlarından, hem de yalıtkan/oksit tabakanın varlığından kaynaklı arayüzey (hem metal ile yalıtkan arasında hem de yalıtkan ile yarıiletken arasında) durumlarından, Schottky yapıların performansı önemli ölçüde etkilenir. Bir diğer önemli etken ise seri dirençtir (R_s). Pratik ölçümlerde yapının kendisinden kaynaklı (yarıiletken nötral bölge direnci) veya dış bağlantılardan (kontakt veya kablo dirençleri gibi) kaynaklı olarak bir seri direnç etkisi muhakkak karşımıza çıkar ve dolayısıyla

hesaplamalarda bu etkiyi dikkat almak zorunluluğu oluşur. Şimdi bu etkiyi yani seri direnci ölçülen kapasitans ve admittans (iletkenlik) (C_m ve G_m) cinsinden yazmaya çalışalım.

Şekil 2.11 (a)'daki devrenin frekansa bağlı olarak Şekil 2.12 (b)'deki devreye dönüştürülebileceğini söylemiştik. Şekil 2.11 (a)'nın paralel bağlantı kısmındaki admittans;

$$Y = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = j\omega C_s + \frac{1}{R_{ss} + \frac{1}{j\omega C_{ss}}} = G_p + j\omega C_p \quad (2.21)$$

şeklindedir. Eşitlikte G_p ve C_p değerleri;

$$G_p = \frac{1}{R_p} = \frac{C_{ss} \omega^2 \tau}{1 + (\omega \tau)^2} \quad (2.22)$$

$$C_p = C_s + \frac{C_{ss}}{1 + (\omega \tau)^2} \quad (2.23)$$

şeklinde verilir. Toplam empedans Z ;

$$Z = \frac{1}{j\omega C_i} + \frac{1}{G_p + j\omega C_p} = -j \left(\frac{1}{\omega C_i} + \frac{\omega C_p}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2} \right) + \frac{G_p}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2} \quad (2.24)$$

eşitliği ile verilir ve buradan toplam admittans Y ;

$$Y = \left(\frac{G_p^2 + \omega^2 C_p^2}{G_p} \right) + j\omega \frac{(G_p^2 + \omega^2 C_p^2) C_i}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2 + \omega C_p} = G_{in} + j\omega C_{in} \quad (2.25)$$

eşitliği ile verilebilir [30].

Bir seri direncin varlığında ölçümlerden elde edilen kapasitans (C_p) ve iletkenlik (G_p) değerleri yapının gerçek değerleri değildir [43]. Seri direncin varlığı hem ölçülen kapasitansta hem de eşdeğer iletkenlikte hatalara sebep olabilir ve bu hatalar giriş voltajına ve uygulanan frekansa bağlı olarak değişkenlik gösterebilir [41]. Bu durumun temsili için

seri direnci de içinde barındıran Şekil 2.11 (c) devresi ele alınabilir. MIS/MPS yapısının gerçek kapasitans ve admittans değerlerini elde edebilmek için toplam empedans eşitliği Z ;

$$Z = Z_1 + Z_2 = \frac{1}{j\omega C_c + G_c} + \frac{1}{j\omega C_T + G_T} = \frac{1}{j\omega C_m + G_m} \quad (2.26)$$

şeklinde ifade edilebilir. Seri direncin (R_s) etkisinde düzeltilmiş (*corrected*) kapasitans (C_c) ve admittans (G_c) değerleri için $Z_1 = Z - Z_2$ olacağından,

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{(G_m G_T - \omega^2 C_m C_T) + j\omega(G_T C_m - C_T G_m)}{(G_T - G_m) + j(C_T - C_m)} \quad (2.27)$$

eşitliği yazılabilir. Eş. 2.27 için ifade eşleniği ile çarpılıp, $G_T = 1/R_s$ alınıp C_T değeri ihmal edilirse,

$$G_c = \frac{(G_m - G_m^2 R_s) - \omega^2 C_m^2 R_s}{(1 - G_m R_s)^2 + \omega^2 C_m^2 R_s^2} \quad (2.28)$$

değeri elde edilir. Eş. 2.28'deki R_s , empedans ifadesinin gerçek (reel) kısmı olduğu için güçlü yığılma bölgesinde ve yüksek frekans altında C_m ve G_m değerleri cinsinden elde edilebilir [41].

$$Z = \frac{1}{j\omega C_m + G_m} = \frac{G_m - j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} - \frac{j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.29)$$

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.30)$$

Yine Eş. 2.27'den yararlanarak G_c 'nin elde edildiği şekilde ancak bu kez ifadenin gerçek (reel) kısmı bize C_c bağıntısını verir.

$$C_c = \frac{C_m}{(1 - G_m R_s)^2 + \omega^2 C_m^2 R_s^2} \quad (2.31)$$

Eş. 2.28 ve Eş. 2.31’de $a = G_m - (G_m^2 + \omega^2 C_m^2)R_s$ dönüşümü yaparsak bu eşitlikler,

$$C_c = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2)C_m}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.32)$$

$$G_c = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2)a}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.33)$$

şeklinde yazılabilir [30, 41].



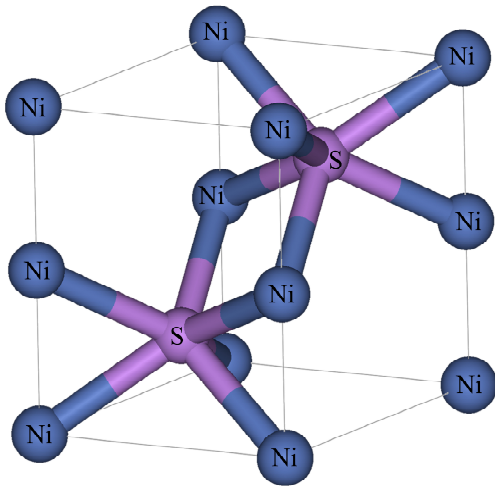
3. DENEYSEL YÖNTEM

3.1. Nikel sülfid (NiS) ve PVP Yapıları Hakkında Genel Bilgiler

Araştırmacılar tarafından metal-yarıiletken diyetlerin performansını ve güvenilirliğini arttırmak, bununla birlikte üretim maliyetlerini düşürmek için metal ile yarıiletken yüzeyler arasına; metaller, bileşikler, yarıiletken nanopartiküller ve ayrıca çeşitli avantajları nedeniyle polimer yapıları maddeler katılanmaktadır [44]. Bu tezin konusu olarak incelenen MPS diyet yapısında arayüzey tabakası olarak nikel sülfid (NiS) bileşiği ile kombine edilen polivinilpirolidon polimer yapısı (NiS:PVP) kullanılmıştır.

3.1.1. NiS yapısının özellikleri

Metal sülfidler içerisinde nikel sülfid, NiS formülü ile gösterilen inorganik ve hekzagonal kristal yapıları bir bileşiktir (Şekil 3.1). NiS nanoyapıları; elektro-aktif yapısı, yüksek spesifik kapasitansı ve düşük direnci ile mükemmel elektrokimyasal özellikler gösterir [45]. Metal sülfidler içerisinde nikel sülfidler, iyi elektronik iletkenlik, yüksek redoks aktivitesi, düşük maliyet ve imalat kolaylığı avantajları ile büyük ilgi görmüştür. Ayrıca nikel sülfidler, ümit verici süperkapasitans elektrot malzemeleri olarak araştırılan ve iyi performans gösteren birçok farklı faza da sahiptir [45].



Şekil 3.1. NiS bileşiğine ait kristal kübik yapı

Hazırlanan NiS yapısı mikrodalga destekli yöntem ile elde edilmiştir ve bu yöntem son zamanlarda nano ölçekli sentezlerde büyük ilgi görmektedir. Bu yöntemin kendine has üstünlükleri vardır. Örneğin ortamdaki düşük termal gradyanları nedeniyle tek tip boyutlarda ve yüksek saflıklarda malzemeler üretilebilir. Ayrıca yüksek reaksiyon hızlarına, yüksek reaksiyon seçiciliğine ve ürün verimine, enerji tasarrufu gibi özelliklere sahiptir [45].

3.1.2. Polivinilpirolidon (PVP)

Organik bir polimer olan Polivinilpirolidon, moleküler ağırlığı 40.000 ila 360.000 arasında değişen bir bileşiktir ve aynı zamanda Povidon veya kısaca PVP olarak da adlandırılır. PVP, bir yarı kristaldir ve geniş bir kristallik aralığına sahiptir. Özellikle hem suda hem de birçok organik çözücünde iyi çözünübilirliği sayesinde, toksik olmayan karakterleri, benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle endüstriyel birçok alanda kendine yer bulmuştur [46]. Metal-yarıiletken kontaklarda da bu organik bileşikler, cihaz performansını ve güvenilirliğini önemli ölçüde etkileyen arayüzey durumlarını ortadan kaldırmak veya en aza indirmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle metal veya metal bileşikleriyle katkılanmış yüksek dielektrik katsayılı organik polimerler, sızıntı akımlarını ve metal-yarıiletken arasındaki reaksiyonları bloke eden yüksek yalıtım özelliklerine sahiptir [33, 34, 44, 47-50].

3.2. Au/(NiS:PVP)/n-Si Schottky Yapısının Oluşturulması

Bu bölümde sunulan tez çalışmasının konusu olan Au/(NiS:PVP)/n-Si Schottky diyot yapısının oluşturulma adımları verilmiştir.

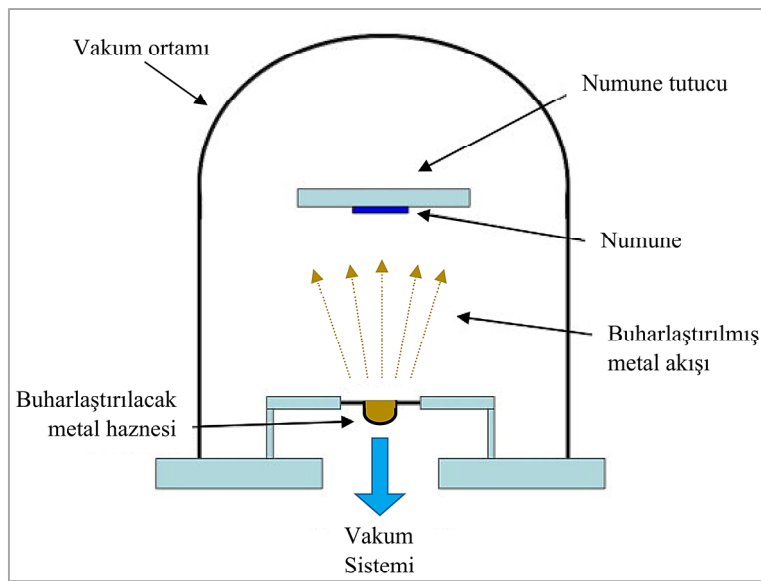
3.2.1. Kristal temizleme

MS veya MIS/MPS gibi oldukça hassas mikro ölçekli hatta nano ölçekli yapılar hazırlanırken, yapıda oluşabilecek her türlü fiziksel ve kimyasal kirliliğe karşı arayüzeylerin olabilecek en iyi şekilde temizlenmiş olmasına dikkat edilir. Çünkü yapı içerisinde oluşabilecek bu tür kirlilikler yapının performans ve verimini önemli ölçüde etkileyebilir. Bu durum bu tür yapılar için hayati önem taşır. Au/(NiS:PVP)/n-Si Schottky yapısı, kalınlığı 300 μm ve öz direnci 4 $\Omega\cdot\text{cm}$ olan fosfor katkılı (100) yönelimli ve 2 inç çaplı n-tipi Si kristali üzerine oluşturulmuştur. Öncelikle kristal yapı, (3:1:1) oranında hazırlanmış H_2O ,

H₂O₂ ve NH₄OH solüsyonunda 70 °C de ultrasonik banyoda yıkanmıştır ve daha sonra yüksek öz dirençli deiyonize suda uzunca bir süre durulanmıştır. Durulama işleminden sonra kristal, N₂ gazıyla kurutulup omik kontak uygulama işlemine geçilmiştir.

3.2.2. Omik kontak

Temizlenen n-tipi Si kristaline uygulanan arka omik kontak ve daha sonraki aşamada yapılan doğrultucu kontaklar için metal buharlaştırma sistem şeması Şekil 3.2’de görülmektedir.



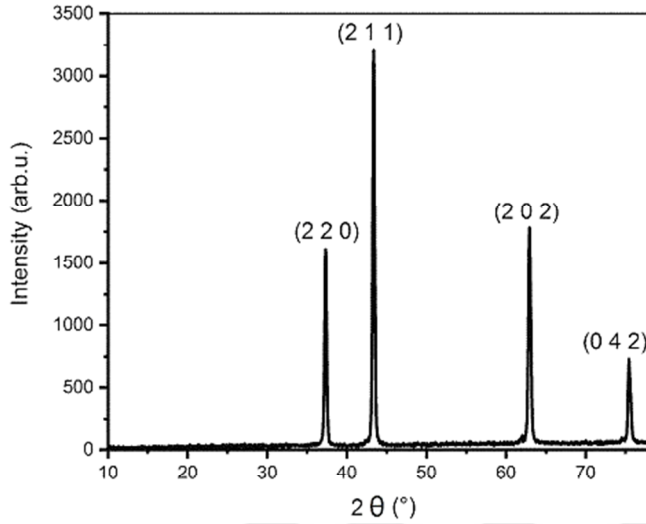
Şekil 3.2. Doğrultucu ve omik kontaklar için metal buharlaştırma sistemi

Omik kontak için, Şekil 3.2’de görülen sistem içerisine bir önceki aşamada temizlenmiş olan n-tipi Si kristali alındı ve arka yüzeyine yaklaşık 10^{-6} Torr basınç altında, yüksek saflıktaki (~99,999%) altın (Au) kalınlığı 150nm olacak şekilde termal buharlaştırma yöntemiyle kaplandı. Omik kontakın direnç etkisinin düşük olması için yaklaşık olarak 500 °C’de, nitrojen gazı (N₂) ortamında 5 dakika boyunca tavlandı.

3.2.3. (NiS:PVP) arayüzey tabakasının oluşturulması

Öncelikle NiS nano-yapısının hazırlanması için 0.2 mol NiCl₂.6H₂O, 40ml saf suda çözünüp 30 dk boyunca karıştırıldıktan sonra oluşan solüsyona 0.5 mol Na₂S.3H₂O, solüsyonun pH değeri 7 oluncaya kadar damla damla eklendi. Daha sonra pH değeri sabit 14 olan 0.5 mol NaOH eklenerek gücü 180 W olarak ayarlanmış mikrodalga cihazında 15

dk boyunca tutuldu. Saf suyla 5 kez yıkanıp fırında 48 saat boyunca kurutulduktan sonra 1000 °C de tavlandı. Bu şekilde yeşil bir toz numune elde edilmiştir. Elde edilen NiS nano-yapısına ait XRD analiz grafiği Şekil 3.3’de görülmektedir.



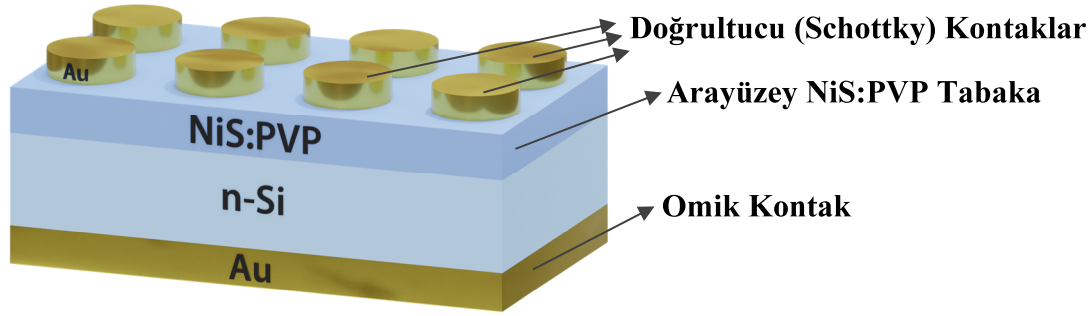
Şekil 3.3. NiS nano-yapısına ait XRD analiz grafiği

Toz halinde elde edilen NiS nano-yapıları, 80 °C’ye kadar ısıtılırken 3 saat boyunca % 8 ağırlık oranında PVP solüsyonu elde etmek için solvent olarak deiyonize suda çözündürüldü. Ardından NiS:PVP çözeltisi oda koşullarında karıştırıldıktan sonra omik kontağı yapılan n-Si kristalin ön yüzeyine uygulanması adımına geçildi. Bu uygulama için spin kaplama yöntemi (*spin coating method*, SCM) kullanılmıştır. Yüksek dönme hızları, yarıiletken kristal yüzeyinde oldukça ince bir film tabaka oluşturabilmesi açısından güvenilir bir yöntem olan spin kaplama yöntemi (SCM) ile n-tipi Si yarıiletkenimizin ön tarafına kaplandı.

3.2.4. Doğrultucu (Schottky) kontak

Son adımda yine 10^{-6} Torr basınçta, kalınlığı 150 nm ve yüzey alanı $7.85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ olacak şekilde altın (Au) doğrultucu kontaklar, kristal ön yüzeyine uygulanan NiS:PVP yapısının üzerine termal buharlaştırma yöntemiyle kaplandı. Hem omik hem de doğrultucu kontaklar BESTEC termal buharlaştırma sistemi kullanılarak gerçekleştirildi.

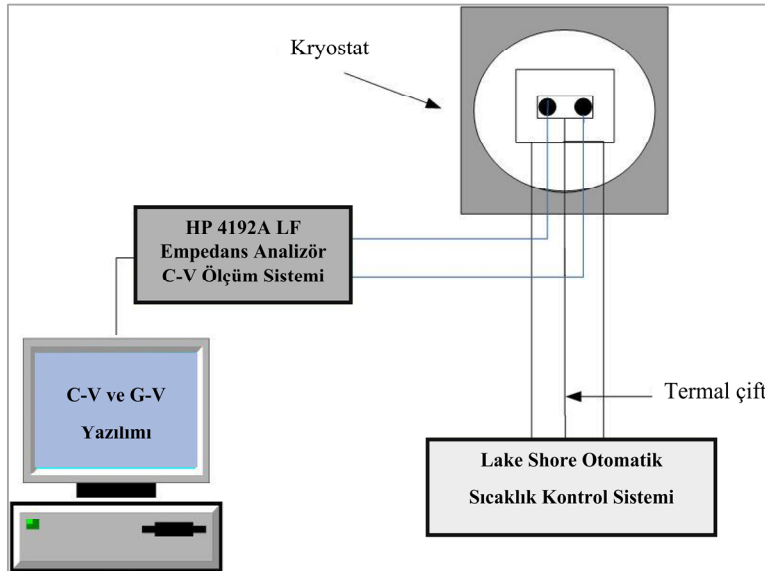
Hazırlanan Au/(NiS:PVP)/n-Si MPS Schottky diyot yapısının şematik gösterimi Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4. Au/(NiS:PVP)/n-Si yapısına ait şematik gösterim

3.3. Deneysel Ölçüm Sistemi

Tez çalışmamızda elektriksel karakteristikleri incelenen numunenin kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçümleri için 5Hz – 13MHz aralığında $\pm$ % 0.15 hassasiyetle ölçüm yapabilen HP 4192A LF Empedans Analiz cihazı kullanılmıştır. Ayrıca ölçümler esnasında oluşabilecek olumsuz etkileri azaltmak, numuneyi dış ortamdan mümkün mertebe izole etmek amacıyla numunenin yerleştirildiği kryostat basıncı yaklaşık olarak 10^{-3} Torr seviyesine düşürülmüştür. Ölçüm sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.5. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri için kullanılan ölçüm sistem şeması

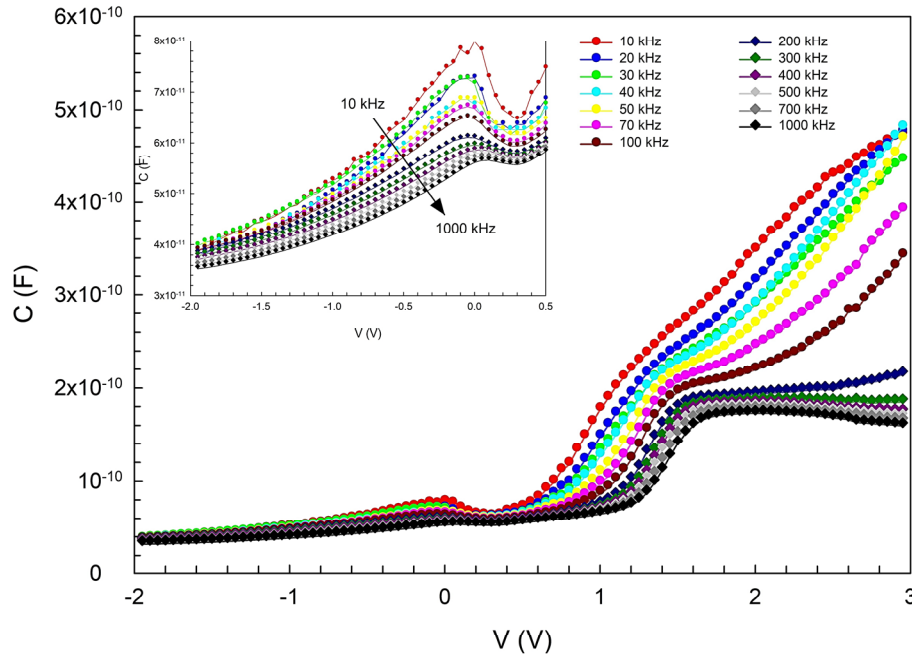


4. DENEYSEL BULGULAR

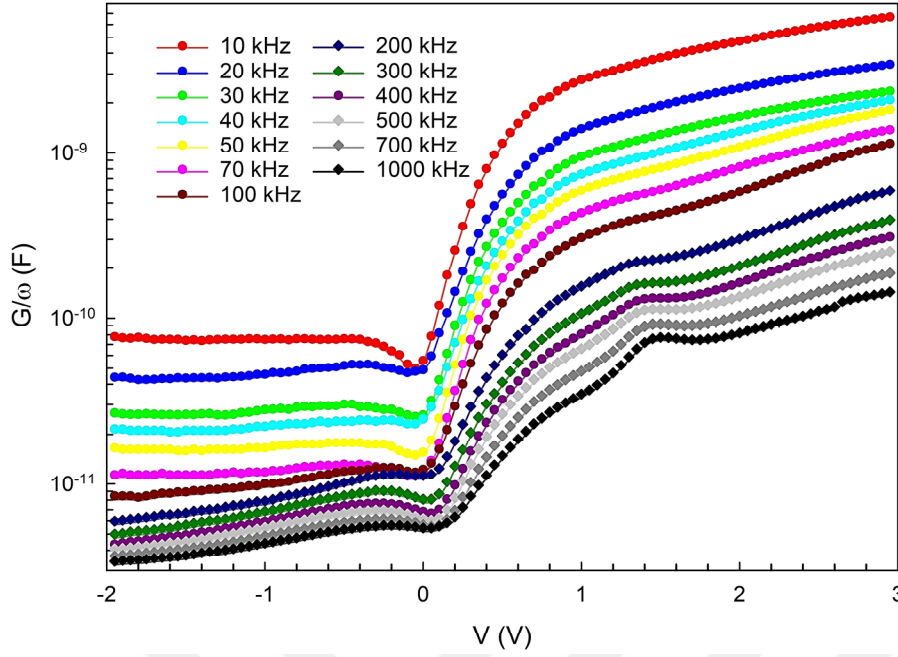
Hazırlanan Au/(NiS:PVP)/n-Si diyot yapısının hem kapasitans-voltaj (C-V) hem de iletkenlik-voltaj (G/ω -V) karakteristikleri, oda sıcaklığında, geniş bir frekans (10 kHz – 1000 kHz) ve voltaj ((-2V)-(+3V)) aralığında incelendi. Ölçülen elektrofiziksel parametreler, tüketim ve yığılma bölgesinde güçlü frekans bağımlılığı özellikleri göstermiştir. Bu etkilerin nedeni arayüzey durumları (N_{ss}), seri direnç (R_s) ve polarizasyonun yanı sıra organik arayüzey katmanının (NiS:PVP) varlığından kaynaklanmaktadır.

4.1. Geniş Voltaj ve Frekans Aralığında C-V ve G/ω -V Karakteristikleri

Oda sıcaklığında 10 kHz ile 1 MHz frekans ve -2V ile +3V voltaj aralığında ölçülen Au/(NiS:PVP)/n-Si Schottky yapısının C-V ve G/ω -V karakteristiğini gösteren grafikler Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir. Bu iki şekilde de görüleceği üzere özellikle orta ve yüksek frekanslarda hem C-V hem de G/ω -V grafikleri üç bölgeye sahiptir. Bir MOS kapasitörde olduğu gibi $V_G \geq 1.6V$ için yığılma, $0 \leq V_G < 1.6V$ için tüketim ve $-2 \leq V_G < 0$ için ise terslenim bölgeleri görülmektedir.



Şekil 4.1. Au/(NiS:PVP)/n-Si yapısına ait frekans ve voltaja bağlı C-V grafiği



Şekil 4.2. Au/(NiS:PVP)/n-Si yapısına ait frekans ve voltaja bağlı G/ω -V grafiği

Düşük ve orta frekans değerlerinde, arayüzey durumlarının veya yüzey polarizasyonunun dağılımı nedeniyle -2V ile 0.5V aralığında pik veren C-V eğrileri Şekil 4.1 içerisinde görülmektedir. Burada özellikle düşük ve orta frekanslarda birçok arayüzey durumu veya tuzaklanmış yükler, uygulanan ac voltaj sinyalini takip edebilir. Dipol ve arayüzey kutuplanmaları, düşük ve orta frekanslarda meydana gelir ve bundan dolayı kapasitans (C) ve iletkenlik (G) değerlerine fazladan katkı sağlayabilir. Yüksek frekanslarda ise arayüzey durumlarının gevşeme süreleri (τ), uygulanan ac sinyalini takip edebilecek yeterliliğe sahip olmadığından bu frekans değerlerinde C ve G için önemli bir ilave bir katkı gözlenmez [44, 47-50].

Seri direnç (R_s), sadece yüksek frekanslarda yığılma (accumulation) veya yüksek pozitif öngerilim voltajlarında etkili olurken, arayüzey durumları (N_{ss}) düşük frekanslarda hem tüketim hem de zayıf terslenim bölgesinde etkilidir. Eğer MS yapı bir arayüzeye sahip ise uygulanan giriş voltajı (V_G);

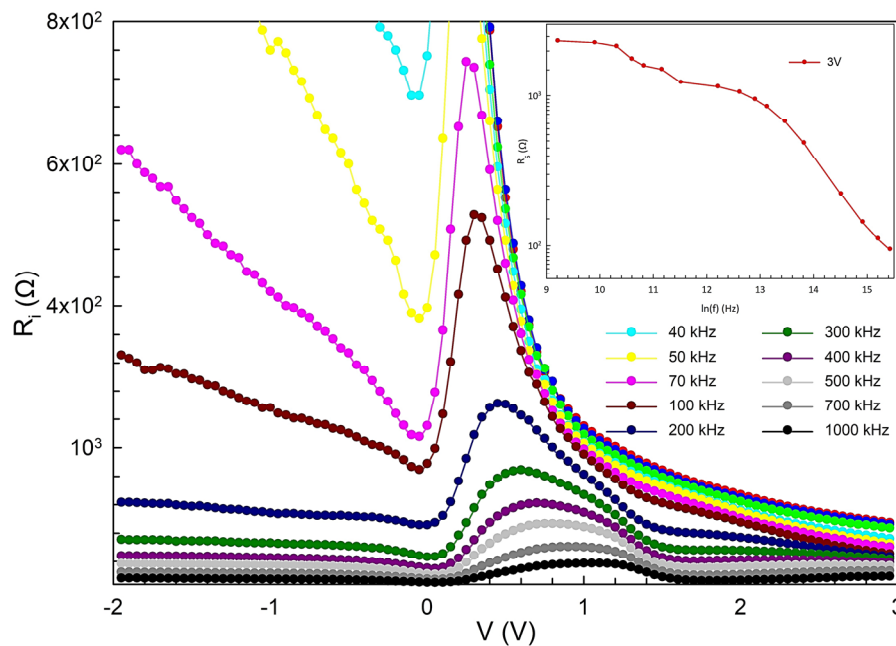
$$V_G = V_i + V_{R_s} + V_D + V_{ss} \quad (4.1)$$

eşitliği ile yazılır. Burada V_i ; arayüzey tabaka potansiyeli, V_{R_s} ; seri direnç potansiyeli, V_D ; difüzyon potansiyeli ve V_{ss} ; arayüzey durumları üzerine düşen potansiyeldir.

Şekil 4.1’de görülebileceği üzere C-V grafiği özellikle seri direnç ve arayüzey tabakanın varlığı nedeniyle yığılma bölgesinde içbükey bir eğrilik gösterir. Bu yüzden özellikle tüketim bölgesinde C-V ve G/ω -V verileri kullanılarak çeşitli voltaj aralıklarında hem arayüzey durumlarının (N_{ss}) hem de seri direncin belirlenmesi önemlidir. Yüksek seri direnç değerleri, özellikle yığılma bölgesinde hatalara neden olabilir. Seri direncin bu etkisi cihaz üretim sürecinde uygun temizleme koşullarıyla veya istenilen gerçek değerler elde edilebilmesi için gerekli düzeltmeler veya ayarlamalar yapılarak en aza indirilebilir. Direncin gerilime bağlı profili (R_i) tüm ölçülen frekans ve voltaj aralığı boyunca iletkenlik metodu kullanılarak hesaplanabilir. Buna göre yüksek frekanslardaki ($f \geq 0.5$ MHz) R_i değeri MPS yapılarda R_s ’nin gerçek değerine karşılık gelir ve bu değer, güçlü yığılma bölgesindeki ölçülen kapasitans (C_{ma}) ve iletkenlik (G_{ma}) değerlerinden elde edilebilir.

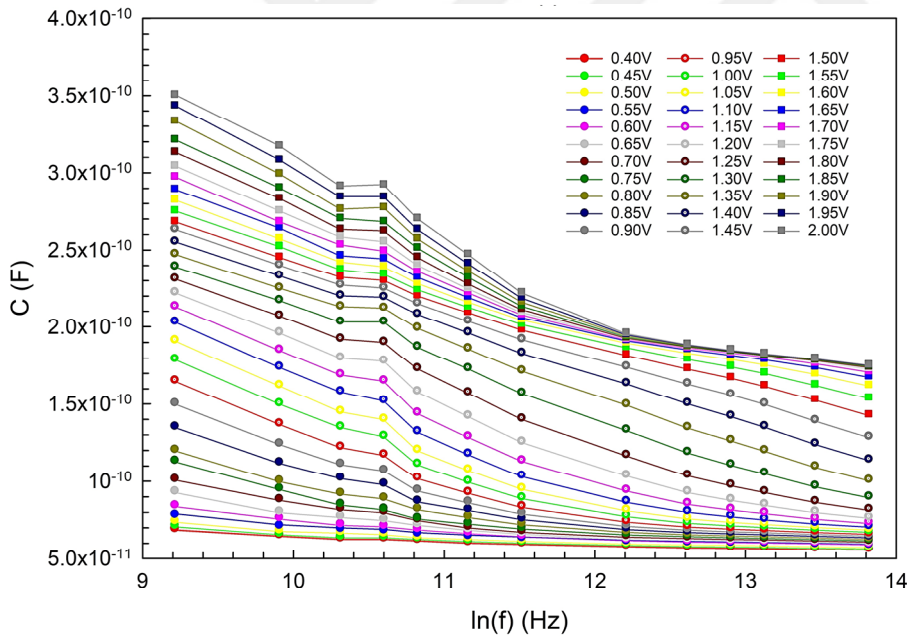
$$R_s = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + \omega^2 C_{ma}^2} \quad (4.2)$$

eşitliği ile hesaplanır. Ölçülen C-V ve G/ω -V değerlerine bağlı olarak R_s ’nin empedans ve admittans üzerindeki etkilerini belirlemek için R_i ’nin gerilime bağlı profili Eş. 4.2 kullanılarak her bir frekans değeri için hesaplanmıştır ve Şekil 4.3’de frekansa bağlı direnç değişimleri gösterilmiştir.

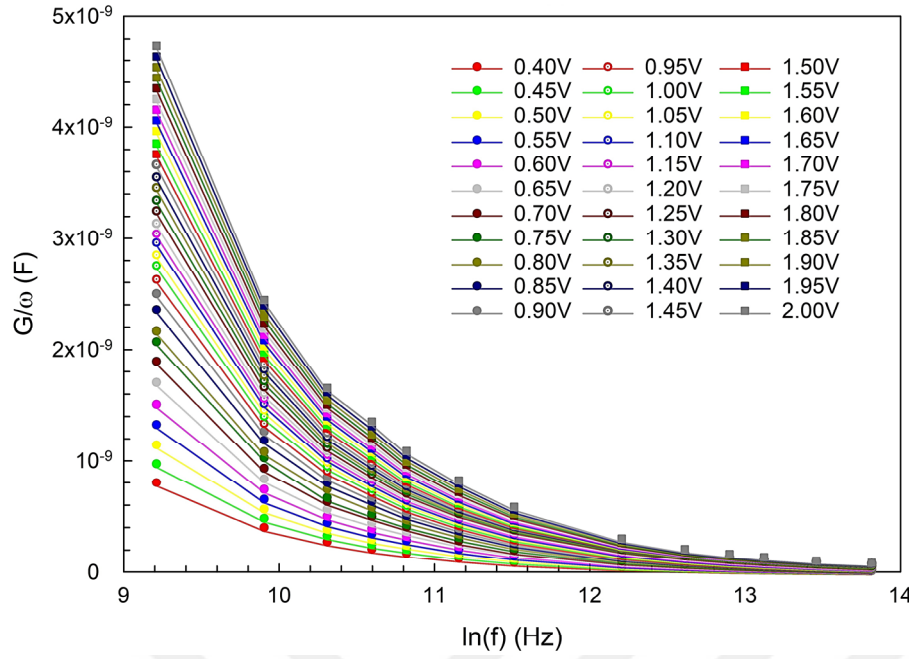


Şekil 4.3. Au/(NiS:PVP)/n-Si yapısının çeşitli frekanslarda R_i değişim karakteristikleri

Yüksek frekanslar için yığılma bölgesinde R_i 'nin azalması, iletkenlik artışının bir sonucudur. Şekil 4.3'de görülebileceği gibi, R_i -V grafikleri bir tepe noktasına sahiptir ve artan frekansla tepe noktasının büyüklüğü azalırken, elektrik alanı altındaki yüzey durumlarının yeniden düzenlenmesi ve yapılandırılması nedeniyle tepe konumu yığılma bölgesine doğru kaymaktadır. Ayrıca +3V değeri için seri direncin artan frekansla azaldığı aynı grafik içerisinde görülmektedir. Voltaja ve frekansa bağlı etkilerin kapasitans (C) ve iletkenlik (G/ω) üzerinde daha net görülebilmesi adına 0.4V / 2V aralığında 50mV hassasiyetle C-ln(f) ve G/ω -ln(f) grafikleri çizildi. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te görüleceği üzere hem C hem de G/ω değerleri artan frekans ile neredeyse üstel olarak azalmaktadır. Ayrıca bu değerler düşük frekans değerlerinde gerilime güçlü şekilde bağlı iken, yüksek frekans değerlerine çıkıldığında artık neredeyse gerilimden bağımsız oldukları görülmektedir. Bunun sebebi ise düşük frekans değerlerinde arayüzey durumlarının C ve G/ω değerleri üzerine ilave katkı yapmasıdır.

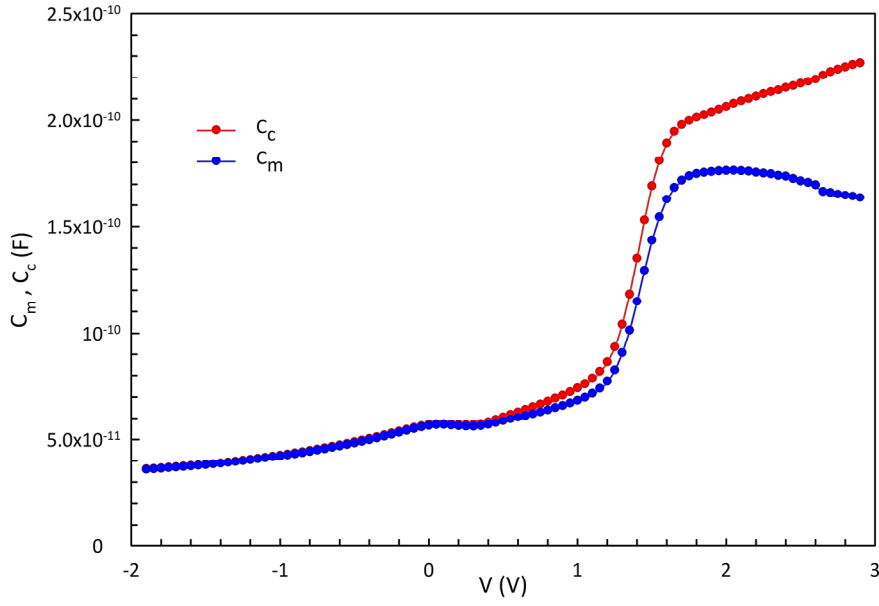


Şekil 4.4. Au/(NiS:PVP)/n-Si yapısının çeşitli voltajlarda C-ln(f) karakteristikleri

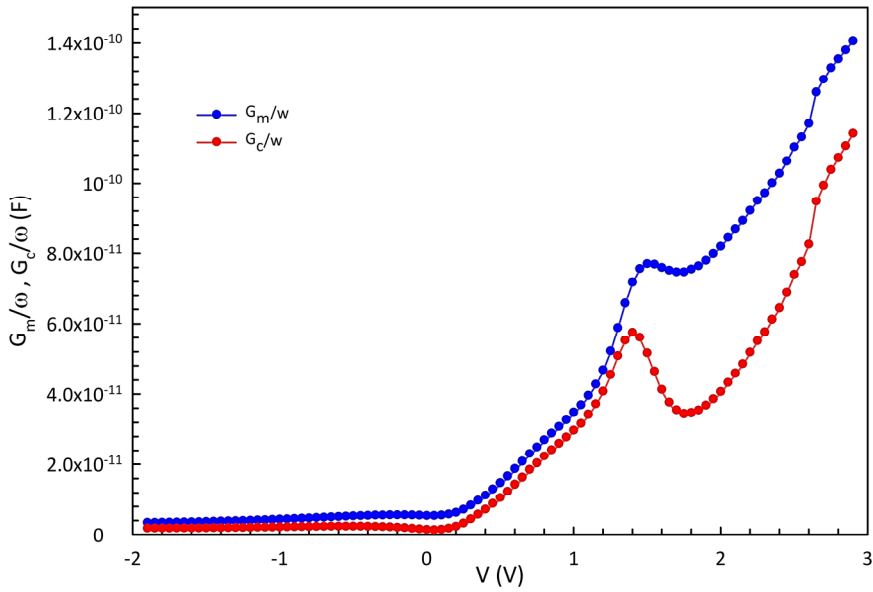


Şekil 4.5. Au/(NiS:PVP)/n-Si yapısının çeşitli voltajlarda G/ω - $\ln(f)$ karakteristikleri

Bir seri direncin varlığında ölçümlerden elde edilen kapasitans ve iletkenliğin yapının gerçek değerleri olamadığını, seri direnç etkisinde hem ölçülen kapasitansta hem de eşdeğer iletkenlikte hataların olabileceğini ve bu hataların giriş voltajına ve uygulanan frekansa bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini teorik bilgiler kısmında ifade etmiştik [41, 43]. Bu sebeple Au/(NiS:PVP)/n-Si MPS yapısının yüksek frekanslarda ölçülen C_m -V ile G_m -V eğrilerinin C_c -V ile G_c -V eğrileri olarak Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.6. Au/(NiS:PVP)/n-Si yapısının yüksek frekansta (1MHz) C_m -V ve C_c -V karakteristik eğrisi



Şekil 4.7. Au/(NiS:PVP)/n-Si yapısının yüksek frekansta (1MHz) G_m -V ve G_c -V karakteristik eğrisi

Şekil 4.6’da görüleceği üzere düzeltilmiş kapasitans eğrisi (C_c) artan voltajla birlikte artar ve ölçülen kapasitans (C_m) eğrisinin yığılma bölgesindeki azalışı, R_s eliminasyonuna bağlı olarak ortadan kaybolur. Ancak bunun aksine Şekil 4.7’de görüldüğü gibi düzeltilmiş iletkenlik (G_c) eğrisinde ölçülen iletkenliğe kıyasla bir azalma görülür ve yaklaşık olarak 1.45V civarlarında bir pik görülür. Bu durumlardan anlaşılacağı üzere seri direnç etkisi,

özellikle yüksek frekanslarda iletkenlik ve kapasitans ölçümlerinde dikkate alınmalıdır ve sonuçlar bu etkinin varlığı üzerinden hesaplamalar yapılarak yorumlanmalıdır [50]. Seri direnç (R_S) etkisinde düzeltilmiş kapasitans ve iletkenlik hesaplamaları bölüm 2.4’de yapılmıştır ve bu hesaplamalar sonucunda Eş. 2.32 ve Eş 2.33 üzerinden yapılan hesaplamalar neticesinde seri dirence bağlı olarak düzeltilmiş kapasitans (C_c) ve iletkenlik (G_m) değerleri elde edilmiştir.





5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Au/(NiS:PVP)/n-Si MPS Schottky yapısına ait elektrofiziksel karakteristikler hem frekans hem de voltaja bağlı olarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Hazırlanan bu metal/polimer (organik arayüzey)/yarıiletken diyot yapısının kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçümleri, oda sıcaklığında, yaklaşık olarak 10^{-3} Torr basınçta, geniş bir frekans (10 kHz – 1000 kHz) ve voltaj (-2V/+3V, 50mV adımlı) aralığında gerçekleştirilmiştir. Hem C-V hem de G/ω -V grafiklerinde uygulanan voltajın büyüklüğüne ve polarizasyonuna bağlı olarak teorik bilgiler kısmında da değindiğimiz üç bölge; terslenim, tüketim ve yığılma bölgeleri net olarak görülmektedir (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2). Özellikle düşük ve orta frekanslarda arayüzey durumları, uygulanan harici ac voltaj sinyalini takip edebilmektedir ve böylece bu frekans değerlerinde hem kapasitans (C) hem de iletkenlikte (G/ω) arayüzey durumların varlığından ötürü bir ilave değer artışı görülmüştür. Yüksek frekanslarda ise arayüzey durumlarının gevşeme sürelerinin ac sinyalini takip edememesinden ötürü bu frekans değerlerinde C ve G/ω değerlerinde önemli ölçüde bir artış görülmemiştir.

Yapı karakteristiklerini etkileyen bir diğer önemli etken ise seri dirençtir. Ölçümlere önemli ölçüde etki eden seri direnç, yapının kendisinden kaynaklı (yarıiletken nötral bölge direnci) veya dış bağlantılardan (kontak veya kablo dirençleri, oksitlenme direnci gibi) kaynaklı olarak karşımıza çıkmaktadır. Arayüzey durumlarının aksine seri direnç (R_s), yüksek frekanslarda ve ileri öngerilim değerlerinde (yığılma bölgesinde) etkili olduğu görülmüştür. Seri direnç varlığı nedeniyle C-V eğrilerinde (Şekil 4.1) özellikle yüksek frekanslarda bükülmeler meydana gelmiştir.

MIS/MPS yapılarda seri direnç C-V ve G/ω -V ölçümlerinden elde edilir. R_s 'nin gerçek değeri güçlü yığılma bölgesinden elde edilen değeridir. Çünkü bu bölge n-tipi yarıiletken yapı için ileri pozitif gerilim bölgesidir ve bu tip bir yarıiletken için gerçek seri direnç değeri bu bölgeden hesaplanır. R_s 'nin bu değerleri Eş. 4.2 ile hesaplanıp grafiğe dökülmüştür (Şekil 4.3). Hesapladığımız bu değerleri grafik üzerinden yorumlayacak olursak arayüzey durumlarının gevşeme süreleri, yüksek frekanslarda ac sinyali değişimine ayak uyduramaz ve bunun sonucunda da seri direnç etkisi yüksek frekans değerlerinde giderek azalır. Kısacası bu durum, arayüzey durumlarının varlığına atfedilir [44, 47-50].

Kondüktans metodu sayesinde elde edilen düzeltilmiş kapasitans (C_c) ve iletkenlik (G_c) eğrileri, ölçümlerden elde ettiğimiz kapasitans (C_m) ve iletkenlik (G_m) eğrileri Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmiştir. Bu değerler yüksek frekans (1 MHz) ve -2V ile 3V aralığından elde edilmiştir. Şekil 4.6’daki kapasitans-voltaj grafiğinde görülen ölçülen kapasitans eğrisi ile hesaplanan düzeltilmiş kapasitans eğrisi arasındaki ayrımın özellikle yığılma bölgesinde yani daha büyük pozitif voltaj değerlerinde olmasının nedeni yine seri dirence (R_s) atfedilir. R_s ’nin etkisi nedeniyle yığılma bölgesinde ölçülen kapasitans değerlerinde azalmalar gözlenir ancak bu etki ihmal edildiğinde kapasitans eğrisinde bir artış görülmüştür ki bu durumda elde edilen eğri düzeltilmiş kapasitans eğrisidir.

Kapasitansın aksine seri direncin etkisi ihmal edildiğinde iletkenlik eğrilerinde azalmalar gözlenir (Şekil 4.7) ve yaklaşık 1.45V civarında bir pik oluşur. Yapıya pozitif voltaj uygulandığında belli bir değerden sonra bu voltaj arayüzey, tüketim bölgesi ve seri direnç tarafından paylaşılır ve pik oluşmasının nedeni bu duruma atfedilir. Görüldüğü üzere seri direnç etkisi özellikle yüksek frekanslarda C_m -V ve G_m -V eğrileri üzerinde oldukça etkilidir ve bu yüzden hesaplamalarda dikkate alınmalıdır [50].

Arayüzey katkılı olsun ya da olmasın, elektronik ve optoelektronikte önemli bir yer teşkil etmeleri sebebiyle Schottky yapılar üzerine oldukça fazla çalışma ve araştırma yapılmaktadır. Bunun yanında özellikle tez konumuzun da numunesi olan polimer arayüzey katkılı Schottky diyotlar klasik arayüzey katkılı (SiO_2 vb.) yapılara kıyasla sahip oldukları önemli avantajlar sayesinde araştırmacılar tarafından ayrı bir ilgi alanı olarak değerlendirilmektedir.

Bahsettiğimiz teorik bilgiler, yaptığımız ölçümler ve elde ettiğimiz veriler ışığında;

- Hem suda hem de birçok organik çözücüde iyi çözünabilirliği, toksik olmayan karakterleri, yüksek yük depolayabilme kapasiteleri, benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikleri, cihaz performansını ve güvenilirliğini önemli ölçüde etkileyen arayüzey durumlarını en aza indirmeleri sayesinde polimer yapılar, özellikle de polivinilpirolidonun (PVP) arayüzey olarak kullanılabileceği,
- Bunun yanında polimerin iletkenliği arttırmak için içerisine metal veya metal bileşikleri (NiS gibi) katkılanmış organik polimerler kullanmanın, sızıntı akımlarını ve metal-

yarıiletken arasındaki reaksiyonları bloke eden yüksek yalıtım özellikleri sayesinde oldukça önemli olacağı,

- Elde edilen C-V, G/ω -V, R_i -V, C-ln(f) ve G/ω -ln(f) eğrileri üzerinden anlaşılacağı gibi arayüzey durumlarının (N_{ss}) ve seri direncin (R_s) bu değerler (C ve G/ω) üzerinde oldukça önemli bir etkisinin olduğu ve dolayısıyla diyot performansını önemli ölçüde etkileyeceği,
- Au/(NiS:PVP)/n-Si Schottky yapısının göstermiş olduğu iyi elektrofiziksel özellikler sayesinde elektronik cihazlarda tercih edilebileceği,

öneri olarak sunulmaktadır.





KAYNAKLAR

1. Seebeck, T.J. (1822). *Magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperaturdifferenz*. Berlin: Abhandl Deut Akad Wiss, 265.
2. Faraday, M. (1833). *Experimental researches in electricity*. London: Bernard Quaritch, 433.
3. Braun, F. (1874). Über die Stromleitung durch Schwefelmetalle. *Annual Review of Physical Chemistry*, 53, 556.
4. Sharma, B.L. (1984). *Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications*. New York: Plenum Press.
5. Schottky, W. Stromer, R., and Waibel, F. (1931). *Hochfrequenztechnik*, 37, 162-165.
6. Schottky, W. (1938). Halbleitertheorie der Sperrschicht. *Naturwissenschaften*, 26, 843.
7. Mott, N.F. (1938). Note on the contact between a metal and an insulator or semiconductor, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 34(4), 568–572.
8. Rhoderick, R. H., and Williams, E.H. (1988). *Metal-Semiconductor Contacts*. London: Oxford University Press.
9. Bethe, H.A. (1942). *Theory of the boundary layer of crystal rectifiers*. Cambridge: MIT Radiation Laboratory.
10. Salimi, K., Atilgan, A., Aydin, M.Y., Yildirim, H., Celebi, N., and Yildiz, A. (2019). Plasmonic mesoporous core-shell Ag-Au@TiO₂ photoanodes for efficient light harvesting in dye sensitized solar cells. *Solar Energy*, 193, 820–827.
11. Huang, Z., Carey, J.E., Liu, M., Guo, X., Mazur, E., and Campbell, J.C. (2006). Microstructured silicon photodetector. *Applied Physics Letters*, 89(3), 033506.
12. Yang Yang, Qiangqiang Meng, Xiaoliang Jiang, Sugang Meng, Xiuzhen Zheng, Sujuan Zhang, Xianliang Fu, and Shifu Chen (2020). Photocatalytic Performance of NiS/CdS Composite with Multistage Structure. *ACS Appl. Energy Mater*, 3, 7736–7745.
13. Sze, S.M. (1981). *Physics of Semiconductor Devices*. New York: Willey, 362–380.
14. Bülbül, M.M., Zeyrek, S., Altındal, Ş., and Yüzer, H. (2006). On the profile of temperature dependent series resistance in Al/Si₃N₄/p-Si (MIS) Schottky diodes. *Microelectronic Engineering*, 83(3), 577–581.
15. Güçlü, Ç.Ş., Özdemir, A.F., Karabulut, A., Kökce, A., and Altındal, Ş. (2019). Investigation of temperature dependent negative capacitance in the forward bias C-V characteristics of (Au/Ti)/Al₂O₃/n-GaAs Schottky barrier diodes (SBDs). *Materials Science in Semiconductor Processing*, 89, 26–31.

16. Demirezen, S., Orak, I., Azizian-Kalandaragh, Y., and Altındal, Ş. (2017). Series resistance and interface states effects on the C–V and G/w–V characteristics in Au/(Co₃O₄-doped PVA)/n-Si structures at room temperature. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(17), 12967–12976.
17. Kanbur, H., Altındal, Ş., and Tataroğlu, A. (2005). The effect of interface states, excess capacitance and series resistance in the Al/SiO₂/p-Si Schottky diodes. *Applied Surface Science*, 252(5), 1732–1738.
18. Sevgili, Ö., Taşçıoğlu, İ., Boughdachi, S., Azizian-Kalandaragh, Y., and Altındal, Ş. (2019). Examination of dielectric response of Au/HgS-PVA/n-Si (MPS) structure by impedance spectroscopy method. *Physica B: Condensed Matter*, 566, 125–135.
19. Zhang, L., and Cheng, Z.-Y. (2011). Development of Polymer-Based 0–3 Composites With High Dielectric Constant. *Journal of Advanced Dielectrics*, 01(04), 389–406.
20. Gündüz, B., Yahia, I. S., and Yakuphanoglu, F. (2012). Electrical and photoconductivity properties of p-Si/P3HT/Al and p-Si/P3HT:MEH-PPV/Al organic devices: Comparison study. *Microelectronic Engineering*, 98, 41–57.
21. Azizian-Kalandaragh, Y., Farazin, J., Altındal, Ş., Asl, M.S., Pirgholi-Givi, G., Delbari, S.A., and Namini, A.S. (2020). Electrical and dielectric properties of Al/(PVP: Zn-TeO₂)/p-Si heterojunction structures using current–voltage (*I–V*) and impedance-frequency (*Z–f*) measurements. *Applied Physics A*, 126, 635.
22. Altındal, Ş., Farazin, J., Pirgholi-Givi, G., Maril, E., and Azizian-Kalandaragh, Y. (2020). The effects of (Bi₂Te₃–Bi₂O₃–TeO₂-PVP) interfacial flm on the dielectric and electrical features of Al/p-Si (MS) Schottky barrier diodes (SBDs). *Physica B: Condensed Matter*, 582, 411958.
23. Heeger, A. J. (2001). Semiconducting and Metallic Polymers: The Fourth Generation of Polymeric Materials (Nobel Lecture). *Angewandte Chemie International Edition*, 40(14), 2591–2611.
24. Altındal, Ş., Sarı, B., Ünal, H.I., and Yavaş, N. (2009). Electrical characteristics of Al/polyindole Schottky barrier diodes. I. Temperature dependence. *Journal of Applied Polymer Science*, 113(5), 2955–2961.
25. Brütting, W., and Adachi, C. (2012). *Physics of Organic Semiconductors, 2nd completely new revised edition*. New York: Published by Wiley-VCH.
26. Peng, L., Ji, X., Wan, H., Ruan, Y., Xu, K., Chen, C., Miao, L., and Jiang, J. (2015). Nickel Sulfide Nanoparticles Synthesized by Microwave-assisted Method as Promising Supercapacitor Electrodes: An Experimental and Computational Study. *Electrochimica Acta*, 182, 361–367.
27. Li, Y., Ye, K., Cheng, K., Yin, J., Cao, D., and Wang, G. (2015). Electrodeposition of nickel sulfide on graphene-covered make-up cotton as a flexible electrode material for high-performance supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 274, 943–950.
28. Ye, Q., and Chi, C. (2011). Conjugated Polymers for Organic Solar Cells. *Solar Cells New Aspects and Solutions*, Croatia: InTech, 452–474.

29. Güneş, S., Neugebauer, H., and Sarıçiftci, N.S. (2007). Conjugated Polymer-Based Organic Solar Cells. *Chemical Reviews*, 107(4), 1324-1338.
30. Yükseltürk, E. (2016). *Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky Engel Diyotların Elektriksel ve Dielektrik Özelliklerinin Frekansa Sıcaklığa ve Aydınlanma Şiddetine Bağlı İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-26.
31. Tecimer, H. U., Alper, M. A., Tan, S. O., and Altındal, Ş. (2018). Integration of Zn-doped organic polymer nanocomposites between metal semiconductor structure to reveal the electrical qualifications of the diodes. *Polymer Bulletin*, 75, 4257-4271.
32. Taşcıoğlu, İ., Sevgili, Ö., Azizian-Kalandaragh, Y., and Altındal, Ş. (2020). Frequency-Dependent Admittance Analysis of Au/n-Si Structure with CoSO₄-PVP Interfacial Layer, *Electronic Materials*, 49(6), 3720-3727.
33. Pirgholi-Givi, G., Altındal, Ş., Asl, M. S., Namini, A. S., Farazin, J., and Azizian-Kalandaragh, Y. (2021). The effect of cadmium impurities in the (PVP-TeO₂) interlayer in Al/p-Si (MS) Schottky barrier diodes (SBDs): Exploring its electrophysical parameters, *Physica B: Condensed Matter*, 604, 412617.
34. Alptekin, S., and Altındal, Ş. (2019). A comparative study on current/capacitance: voltage characteristics of Au/n-Si (MS) structures with and without PVP interlayer. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 6491-6499.
35. Sevgili, Ö. (2020). *Au/(Ag-ZnO/PVP)/n-Si (MPS) Schottky Engel Diyotların Hazırlanması ve Elektrik ile Dielektrik Özelliklerinin Frekans ve Voltaja Bağlı İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 30.
36. Schroder, D.K. (2006). *Semiconductor Material and Device Characterization*. New York: A Wiley-Interscience Publication, 128-129.
37. Ludeke, R., Chang, L.L., and Esaki, L. (1973). *Applied Physics Letters*, 23, 202.
38. Neamen, D.A. (2011). *Semiconductor Physics And Devices: Basic Principles*. New York: McGraw-Hill.
39. Kao, W.-C. (2015). *Characterization of Interface State in Silicon Carbide Metal Oxide Semiconductor Capacitors* (Doctoral dissertation, Arizona State University, 2015).
40. Nicollian, E.H., and Goetzberger, A. (1967). The Si-SiO₂ Interface – Electrical Properties as Determined by the Metal-Insulator-Silicon Conductance Technique. *The Bell System Technical Journal*, 46, 1055–1133.
41. Nicollian, E.H., and Brews, J.R. (1982). *Metal oxide semiconductor (MOS) physics and technology*. New York: Wiley Classics Library, 257–264.
42. Schmidt, R., Mayrhofer P., Schmid, U., and Bittner, A. (2019). Impedance Spectroscopy of Al/AlN/n-Si metal-insulator-semiconductor (MIS) structures. *Journal of Applied Physics*, 125, 084501.

43. Haddara, H. S., and El-Sayed, M. (1988). Conductance technique in MOSFETs: Study of interface trap properties in the depletion and weak inversion regimes. *Solid-State Electronics*, 31(8), 1289-1298.
44. Akbaş, A. M., Çiçek, O., Altındal, Ş., and Azizian-Kalandaragh, Y. (2021). Frequency response of C-V and G/w-V characteristics of Au/(Nanographite-doped PVP)/n-Si structures. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 993-1006.
45. Peng, L., Ji, X., Wan, H., Ruan, Y., Xu, K., Chen, C., Miao, L., and Jiang, J. (2015). Nickel sulfide nanoparticles synthesized by microwave-assisted method as promising supercapacitor electrodes: an experimental and computational study. *Electrochimica Acta*, 182, 361-367.
46. Rathinamoorthy, R. (2019). Performance analysis of Polyvinylpyrrolidone. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 31(5), 619–629.
47. Tataroğlu, A., Altındal, Ş., and Azizian-Kalandaragh, Y. (2020). C-V-f and G/ω-V-f characteristics of Au/(In₂O₃-PVP)/n-Si (MPS) structure, *Physica B: Physics of Condensed Matter*, 582, 411996.
48. Altındal Yeriskin, S. (2019). The investigation of effects of (Fe₂O₄-PVP) organic-layer, surface states, and series resistance on the electrical characteristics and the sources of them, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 17032-17039.
49. Altındal, Ş., Sevgili, Ö., and Azizian-Kalandaragh, Y. (2019). The structural and electrical properties of the Au/n-Si (MS) diodes with nanocomposites interlayer (Ag-Doped ZnO/PVP) by using the simple ultrasound-assisted method. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 66, 7.
50. Ulusoy, M., Altındal, Ş., Durmuş, P., Özçelik, S., and Azizian-Kalandaragh, Y. (2021). Frequency and voltage-dependent electrical parameters, interface traps, and series resistance profile of Au/(NiS:PVP)/n-Si structures. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 13693-13707.



GAZİ GELECEKTİR..