T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ZnO NANOÇUBUK TEMELLİ MOS YAPILAR ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

MERVE KARASÜLEYMANOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PROF. DR. AHMET TOLGA TAŞÇI

OCAK - 2021
KASTAMONU

TEZ ONAYI

Merve KARASÜLEYMANOĞLU tarafından hazırlanan "**ZnO Nanoçubuk Temelli MOS Yapılar Üretimi ve Karakterizasyonu**" adlı tez çalışmasının savunma sınavı **15.01.2021** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Prof. Dr. Ahmet Tolga TAŞÇI Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Osman ÇİÇEK Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Serhat Orkun TAN Karabük Üniversitesi	.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü Prof. Dr. İzzet ŞENER .....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Merve KARASÜLEYMANOĞLU

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ZnO NANOÇUBUK TEMELLİ MOS YAPILAR ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

MERVE KARASÜLEYMANOĞLU

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN:PROF. DR. AHMET TOLGA TAŞÇI

Bu çalışmada ZnO nanoçubuk temelli Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapıların üretimi gerçekleştirildi. Üretilen MOS yapıların elektriksel özellikleri karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altında oda sıcaklığında akım-voltaj (I-V), 10 kHz frekans değerinde kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri ile incelendi. Bu ölçümlerden ve C^{-2}-V eğrilerinden kurulma voltajı (V_o), sıfır beslem potansiyel engel yüksekliği (Φ_{Bo}), tükenim tabakası genişliği (W_D) idealite faktörü (n) gibi parametreler hesaplandı. I-V verilerinden artan aydınlatma şiddeti ile birlikte Φ_{Bo} değerleri azalırken n değerlerinin arttığı görüldü. MOS yapıların R_s değerleri Ohm yasası ve Cheung yöntemi ile I-V verilerinden elde edildi ve karşılaştırıldı. R_s değerlerinin artan aydınlatma şiddeti ile azaldığı gözlendi. C-V ölçümlerinden; MOS yapılar üzerindeki arayüzey durumları ve yüklerin etkisi, seri direnç etkisi, başlıca üç çalışma bölgesi olan yığılım, tüketim ve terslenim bölgeleri, grafiklerde görülen piklerin neden olduğu durumlar incelendi. Ayrıca yapıların -6 V'da optoelektriksel özellikleri incelendi. Duyarlılık ve foto-duyarlılık verileri değerlendirildi. Son olarak MOS yapıların taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile nanoçubukların çapı ve dizilişi incelendi.

ANAHTAR KELİMELER: p-Si, ZnO, MOS yapılar, nanoçubuk, I-V, C-V, SEM

Ocak 2021, 71 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

THE ZnO NANOROD BASED MOS STRUCTURES PRODUCTION AND CHARACTERIZATION

MERVE KARASÜLEYMANOĞLU

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
SUPERVISOR:PROF. DR. AHMET TOLGA TAŞÇI

In this study, ZnO nanorod based Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al metal-oxide-semiconductor (MOS) structures were produced. The electrical properties of the MOS structures produced are current-voltage (I-V) at room temperature under dark and different illumination intensities, capacitance-voltage (C-V) and conductivity-voltage (G/ω-V) measurements at a frequency of 10 kHz were examined. From these measurements and C^{-2}-V curves, parameters such as built-in voltage (V_o), zero bias potential barrier height (Φ_{Bo}), depletion layer width (W_D) ideality factor (n) were calculated. It was seen from I-V data that with increasing illumination intensity, Φ_{Bo} values decreased while n values increased. R_s values of MOS structures were obtained from I-V data by Ohm's law, Cheung and Cheung method and compared. It was observed that R_s values decreased with increasing illumination intensity. From C-V measurements; Interface states on MOS structures and the effect of loads, series resistance effect, accumulation, depletion and inversion regions which are the three main regions, and the conditions caused by peaks in the graphs were examined. In addition, optoelectrical properties of structures at -6 V were examined. Responsivity and photo-sensitivity datas were evaluated. Finally, the diameter and arrangement of the nanorods of the MOS structures were examined by scanning electron microscopy (SEM).

KEYWORDS: p-Si, ZnO, MOS structures, nanorod, I-V, C-V, SEM

January 2021, 71 Page

TEŞEKKÜR

Öncelikle Yüksek Lisans çalışmalarım süresince değerli yardımları ve destekleri ile çalışmalarımda engin bilgileriyle beni yönlendiren çok değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet Tolga TAŞÇI (Kastamonu Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Öğretim Üyesi)'ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübesi ile bizlere destek olan ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Özgür ÖZTÜRK (Kastamonu Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölüm Başkanı)'e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca Yüksek Lisans çalışmalarımın her safhasında bilgilerini sunan ve beni yönlendiren hocam Sayın Doç. Dr. Osman ÇİÇEK (Kastamonu Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Öğretim Üyesi)'e, laboratuvar çalışmalarımda bana her konuda yardımcı olan hocam Sayın Öğr. Gör. Sedat KURNAZ (Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Öğretim Üyesi)'a ve bilgileriyle bana katkı sağlayan hocam Sayın Doç. Dr. Elif AŞIKUZUN (Kastamonu Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanı)'a teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan ve yardımlarıyla bana destek olan değerli arkadaşım Bilge Merve CANDAN'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışması Kastamonu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetimi Koordinatörlüğü KÜ-BAP01/2019-36 ve KÜ-BAP01/2018-106 nolu projeler ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Kastamonu Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Bana hayatım boyunca destek olan değerli aileme minnettarım.

Merve KARASÜLEYMANOĞLU

Kastamonu, 2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI ..... **ii**
TAAHHÜTNAME ..... **iii**
ÖZET ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **viii**
TABLOLAR DİZİNİ ..... **x**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xi**
1. GİRİŞ **1**
2. METAL-YARIİLETKEN (MS) KONTAKLAR **5**
2.1 Metal/p-tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontak Oluşumu 6
2.2 Metal/p-tipi Yarıiletken Omik Kontak Oluşumu 8
3. METAL-OKSİT-YARIİLETKEN (MOS) YAPILAR **11**
3.1 İdeal MOS Yapı 12
3.1.1 Yığılım 17
3.1.2 Tüketim 18
3.1.3 Terslenim 19
3.2 Gerçek MOS Yapı 20
3.2.1 Arayüzey Durumları 22
3.2.2 Sabit Oksit ve Arayüzey Yükleri 22
3.2.3 Hareketli İyonik Yük 23
3.2.4 Oksitte Tuzaklanmış Yük 23
4. YÖNTEM **24**
4.1 ZnO Tabakasının Özellikleri 24
4.2 Yarıiletken Si Malzemenin Özellikleri 26
4.3 Radyo-Frekans (RF) Püskürtme Yöntemi 29
4.4 Hidrotermal Yöntemle Nanoyapıların Sentezlenmesi 31
4.5 Kristal Temizleme 33
4.6 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al Tipi MOS Yapının Hazırlanması 33
4.7 Deneysel Ölçüm Sistemi 36
4.7.1 Akım-Voltaj Ölçüm Sistemi 36
4.7.2 Kapasitans-Voltaj ve İletkenlik-Voltaj Ölçüm Sistemi 37
5. BULGULAR **39**
5.1 Aydınlatma Şiddetine Bağlı Akım-Voltaj Karakteristikleri 39
5.2 Kapasitans-Voltaj ve İletkenlik-Voltaj Karakteristikleri 50
5.3 Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi (SEM) 58
6. SONUÇ VE ÖNERİLER **60**
KAYNAKLAR **65**
ÖZGEÇMİŞ **71**

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontağa ait enerji bant diyagramları a) Kontak yapılmadan önce enerji bant diyagramı b) Kontak yapıldıktan sonra termal denge durumunda enerji bant diyagramı 7
Şekil 2.2 Metal/p-tipi yarıiletken omik kontağa ait enerji bant diyagramları a) Kontaktan sonra ısıl dengedeki enerji bant diyagramı b) V<0 durumunda enerji bant diyagramı c) V>0 durumunda enerji bant diyagramı 9
Şekil 3.1 Bir MOS (metal-oksit-yarıiletken) yapının şematik gösterimi 11
Şekil 3.2 V=0'da ideal bir MOS yapının enerji-bant diyagramı a) n-tipi yarıiletken b) p-tipi yarıiletken 13
Şekil 3.3 V≠0'da bir MOS yapının enerji-bant diyagramı (p-tipi yarıiletken için) 15
Şekil 3.4 MOS yapı kapasitansının eşdeğer devresi 16
Şekil 3.5 p-tipi bir MOS yapının yığılım durumu enerji-bant diyagramı 18
Şekil 3.6 p-tipi bir MOS yapının tüketim durumu enerji-bant diyagramı 19
Şekil 3.7 p-tipi bir MOS yapının terslenim durumu enerji-bant diyagramı 20
Şekil 3.8 İdeal bir MOS yapının devre şeması a) Yığılım b) Tüketim ve c) Terslenim 20
Şekil 3.9 İdeal olmayan MOS yapıda arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması 22
Şekil 4.1 ZnO hekzagonal kristal yapısı 25
Şekil 4.2 Silisyum <111> kristal düzlemi 26
Şekil 4.3 Düzenli bir yapıda Silisyum atomlarının bağlanması 27
Şekil 4.4 n-tipi ve p-tipi yarıiletkende elektron ve deliklerin akışı 28
Şekil 4.5 RF püskürtme ile kaplanan filmin şematik gösterimi 30
Şekil 4.6 Hidrotermal yöntem ile nanoyapıların sentezlenme şeması 32
Şekil 4.7 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapının şematik gösterimi 34
Şekil 4.8 Üretilen MOS yapıların enerji bant diyagramı 35
Şekil 4.9 Deneysel ölçüm sistemi 36
Şekil 4.10 Keithley 2400 cihazı 37
Şekil 4.11 Sciencetech SF300A solar simülatörü 37
Şekil 4.12 Wayne Kerr 6500B empedans analizörü 38
Şekil 5.1 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde I-V karakteristikleri 42
Şekil 5.2 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların karanlıktaki Φ_{Bo} ve n değerleri 44
Şekil 5.3 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS tipi yapıların karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde R_i-V karakteristikleri 45
Şekil 5.4 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde dV/dln(I)-I grafikleri 46
Şekil 5.5 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde H(I)-I grafikleri 47

Şekil 5.6 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların a) Aydınlatma şiddetine bağlı duyarlılık grafiği b) log(I_{ph})-logP grafiği 49
Şekil 5.7 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların 10 kHz'de C-V eğrileri 51
Şekil 5.8 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların 10 kHz'de G/ω-V eğrileri 53
Şekil 5.9 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların 10 kHz'de C^{-2}-V eğrileri 54
Şekil 5.10 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların 10 kHz'de R_s-V eğrileri 57
Şekil 5.11 ZnO nanoçubukların SEM görüntüleri a) PD_{10-2} b) PD_{10-4} c) PD_{20-2} d) PD_{20-3} e) PD_{20-4} 58

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1 Doğrultucu ve omik kontak oluşumu 6
Tablo 3.1 MOS yapının fiziksel parametreleri 13
Tablo 4.1 Üretim aşamalarına göre numuneler 35
Tablo 5.1 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların aydınlatma şiddetine bağlı elektriksel parametreleri 43
Tablo 5.2 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların -6 V'da hesaplanan optoelektriksel cihaz parametreleri 49
Tablo 5.3 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların 10 kHz'de C^{-2}-V eğrisinden hesaplanan elektriksel parametreleri 55
Tablo 6.1 Nanoçubuk temelli yapıların karşılaştırılması ve oda sıcaklığında karanlıktaki I-V ölçümlerinden elde edilen temel elektriksel parametreleri 62
Tablo 6.2 Fotodiyotların 100 mW/cm^2'de hesaplanan parametrelerinin karşılaştırılması 63

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	**:** Doğrultucu kontak alanı
Å	**:** Angstrom
$\mathbf{A^*}$	**:** Richardson sabiti
$\mathbf{A_{ox}}$	**:** Oksit tabakanın alanı
C	**:** Kapasitans
$\mathbf{C_m}$	**:** Kuvvetli yığılım bölgesindeki kapasitans
$\mathbf{C_{ox}}$	**:** Oksit tabakanın kapasitansı
$\mathbf{C_{sc}}$	**:** Uzay yükü kapasitansı
$\mathbf{d_{ox}}$	**:** Oksit kalınlığı
$\mathbf{E_F}$	**:** Fermi enerjisi
$\mathbf{E_g}$	**:** Yasak enerji aralığı
$\mathbf{E_i}$	**:** Saf Fermi enerjisi
$\mathbf{E_m}$	**:** Maksimum elektrik alanı
$\mathbf{E_v}$	**:** Değerlik (valans) bant kenarı enerjisi
$\boldsymbol{\varepsilon_{ox}}$	**:** Oksit dielektrik sabiti
$\boldsymbol{\varepsilon_s}$	**:** Yarıiletken dielektrik sabiti
$\mathbf{G_m}$	**:** Kuvvetli yığılım bölgesindeki kondüktans
Hz	**:** Frekans birimi (Hertz)
$\mathbf{I_{dark}}$	**:** Karanlık akımı
$\mathbf{I_F}$	**:** Doğru ön-gerilim altındaki akım
$\mathbf{I_o}$	**:** Doyum akımı
$\mathbf{I_{ph}}$	**:** Foto akımı
$\mathbf{I_R}$	**:** Ters ön-gerilim altındaki akım
k	**:** Boltzmann sabiti
$\mathbf{m_e^*}$	**:** Etkin elektron kütlesi
$\mathbf{m_o}$	**:** Serbest elektron kütlesi
n	**:** İdealite faktörü
$\mathbf{N_A}$	**:** Alıcı katkı atomların yoğunluğu
$\mathbf{N_c}$	**:** İletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu
$\mathbf{N_D}$	**:** Verici katkı atomların yoğunluğu
$\mathbf{N_{ss}}$	**:** Arayüzey durum yoğunluğu
$\mathbf{N_v}$	**:** Değerlik bandındaki durumların yoğunluğu
q	**:** Elektron yükü
$\mathbf{Q_m}$	**:** Hareketli iyonik yük
$\mathbf{Q_{sc}}$	**:** Uzay yükü
$\mathbf{R_i}$	**:** Yapı direnci
$\mathbf{R_s}$	**:** Seri direnç
$\mathbf{R_{sh}}$	**:** Kısa devre direnci
T	**:** Mutlak sıcaklık
V	**:** Voltaj
$\mathbf{V_d}$	**:** Difüzyon potansiyeli
$\mathbf{V_G}$	**:** Metal plakaya uygulanan gerilim
$\mathbf{V_o}$	**:** Kurulma voltajı

V_{ox}	: Oksit üzerine düşen gerilim
V_R	: Ters ön-gerilim
ω_d	: Tükenim tabakası genişliği
Φ_B	: Potansiyel engel yüksekliği
Φ_{Bo}	: Sıfır beslem potansiyel engel yüksekliği
Φ_m	: Metal iş fonksiyonu
Φ_s	: Yarıiletken iş fonksiyonu
δ	: Aydınlatma katsayısı
$\Delta_{\Phi B}$	: İmaj kuvveti engel yüksekliğinin düşmesi
Ω	: Ohm
χ	: Elektron ilgisi
ψ_B	: Fermi ile saf Fermi enerji seviyesi arasındaki fark

Kısaltmalar

ac	: Alternatif akım
Ag	: Gümüş
Al	: Alüminyum
Ar	: Argon
Au	: Altın
BH	: Engel yüksekliği
C-V	: Kapasitans-voltaj
C_2H_5OH	: Etil alkol
dc	: Doğru akım
eV	: Elektron-volt
GaAs	: Galyum Arsenit
Ge	: Germanyum
G/ω-V	: İletkenlik-voltaj
HMTA	: Hekzametilen tetramin
I-V	: Akım-voltaj
K	: Potasyum
kΩ	: Kilo ohm
LED	: Işık yayan diyot
MESFET	: Metal-yarıiletken alan etkili transistör
MIS	: Metal-yalıtkan-yarıiletken
mM	: Milimolar
MOS	: Metal-oksit-yarıiletken
MOSFET	: Metal-oksit-yarıiletken alan etkili transistör
MPS	: Metal-polimer-yarıiletken
MS	: Metal-yarıiletken
Na	: Sodyum
NRs	: Nanoçubuklar
OLED	: Organik ışık yayan diyot
PD	: Fotodiyot
R	: Duyarlılık
RF	: Radyo-frekans

rpm	**:** Dakikadaki devir sayısı
SEM	**:** Taramalı elektron mikroskobu
SBD	**:** Schottky engel diyot
SD	**:** Schottky diyot
Si	**:** Silisyum
SiO_2	**:** Silisyum dioksit
TE	**:** Termiyonik emisyon
UV	**:** Ultraviyole
ZnO	**:** Çinko oksit
XRD	**:** X ışını kırınımı

1. GİRİŞ

Nanoteknoloji uygulamalarında kullanılan nano elektro-mekanik sistemler ve mikro elektro-mekanik sistemler, günümüzde yaygın olarak kullanılan mekanik ve elektrik sistemlerin entegre ve minyatürize versiyonları olup sırasıyla nano ve mikro boyutlardadır. Bu alanlarda oldukça önemli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Mikro elektronik alanında 1950'li yıllarda başlayan çalışmalar genellikle temel devre elemanları üzerine yapılmıştır. Temel devre elemanlarında yarıiletken malzeme olarak Silisyum (Si) ve Germanyum (Ge) önemli ölçüde kullanılmıştır. İleriki dönemlerde ise kolay elde edilişi ve doğada bol miktarda bulunması gibi birçok avantajından dolayı Silisyum kullanımı hâkim olmuştur. Ayrıca Galyum Arsenit (GaAs), İndiyum Fosfür (InP) vb. yarıiletkenlerde kullanılmaktadır (Nurtan, 2010).

Bir doğrultucu metal-yarıiletken kontağın engel oluşumuna dair modeli ilk defa öneren W. Shottky'ye atfen Schottky engel olarak bilinir. 1960'larda Schottky engel diyotları üzerinde yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarında büyük bir canlanma görüldü. Bu etkinlik, büyük ölçüde yarıiletken teknolojisindeki metal kontakların öneminden esinlenmiştir. Bu gelişmenin bir sonucu olarak, Schottky engellerinin başka uygulama alanları ortaya çıktı. 1970'lerdeki çalışmalar esas olarak iki yönlü olmuştur. İlk olarak, araştırma ve geliştirme çalışmalarından elde edilen bilgiler, Schottky engellerini kullanan cihazların endüstriyel üretiminde kullanılmıştır. İkinci olarak, metal-yarıiletken arayüzeyinin daha eksiksiz bir şekilde anlaşılması için yoğun çabalar sarf edilmiştir (Sharma, 1984).

Metal-yarıiletken kontaklar, yarıiletken tabanlı devre elemanlarının üretiminde önemli bir fonksiyona sahiptirler. Elektronik ve elektro optik sistemlerin devre elemanları teknolojisinde çok önemli işleve sahiptir. Bu kontaklar; güneş hücreleri, metal yarıiletken alan etkili transistörler, Schottky diyotlar, mikrodalga devre elemanları ve yarıiletken foto-dedektörler gibi birçok kullanım alanına sahiptir (Akın, 2015).

Metal-yarıiletken (MS), metal-oksit-yarıiletken (MOS) veya metal-polimer-yarıiletken (MPS) tipi Schottky engel diyotları yarıiletken endüstrisinde çok yaygın

olarak kullanılan temel yapılardır. Bu yapıların deneysel ve teorik çalışmaları çok sayıda yapılmış ve günümüzde yoğunluk kazanmıştır. Yapılarda kullanılan malzemelerin maliyetinin düşük, üretim aşamalarının kolay olması gibi önemli özelliklerinden dolayı bu yapılar, elektronik ve optoelektronik cihaz üretiminde oldukça geniş kullanım alanlarına sahiptirler (Uslu, 2010). Bu yapılar güneş hücreleri, hızlı anahtar (switching) uygulamaları, Schottky diyotlar (SD), metal-yarıiletken alan etkili transistörler (MESFET), metal-oksit-yarıiletken alan etkili transistörler (MOSFET), organik ışık yayan diyot (OLED) ve birçok elektronik devre elemanlarının temelini oluşturmaktadır (Çetinkaya, 2011).

MOS yapısı İlk defa 1959'da Moll, Pfann ve Garrett tarafından voltaj kontrollü varistör (değişken kapasitör) olarak önerildi. Daha sonra özellikleri Frankl ve Lindner tarafından analiz edildi. İlk başarılı MOS yapısı yapıldı. Silisyum dioksit (SiO_2), 1960 yılında Ligenza ve Spitzer tarafından Si yarıiletkeni üzerinde termal olarak büyütüldü. Bu çığır açan deneysel başarı, hemen Kahng ve Atalla tarafından MOSFET'in ilk raporuna yol açtı. Bu SiO_2-Si sistemi hakkında daha fazla çalışma Terman ve Lehovec ve Slobodskoy tarafından rapor edildi (Sze ve Kwok, 2007).

Teknolojik açıdan önemli MOS yapılar, ince yalıtkan filmlerin ve yarıiletken yüzeylerin elektriksel özelliklerini incelemede oldukça yaygın olarak kullanılır. Tüm yarıiletken cihazların güvenilirliği ve kararlılığındaki çoğu pratik problem, yüzey koşulları ile yakından ilişkili olduğundan, MOS kapasitörlerinin yardımıyla yüzey fiziğinin anlaşılması, cihaz üretimleri için büyük önem taşımaktadır. Bu yapı, çoğu düzlemsel cihaz ve entegre devrelerle doğrudan ilişkili olduğu için kapsamlı bir şekilde incelenmiştir (Sze ve Kwok, 2007). MOS yapılar, Si alan etkili transistörlerin temel bir yapı taşıdır. Yarıiletken cihaz fiziği üzerine çalışılmış birçok metinde, bu yapıları içeren cihazların elektriksel davranışının ayrıntılı bir açıklamasını verir. Çünkü MOS kapasitör özelliklerinin kalitenin teşhisinde değerli olduğu kanıtlanmıştır (Ohring, 1992).

MOS yapılar metal ile yarıiletken arasında yalıtkan bir tabakanın doğal ya da yapay bir oksidasyon yöntemi yapılarak üretilir. Metal olarak genellikle Altın (Au), Gümüş (Ag) ve Alüminyum (Al) gibi yüksek saflıktaki malzemeler kullanılır. Yalıtkan

tabakada ise SiO_2, Kalay dioksit (SnO_2), Silisyum nitrür (Si_3N_4) ve Titanyum dioksit (TiO_2) gibi malzemeler kullanılır. Metal ile yarıiletken arasına oluşturulan yalıtkan tabaka, metal ve yarıiletkeni birbirinden izole eder ve yük geçişlerini düzenler. MOS yapılarda yarıiletken malzeme olarak daha ucuz, doğada bol bulunur ve kararlı olmasından dolayı genelde Si kullanılır. Optoelektriksel performansı yüksek GaAs yarıiletkeni ise geniş bant aralığına sahip olup fotovoltaik hücreler, tünel diyotları, lazerler ve MESFET gibi yarıiletken teknolojisinde oldukça geniş kullanım alanına sahiptir. MOS yapıların hazırlamasında, yarıiletkenin p-tipi veya n-tipi malzeme özelliğine göre uygun iş fonksiyonu metaller seçilir. Bu şekilde metal ile yarıiletken arasında potansiyel engel yüksekliği oluşturulur (Erbaş Aral, 2010; Baran, 2015).

MOS yapılar, metal ile yarıiletken arasına yalıtkan/oksit bir tabaka içerdiğinden dolayı kapasitörlere benzemektedir. Levhalardan biri metal diğeri yarıiletken olduğundan dolayı asimetrik kondansatör olarak tanımlanabilir. Bu yapı ince yalıtkan filmlerin ve yarıiletken yüzeylerin elektriksel özelliklerini incelemede oldukça yaygın olarak kullanılır. Aradaki yalıtkan tabakanın 500 Å'dan büyük olması durumunda metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılar MOS olarak adlandırılır. Bu yalıtkan tabaka daha ince ise, bu yapılar metal-yalıtkan-yarıiletken tipi Schottky diyotu olarak adlandırılır. MOS/MIS yapıların elektriksel, optoelektriksel ve dielektrik parametreleri genelde sıcaklık, frekans ve voltaja bağlı olarak akım-voltaj (I-V), kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümlerinden hesaplanır.

Bu tez çalışması 6 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, nanoteknoloji uygulamalarında kullanılan sistemler, MS ve MOS gibi yapıların özellikleri, kullanım alanları ve bunların ölçüm parametreleri hakkında bilgi verildi. İkinci bölümde, MS doğrultucu ve omik kontakların yapısı, iş fonksiyonlarının durumu ve enerji bant diyagramları anlatıldı. Üçüncü bölümde, ideal ve gerçek MOS yapıların özellikleri, çalışma bölgeleri, enerji bant diyagramları, arayüzey durumları ve yükleri konuları üzerinde duruldu. Dördüncü bölümde, numunelerin hazırlanma aşamaları, Çinko oksit (ZnO) ve Si malzemelerinin özellikleri, radyo-frekans (RF) püskürtme yöntemi, hidrotermal yöntem ile nano yapı oluşumu ve deneysel ölçüm sistemleri hakkında detaylı bilgi verildi. Beşinci bölümde, akım-voltaj (I-V), kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümlerinden elde edilen veriler ve taramalı

elektron mikroskop analizi (SEM) görüntüleri incelendi. Altıncı bölümde ise elde edilen deneysel sonuçlar değerlendirilip literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılarak gerekli öneriler sunuldu.

2. METAL-YARIİLETKEN (MS) KONTAKLAR

Her yarıiletken cihazda metalden yarıiletkene doğru kontaklar mevcuttur. Düşük dirençli, kararlı kontaklar, entegre devrelerin performansı ve güvenilirliği için kritik öneme sahiptir. Metal-yarıiletken kontaklar bütün yarıiletken tabanlı devre elemanlarının temelini teşkil etmektedir. Bunların hazırlanması ve karakterizasyonu devre imalatında önemlidir.

Metal-yarıiletken kontaklar, entegre devrelerde, ışık dedektörlerinde ve güneş hücrelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle Schottky diyotlarında kullanılmaktadır. Çünkü III–V yarıiletkenlerin teknolojik ve ticari önemi nedeniyle, metal-yarıiletken kontakları hakkında daha fazla çalışma mevcuttur. Bu yapılar aynı zamanda metal-yarıiletken alan etkili transistörlerde, diğer mikrodalga iletişim cihazlarında ve yüksek hızlı mikroelektronik uygulamalarda kullanılır (Göksu vd. 2010).

Bir metal ile yarıiletkenin kontak edilmesiyle arayüzeyin özelliklerine bağlı olarak, bir Schottky engeli veya bir omik kontak olarak davranabilirler. Metal-yarıiletken arasında iki tür kontak oluşturulabilir. Bu kontaklar, lineer olmayan akım-gerilim karakteristiğine sahip doğrultucu kontak (Schottky kontak) ve lineer akım-gerilim karakteristiğine sahip omik kontak olarak adlandırılır. Schottky engelleri diyot benzeri işlev görürken, omik kontaklar uygulanan voltajla doğrusal akım sağlamaktadır.

Metal-yarıiletken Schottky diyotların üretiminde alt (omik) ve üst (doğrultucu) metal kontakların seçimi son derece önemlidir. Metal-yarıiletken kontakta iletkenliği sağlayan yük taşıyıcıları (holler ve elektronlar) bir yönden diğer yöne (metalden yarıiletkene ya da yarıiletkenden metale doğru) daha kolay iletiliyorsa bu davranışa doğrultma denir. Doğrultma oranı diyotun tam iletime geçtiği voltaj değerinde, doğru ön-gerilim altındaki akımın (I_F) ters ön-gerilim altındaki akıma (I_R) oranıdır ve bu oran diyotun kalitesini önemli ölçüde belirler. İdeal diyotlarda doğrultma oranı (I_F/I_R) yaklaşık olarak 10^8-10^{10} civarındadır. Metal ile yarıiletken arasında bir potansiyel

engeli oluşmayan omik kontakta ise yük taşıyıcıları metalden yarıiletkene veya yarıiletkenden metale kolaylıkla geçerler (Uslu, 2010; Çiçek, 2016).

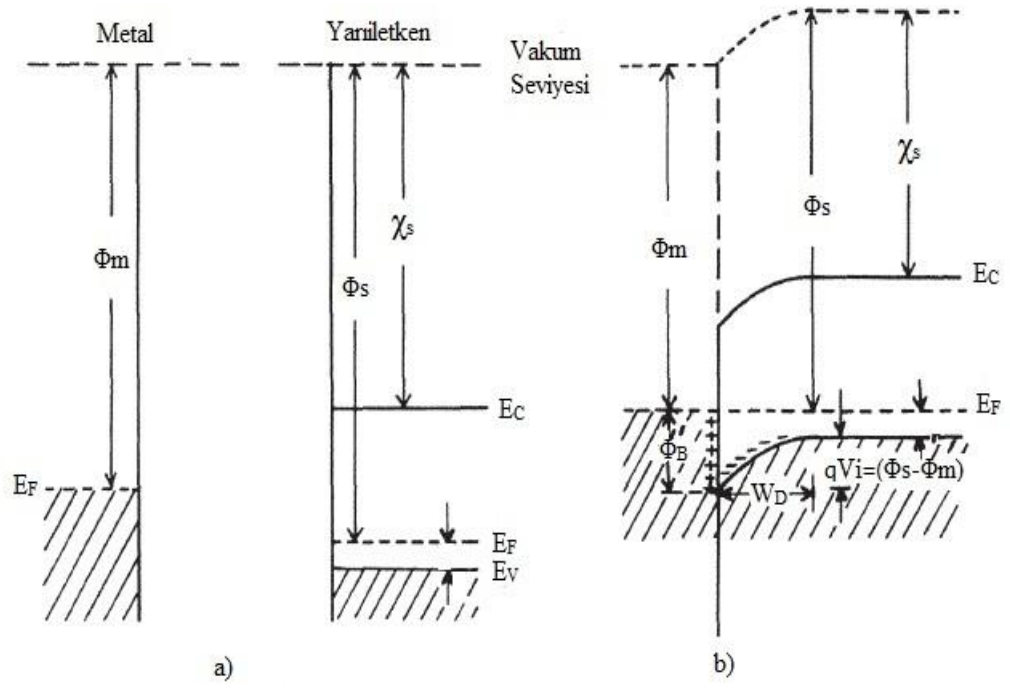
Metal ile yarıiletken kontak edildiğinde aralarındaki iş fonksiyonlarından kaynaklanan potansiyel engel yüksekliği oluşur. Φ_m metalin iş fonksiyonu, Φ_s'de yarıiletkenin iş fonksiyonu olmak üzere, n-tipi metal-yarıiletken kontaklar için $\Phi_m>\Phi_s$ durumunda doğrultucu kontak ve $\Phi_s>\Phi_m$ durumunda ise omik kontak oluşur. p-tipi metal-yarıiletken kontaklarda ise $\Phi_m>\Phi_s$ durumunda omik kontak ve $\Phi_s>\Phi_m$ durumunda ise doğrultucu kontak oluşur. Doğrultucu ve omik kontakların oluşumu n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler için Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 Doğrultucu ve omik kontak oluşumu

Yarıiletken	İş fonksiyonları	Kontak
n-tipi	$\Phi_m>\Phi_s$	Doğrultucu
	$\Phi_s>\Phi_m$	Omik
p-tipi	$\Phi_s>\Phi_m$	Doğrultucu
	$\Phi_m>\Phi_s$	Omik

2.1 Metal/p-tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontak Oluşumu

Akım taşıyıcılarını (boşluk ve elektron) bir doğrultuda diğerine göre daha kolay geçiren kontaklara doğrultucu kontak denir. p-tipi yarıiletkenin ve metalin iş fonksiyonuna göre $\Phi_s>\Phi_m$ durumunda metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontak oluşur. Kontak yapılmadan önce yarıiletkenin Fermi enerji (E_F) seviyesi metalin E_F seviyesinden Φ_s - Φ_m kadar yukarıdadır. Kontak yapıldıktan sonra denge hali oluşana kadar metal ile yarıiletken arasında yük alışverişi olur. Bu yük geçişleri nedeniyle, metal ile yarıiletken arasında bir potansiyel farkı veya doğal bir elektrik alan meydana gelir. Yük geçişleri sonucunda metal ile yarıiletken arasında hareketli yüklerden arınmış yüksek dirençli bir bölge (tüketim tabakası) oluşur. Bu konuda çalışan ilk bilim insanına atfen doğrultucu kontağa Schottky tabakası da denilir (Uslu, 2010; Çetinkaya, 2011). Kontaktan önceki ve kontaktan sonraki durumlar için enerji bant diyagramları Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1 Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontağa ait enerji bant diyagramları a) Kontak yapılmadan önce enerji bant diyagramı b) Kontak yapıldıktan sonra termal denge durumunda enerji bant diyagramı (Sharma, 1984)

Mutlak sıfır sıcaklığında (T = -273 ^{o}C) E_F seviyesi yasak enerji bant aralığının tam ortasındadır. Sıcaklık arttıkça E_F, enerji durumlarının yoğunluğuna (N_c veya N_v) ve katkı atomlarının yoğunluğuna (N_D veya N_A) bağlı olarak, iletim veya valans bandına yaklaşır. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi p-tipi bir yarıiletkenin E_F seviyesi valans bandına yakındır ve valans bandının (E_v) üst kenarından itibaren ölçülür.

Vakum seviyesi, bir metalin tam dışındaki sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesi veya bir elektronu yüzeyden koparmak için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarıdır. Metalin iş fonksiyonu (Φ_m), bir elektronu E_F seviyesinden vakum seviyesine uyarmak veya metalden koparıp serbest hale getirmek için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarıdır. Yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s), yarıiletkenin E_F seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkı veya E_F seviyesindeki bir elektronu vakum seviyesine uyarmak için ihtiyaç duyulan enerji miktarıdır. Elektron ilgisi (χ) ise vakum seviyesi ile iletkenlik bant kenarı arasındaki bir elektronun enerji farkı olarak tanımlanır (Uslu, 2010; Çiçek, 2016).

Yarıiletkenin yüzey tabakasından elektronlar, geride iyonize olmuş pozitif yükler bırakarak metalin içine doğru geçerler. Bu yük alışverişi E_F seviyeleri eşitlenene kadar devam eder. Yarıiletkenin E_F seviyesi, aradaki enerji farkı kadar alçalır ve metalin E_F seviyesiyle aynı düzeye gelir. Yarıiletken tarafındaki uzay yükleriyle (yarıiletkenin yüzey tabakasında kalan iyonize olmuş yükler) metal tarafındaki yüzey yüklerinin oluşturduğu dipol tabakası kontakta bir potansiyel engelinin oluşmasına sebep olur. Bu potansiyel engelinin p-tipi yarıiletken tarafındaki değeri $qV_i = \Phi_s - \Phi_m$ kadardır. Potansiyel engelin metal tarafındaki değeri ise: $e\Phi_B = E_i - \Phi_m$ kadardır. Burada E_i vakum seviyesi ile valans bandının kontak bölgesindeki üst enerji düzeyi arasındaki enerji farkı, Φ_B potansiyel engel yüksekliği ve V_d difüzyon potansiyelidir.

Potansiyel engeli, metal tarafında dik olarak yükselirken yarıiletken tarafında ω_d genişliğine sahiptir. Yarıiletken tarafında elektronlardan arınmış bir bölge oluşur. Bu ω_d genişliğindeki bölgeye engel bölgesi, Schottky bölgesi veya arınma bölgesi denir. Bu bölge pozitif ve negatif yükler arasında kalır ve kapasite özelliğine sahip olduğundan Schottky kapasitesi veya kontak kapasitesi olarak adlandırılır. Schottky kapasitesi bu tabakanın kalınlığına, tabaka kalınlığı da iyonize olmuş verici yoğunluğuna ve dolayısıyla difüzyon potansiyelinin değerine bağlıdır (Ayhan, 2012).

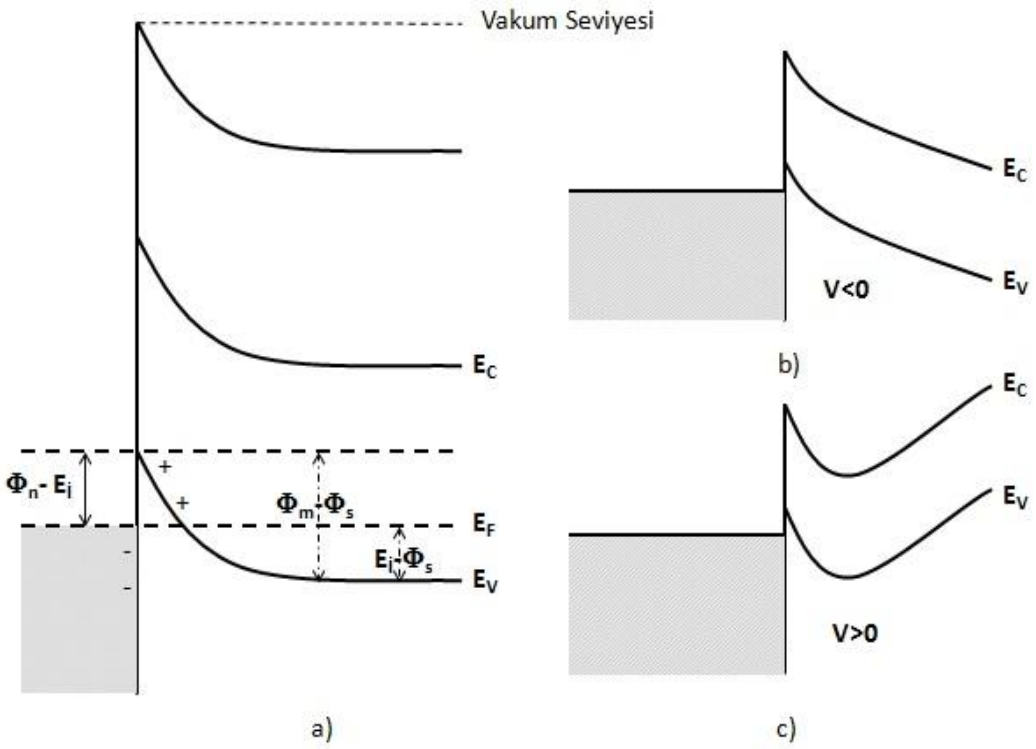
2.2 Metal/p-tipi Yarıiletken Omik Kontak Oluşumu

Birçok elektronik devreler ve cihazlar Schottky veya omik kontak olarak metal-yarıiletken arayüzeyini kullanmaktadırlar. Geçmişte mikro dalga diyotu, radyo ve radar dedektörü olarak geliştirilen metal-yarıiletken yapılar günümüzde metal-yarıiletken alan etkili transistorler gibi aktif elektronik devre elemanlarının yansıra güneş hücreleri, varaktörler ve anahtarlama devreleri gibi birçok alanda geniş kullanım alanına sahiptirler (Tan, 2018).

Bir omik kontak, yarıiletken cihazın toplam direncine göre ihmal edilebilir bir bağlantı direncine sahip bir metal-yarıiletken kontak olarak tanımlanır. Omik kontak, cihaz performansını önemli ölçüde bozmamalıdır. Gerekli akımı, cihazın aktif bölgesindeki düşüşe kıyasla yeterince düşük bir voltaj düşüşü ile sağlayabilir. Her yarıiletken cihazda bağlantı oluşturmak için en az iki metal-yarıiletken kontağa

ihtiyaç vardır. Bu nedenle, yarıiletken cihazlar için iyi bir omik kontak şarttır (Sze ve Kwok, 2007).

Akımı her iki doğrultuda kolayca geçirebilen, elektronların her iki yönde serbest hareket edebildiği kontaklara omik kontak denir. Metalin E_F seviyesi yarıiletkenin E_F seviyesinden (Φ_m - Φ_s) kadar farklıdır. Kontak yapıldıktan sonraki durumlar Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Kontaktan sonra elektronlar yarıiletkenden metalin içine geride pozitif yüzey yükleri bırakarak geçerler ve dolayısıyla kontağın metal tarafında negatif bir yüzey yüküne sebep olurlar. Yük alışverişi bittikten sonra, yarıiletken gövdedeki E_F seviyesi (Φ_m - Φ_s) kadar alçalarak metalin E_F seviyesi ile aynı düzeye gelir. Isısal dengeden sonra kontağın her iki tarafında meydana gelen yüzey yüklerinden dolayı bir dipol tabakası oluşur. Böyle bir kontakta, yük taşıyıcıları metalden yarıiletkene ve yarıiletkenden metale serbestçe geçerler (Çiçek, 2016).



Şekil 2.2 Metal/p-tipi yarıiletken omik kontağa ait enerji bant diyagramları a) Kontaktan sonra ısıl dengedeki enerji bant diyagramı b) V<0 durumunda enerji bant diyagramı c) V>0 durumunda enerji bant diyagramı

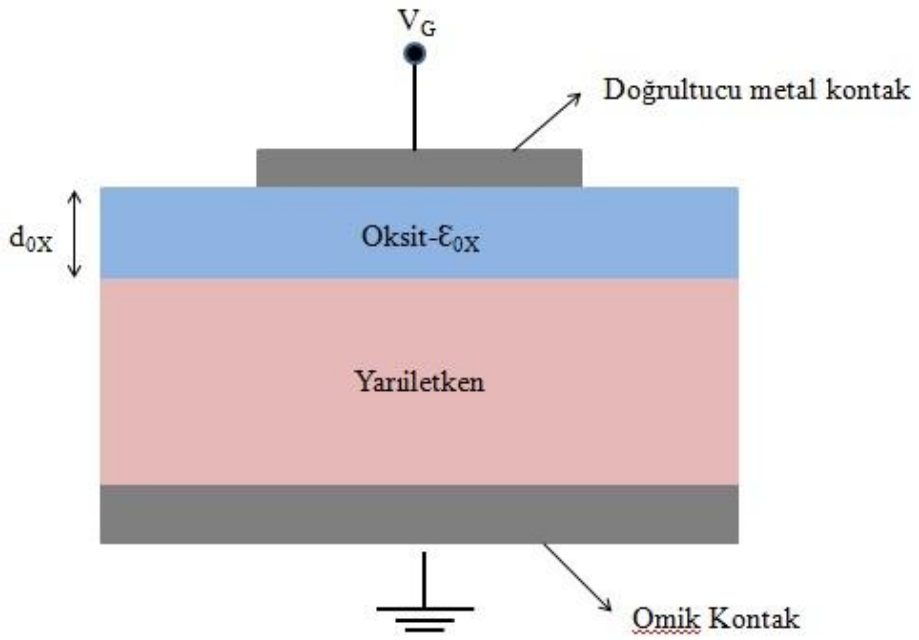
Yarıiletkene negatif ve metal plakaya pozitif bir gerilim uygulandığında, yarıiletkenin valans bandına deşik (hol) geçişi olur. Bundan dolayı omik kontaklar

enjeksiyon kontakları olarak da adlandırılır. Omik kontak oluşturabilmek için p-tipi yarıiletkenin yüzeyine buharlaştırılan metal yarıiletkenle alaşım haline getirilir. Bu şekilde yarıiletkenin yüzeyinde, deşik miktarı yarıiletkenden daha fazla olan bir p^+ tabakası meydana gelir (Çetinkaya, 2011).

3. METAL-OKSİT-YARIİLETKEN (MOS) YAPILAR

Oksit tabakasının dielektrik özelliği sayesinde elektronik devrelerde enerji depolama aracı olarak kullanılan ve modern yarıiletken teknolojisinde temel yapı olan, özellikle yüksek hızlı elektronik, optoelektronik cihazlar için ana bileşen olarak oldukça yaygın kullanılan yapılar olmak üzere metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapıdır (Saghrouni vd. 2015; Acar vd. 2018).

Metal-yalıtkan/oksit-yarıiletken (MIS/MOS) yapıları oluşturmak için, yarıiletken alttaş bir SnO_2, Si_3N_4, TiO_2, SiO_2 gibi yalıtkan/oksit malzeme ile kaplanır ve üzerine doğrultucu metal kontak yerleştirilir. Yarıiletkenin diğer yüzeyine ise ikinci bir metal katman olarak bir omik kontak kaplanır. Bu şekilde MIS/MOS yapıları oluşturulur. Bu yapılar elektriksel ve dielektrik karakteristiğe sahiptir (Gökçen ve Altuntaş, 2009).



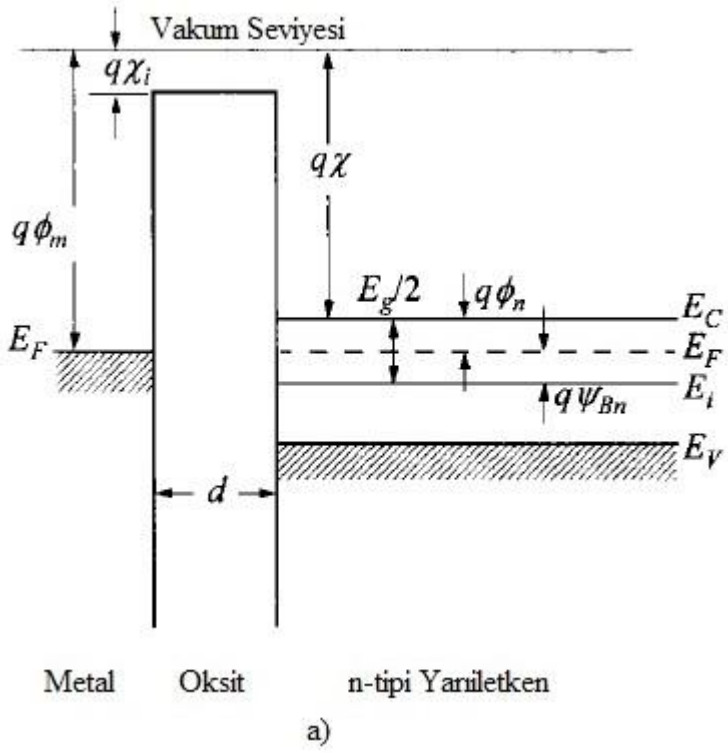
Şekil 3.1 Bir MOS (metal-oksit-yarıiletken) yapının şematik gösterimi

Bir MOS yapının şematik gösterimi Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Burada d_{ox} (oksit) kalınlığı, ε_{ox} oksit (yalıtkan) dielektrik sabiti ve V_G metal plakaya uygulanan gerilimdir. V_G gerilimi metal plaka omik kontağa göre pozitif bir gerilim ile beslendiğinde pozitif, negatif bir gerilimle beslendiğinde negatiftir. Bu yapının

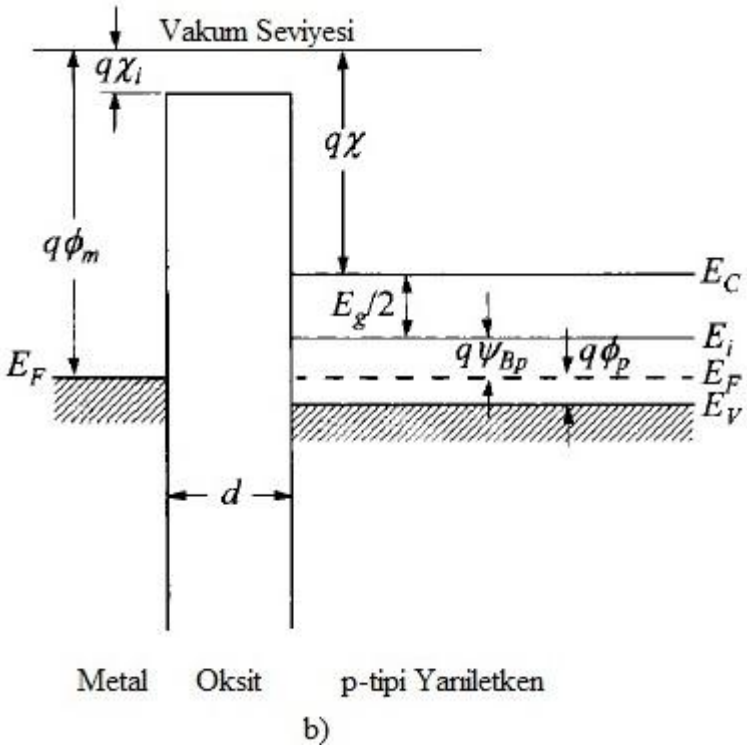
belirgin özellikleri paralel levhalı olduğu gibi oksit-yarıiletken arayüzey (oxide-semiconductor interface) özellikleri tarafından belirlenmektedir (Nicollian ve Brews, 1982).

3.1 İdeal MOS Yapı

İdeal bir MOS yapısının hem n-tipi hem de p-tipi yarı iletkenler için V=0 durumunda enerji-bant diyagramı Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 (devam ediyor)



Şekil 3.2 V=0'da ideal bir MOS yapının enerji-bant diyagramı a) n-tipi yarıiletken b) p-tipi yarıiletken (Sze ve Kwok, 2007)

Şekilde verilen tüm fiziksel parametrelerin açık ifadesi Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 MOS yapının fiziksel parametreleri

Parametre	Açıklama
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
Φ_B	Metal ile yalıtkan (oksit) arasındaki potansiyel engeli
χ	Yarıiletkenin elektron ilgisi
χ_i	Yalıtkanın elektron ilgisi
E_v	Valans (değerlik) bandı enerji seviyesi
E_c	İletkenlik bandı enerji seviyesi
E_i	Saf Fermi enerji seviyesi $(E_c - E_v)/2$
E_F	Fermi enerji seviyesi
ψ_B	Fermi ile saf Fermi enerji seviyesi arasındaki fark
Φ_n ve Φ_p	Orta boşluk ve bant kenarlarına göre Fermi potansiyelleri

Bu bölümde dikkate alınacak ideal MOS kapasitör teorisi, pratik MOS yapılarını anlamak ve yarıiletken yüzeylerin fiziğini keşfetmek için bir temel teşkil eder. İdeal bir MOS kondansatörü aşağıdaki gibi tanımlanır (Sze ve Kwok, 2007).

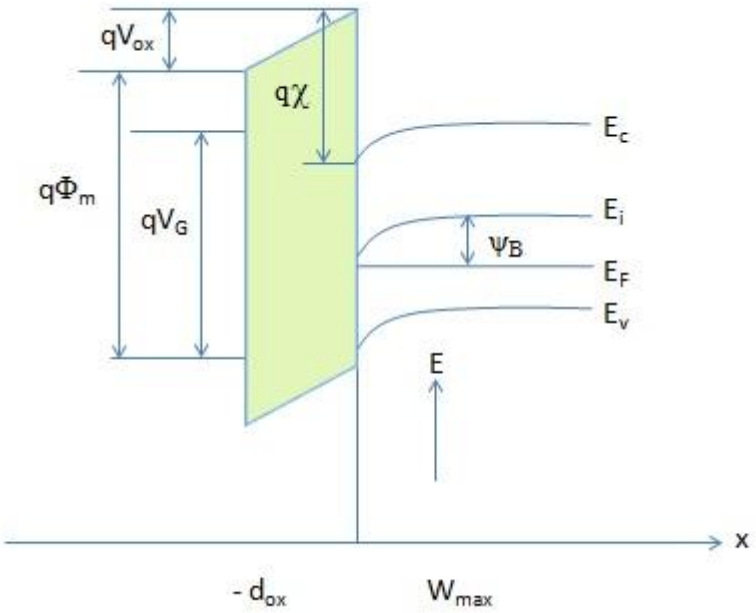
i) DC polarlama koşulları altında yalıtkanlardan taşıyıcı aktarımı yoktur ve metalin çalışma fonksiyonu Φ_m ile yarıiletkenin çalışma fonksiyonu Φ_s arasındaki farkın sıfır ($\Phi_{ms} = \Phi_m - \Phi_s = 0$) olacak şekilde seçildiği varsayılır. Yukarıdaki koşullar, Şekil 3.2'nin yardımıyla aşağıdaki ifadelere eşdeğerdir:

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bn}\right) = \Phi_m - (\chi - \Phi_n) = 0 \qquad \text{(n-tipi)} \qquad (3.1)$$

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_{Bp}\right) = \Phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{q} - \Phi_p\right) = 0 \qquad \text{(p-tipi)} \qquad (3.2)$$

Burada E_g yarıiletkenin yasak enerji bant aralığı ve ψ_B ise Fermi enerji seviyesi E_F ile saf fermi enerji seviyesi E_i arasındaki enerji farkıdır.

ii) Herhangi bir polarlama koşulu altında MOS yapıda bulunabilecek tek yükler, yarıiletkendekiler ve yalıtkanın yanındaki metal yüzeyde eşit ama zıt işaretlidir, hiçbir arayüzey tuzağı veya herhangi bir oksit yükü yoktur. Bu durumun bant diyagramı p-tipi yarıiletken için Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3 V≠0'da bir MOS yapının enerji-bant diyagramı (p-tipi yarıiletken için)

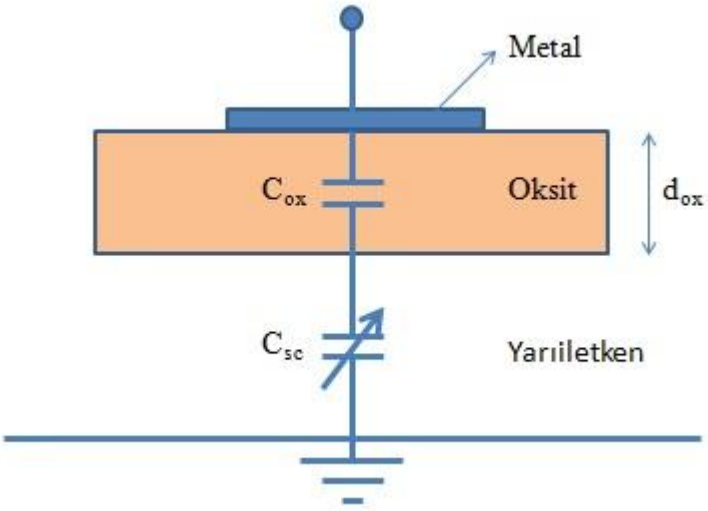
İdeal bir MOS yapıda, metal elektroda (doğrultucu kontak) bir gerilim uygulandığında yarıiletkende yük kaymaları oluşur. Yarıiletkendeki serbest hareketli yük yoğunluğu metaldekine göre daha az ve uygulanan gerilime bağlı olarak yarıiletken arayüzey bölgesinde bantların bükülmesine sebep olan uzay yükleri (Q_{sc}) oluşur. Termal denge durumunda arayüzey bölgesindeki uzay yük yoğunluğu potansiyelin büyüklüğü ile belirlenir. Yarıiletkende yükler katkılama türüne göre belirlenen çoğunluk ve azınlık taşıyıcılarıdır ve yarıiletkende metaldekine göre serbest olmayan yükler bulunduğu için uygulanan gerilime bağlı olarak yük, uzay yükü bölgesinde veya arayüzey bölgesinde yığılmalara neden olur. Uygulanan V_G geriliminin bir kısmı yarıiletken üzerine bir kısmı da oksit arayüzey tabakası üzerine düşer. Buna göre, MOS yapıya uygulanan gerilim aşağıdaki eşitlik ile verilmektedir:

$$V_G = V_{ox} + \psi_S \tag{3.3}$$

Bu eşitlikte verilen V_{ox} oksit arayüzey tabakası üzerine düşen gerilim, ψ_S ise arayüzeydeki bant gerilimidir.

Metal ve yarıiletken tabaka arasındaki oksit tabakasından dolayı metal ve yarıiletken arasında oluşan kapasitans MOS kapasitansı olarak adlandırılır. Bu MOS

kapasitansın özelliklerini metal-yarıiletken tabakalar arasındaki oksit ve oksit-yarıiletken arayüzeyi belirler. Bir MOS yapının kapasitansının eşdeğer devresi Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 MOS yapı kapasitansının eşdeğer devresi

Burada verilen C_{ox} oksit tabakanın kapasitansı ve C_{sc} uzay yükü kapasitansı olmak üzere bunların eşdeğer kapasitansları MOS yapının kapasitansı C'dir. Bu kapasitanslar ağağıdaki eşitlikler ile verilmektedir.

$$C_{ox} = \frac{dQ_M}{dV_{ox}} A_{ox} \tag{3.4}$$

$$C_{sc} = \frac{dQ_{sc}}{d\psi_s} A_{ox} \tag{3.5}$$

$$C = \frac{dQ_M}{dV_G} A_{ox} \tag{3.6}$$

Bu eşitliklerde verilen Q_M metal yüzeyindeki toplam yük, Q_{sc} uzay yükü bölgesinde biriken yük ve A_{ox} ise oksit tabakanın (MOS doğrultucu kontak) alanıdır.

MOS kapasitansı, Şekil 3.4'te verilen eşdeğer devrenin çözümünden C_{sc} ve C_{ox} kapasitanslarının seri bağlanmasına eşdeğerdir. Buna göre MOS kapasitansı C ve oksit tabakanın kapasitansı C_{ox} sırasıyla eşitlik 3.7 ve 3.8 ile verilir.

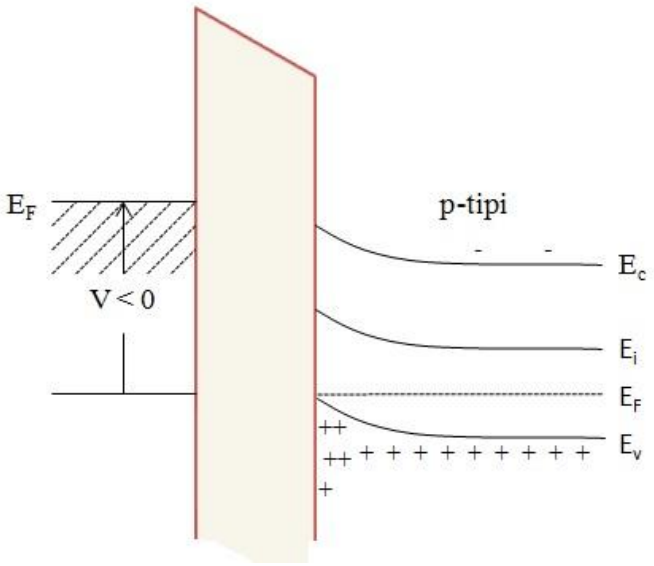
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_{ox}} \tag{3.7}$$

$$C_{ox} = \frac{\in_{ox}}{d_{ox}} A_{\mathrm{ox}} \tag{3.8}$$

Burada oksit tabakanın kapasitansı C_{ox}'in uygulanan gerilimden bağımsız olduğu görülür. Dolayısıyla MOS yapının kapasitansını C_{ox} etkileyemeyeceği için sadece uzay yükü kapasitansı C_{sc} belirler. İdeal bir MOS kapasitörünün pozitif veya negatif voltaj durumları için, yarıiletken yüzeyinde temel olarak üç durum bulunabilir (Growe, 1967; Sze ve Kwok, 2007).

3.1.1 Yığılım

Hiçbir voltaj uygulanmadığında, p-tipi bir yarıiletkenin değerlik (valans) bandında delikler veya çoğunluk taşıyıcıları vardır. Metal (gate) ile yarıiletken arasına negatif bir voltaj uygulandığında (V_G<0) ise bu gerilimden dolayı elektrik alan oluşur. Oluşan bu elektrik alan oksit-yarıiletken arayüzeyindeki değerlik (valans) bandında daha fazla delik birikmesine sebep olur. Bunun nedeni, metalin negatif yükünün yarıiletken ile oksit arasındaki arayüzeyde eşit bir net pozitif yük birikmesine neden olmasıdır. Arayüzeyde biriken yük, yüzey yüküdür. Bu nedenle $C_{sc} \rightarrow \infty$ ve MOS kapasitansı $C \rightarrow C_{ox}$ olur. Valans bandının yarıiletken arayüzeyinde E_F seviyesine yaklaştığı iletim bandınında yukarı doğru büküldüğü bu duruma yığılım denir (Şekil 3.5).



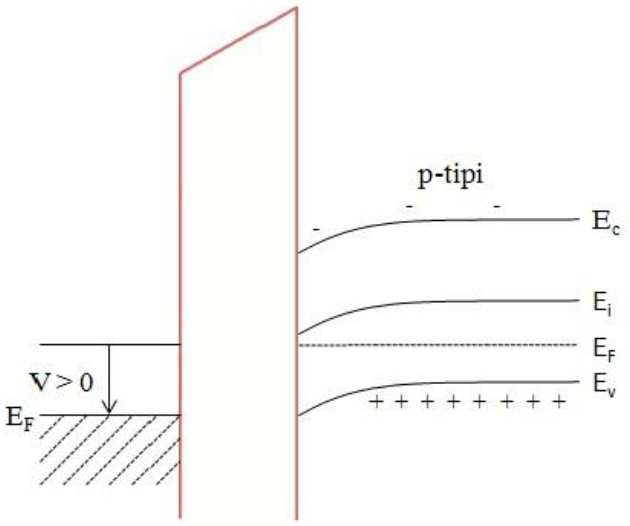
Şekil 3.5 p-tipi bir MOS yapının yığılım durumu enerji-bant diyagramı

3.1.2 Tüketim

Metal (gate) ve p-tipi yarıiletken arasına pozitif bir voltaj (V_G>0) uygulandığında, metalden yarıiletkene doğru oksit içinde elektrik alan oluşur ve çoğunluk taşıyıcıları (delikler) yarıiletken-oksit arayüzeyinden yer değiştirir. Bu durumda yarıiletken yüzeyindeki delik yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındaki delik yoğunluğundan küçük olmaya başlar ve enerji bantları aşağı doğru bükülür. Yarıiletkenin bu durumuna tüketim denir. Çünkü yarıiletkenin yüzeyi çoğunluk taşıyıcısından yoksundur. Yarıiletkenin bu alanı, artık yük içeremediği veya iletemediği için bir dielektrik görevi görür. Gerçekte, bir yalıtkan haline gelir. Ölçülen toplam kapasitans artık seri olarak oksit kapasitansı ve tüketim tabakası kapasitansı haline gelir ve sonuç olarak ölçülen kapasite azalır. Kapasitanstaki bu azalma, Şekil 3.6'da tüketim bölgesinde gösterilmektedir. Voltaj arttıkça, tüketim bölgesi metalden (gate) uzaklaşır, metal plaka ile alt tabaka arasındaki dielektriğin etkili kalınlığını arttırır, böylece kapasitansı azaltır. Tüketim bölgesinin kalınlığı aşağıdaki eşitlik ile verilir.

$$\omega_d = \varepsilon_s A_{\text{ox}} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_{ox}} \right) \tag{3.9}$$

Burada ω_d tüketim tabakası genişliği ve ε_s yarıiletkenin dielektrik sabitidir.

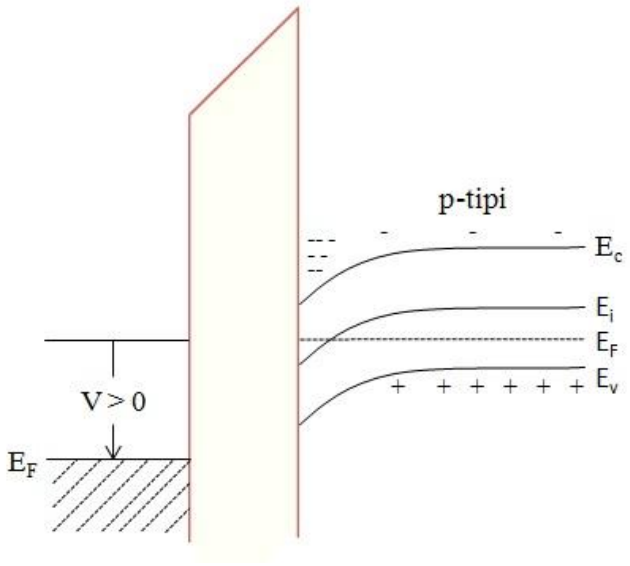


Şekil 3.6 p-tipi bir MOS yapının tüketim durumu enerji-bant diyagramı

3.1.3 Terslenim

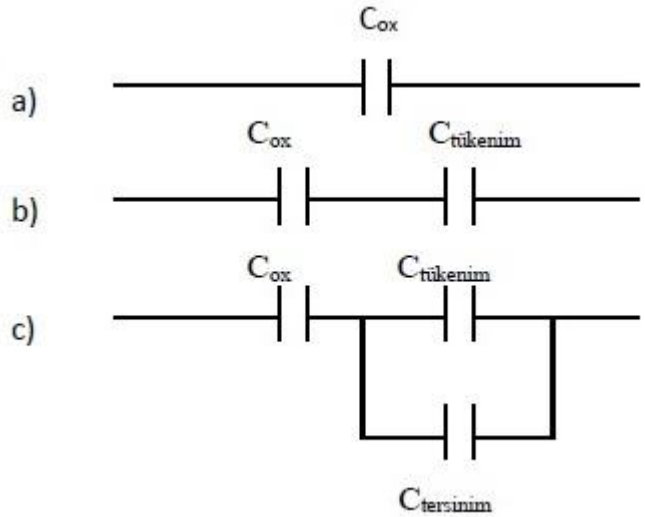
Bir p-tipi MOS yapının kapı voltajı eşik voltajının ötesinde artarken dinamik taşıyıcı üretimi ve rekombinasyon, net taşıyıcı üretimine doğru hareket eder. Pozitif kapı voltajı (V_G>>0), elektron deşik çiftleri üretir ve elektronları (azınlık taşıyıcıları) metale doğru çeker. Bu durumda enerji bantları daha fazla aşağı doğru bükülürler. Yine, oksit iyi bir yalıtıcı olduğu için, bu azınlık taşıyıcılar alttaştan oksit arayüzünde birikirler. Ayrıca saf Fermi enerji seviyesi E_i, fermi enerji seviyesinin altına düşer ve yarıiletken yüzeyinde azınlık taşıyıcıları (elektronlar) artmaya başlar. Elektron yoğunluğu deşik yoğunluğundan büyük olur. Birikmiş azınlık taşıyıcı katman, terslenim olarak adlandırılır çünkü taşıyıcı polaritesi ters çevrilmiştir (Şekil 3.7). Dolayısıyla p-tipi yarıiletken yüzeyi n-tipi yarıiletken gibi davranır.

Belirli bir pozitif voltajın üzerinde, mevcut azınlık taşıyıcıların çoğu terslenim katmanındadır ve daha fazla voltaj artışı yarıiletkeni daha fazla tüketmez. Yani tüketim bölgesi maksimum derinliğe ulaşır. Tüketim bölgesi maksimum bir derinliğe ulaştığında, yüksek frekans kapasitans ölçer tarafından ölçülen kapasitans, maksimum tüketim kapasitansı ile seri haldeki oksit kapasitansıdır. Bu kapasitans genellikle minimum kapasitans (C_{min}) olarak adlandırılır.



Şekil 3.7 p-tipi bir MOS yapının terslenim durumu enerji-bant diyagramı

MOS yapıda ideal bir durumda yükler yarıiletkende ve oksite yakın olan metal yüzeyinde bulunur. DC gerilim altında oksit içinden hiçbir akım geçmez. İdeal bir MOS yapıda üç yük sistemi için devre şeması Şekil 3.8'de verildiği gibidir. Bu sistemler; yığılım, tüketim ve terslenim adını alır (Growe, 1967).



Şekil 3.8 İdeal bir MOS yapının devre şeması a) Yığılım b) Tüketim ve c) Terslenim

3.2 Gerçek MOS Yapı

MOS yapının belirgin özellikleri paralel levhalı kondansatörde olduğu gibi oksit ve oksit-yarıiletken arayüzey özellikleri tarafından belirlenmektedir. Oksit, birçok yüzey

etkilerini azaltarak eklem karakteristiklerinin daha iyi kontrol edilmesini sağlar. MOS yapıdaki oksit tabakanın çok kaliteli olmasının yanı sıra oksit ile yarıiletken arayüzeyindeki doymamış bağların (dangling band) en az düzeyde olması aranan niteliklerdendir. Doymamış bağlardan veya safsızlıklardan (impurity) kaynaklanan oksit-yarıiletken arayüzeyindeki arayüzey durumları, oksidasyon sırasında yönteme bağlı olarak ortaya çıkan hareketli iyonlar, tuzaklar (traps), sabit oksit ve arayüzey yüklerinin bulunması, pratikte var olan iş fonksiyonu farkı MOS yapıların özelliklerini değiştirmektedir. Bu nedenle MOS yapıların ideal özelliklerinden sapmasına neden olmaktadır (Ayhan, 2012).

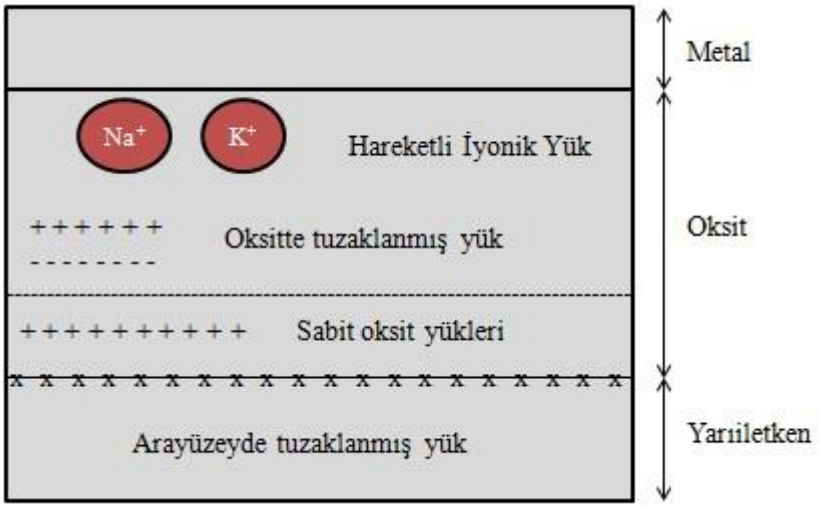
İdeal MOS yapı, gerçek MOS yapıdan farklıdır. Örneğin, ideal MOS yapının oksit tabakasında ve oksit-yarıiletken arayüzeyinde boşluk yükü ve hareketli iyonik yükler yoktur. Gerçek MOS yapıda ise oksit ve oksit-yarıiletken arayüzeyi elektriksel olarak nötr değildir. Bu durumlar ve yük sınıflandırması Şekil 3.9'da gösterilmektedir (Lök, 2017). Bunlar sırasıyla;

i) Oksit-yarıiletken arayüzeyinde yasaklanmış bant aralığı içinde enerji seviyeleri gibi tanımlanan arayüzey durumları.

ii) Yarıiletken yüzeyinde veya yakınında yerleşmiş olan ve uygulanan elektrik alan altında hareketsiz olan sabit yüzey yükleri.

iii) Oksit içindeki hareketli iyonlar.

iv) Numunenin radyasyona maruz kalmasıyla oluşan tuzaklar.



Şekil 3.9 İdeal olmayan MOS yapıda arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması

3.2.1 Arayüzey Durumları

Arayüzey durumlarının tanımı teorik olarak Shockley, Tammi ve diğer bilim insanları tarafından araştırılmış ve kristalin bir arayüzeyinin periyodik kafes yapısının kesintiye uğramasından dolayı, arayüzey durumlarının yasak enerji bant aralığında olduğu gösterilmiştir. Arayüzey durumları, yasak enerji bant aralığındaki oksit-yarıiletken arayüzeyindeki enerji seviyelerinde erişilebilir. Alıcı veya verici davranış olmak üzere iki tür arayüzey durumu vardır. Bu nedenle, arayüzey durumları hem pozitif hem de negatif yükleri yakalayabilir. Dolayısıyla C-V eğrileri, tuzaklanan yüklerin türüne bağlı olarak pozitif veya negatif voltajlara kaydırılabilir. Ölçüm sırasında uygulanan gerilimin frekansının, arayüzey durumlarını etkilediği görülmüştür. Dolayısıyla, tuzaklanan yüklerin sayısı ölçüm standartlarına bağlı olarak çeşitlilik gösterebilir (Taur ve Ning, 1998).

3.2.2 Sabit Oksit ve Arayüzey Yükleri

Oksit ve oksit-yarıiletken arayüzeyinde sabit oksit arayüzey yükleri bulunur. Oksit ve yarıiletken farklı kristal yapılara sahiptir. Bu nedenle oluşan kristal kusurları bazı yüklere neden olur. MOS yapıya gerilim uygulandığında oksit-yarıiletken yapı, yük durumundan bağımsızdır. Sabit oksit yükleri (Q_f) genellikle pozitiftir ve cihazın özelliklerini etkileyebilir. Bu yükler C-V ölçümlerini daha negatif voltajlara doğru

kaydırır. Dolayısıyla cihaz hem p-tipi hem de n-tipi yarıiletken tabanlı MOS kapasitörler için ideal durumdan sapar (Lök, 2017).

3.2.3 Hareketli İyonik Yük

Hareketli iyonik yükler (Q_m), metal-oksit veya oksit-yarıiletken arasındaki arayüzeyde kullanılan kimyasal maddeler, çıplak elle temaslar, oksitleme fırını ve safsızlık gibi nedenlerden dolayı oluşur. Bu yükler nispeten hareket edebildikleri için düşük sıcaklıklar nedeniyle oksit içinde sürüklenebilir. Hareketsiz oksit yükü, yapıya gerilim uygulandığında düşük sıcaklıkta hareket eden bir iyonik yükten ayırt edilebilir. MOS yapılardaki sabit oksit yükünün yoğunluğu değişebilir ve hareketli iyonik yük, metal-oksit ve yarıiletken-oksit arayüzeyleri arasında yer değiştirebilir. Böylece yapıda Na^+, H^+, H_3O^+, K^+ ve Li^+ gibi iyonik akımlar oluşabilir. Oluşan iyonik akımlar sebebiyle, MOS kapasitörün kararlılığı önemli ölçüde bozulur (Büyükbaş, 2015; Lök, 2017).

3.2.4 Oksitte Tuzaklanmış Yük

Kimyasal yapı bozuklukları, oksidasyon kaynaklı kusurlar, yalıtkan tabakanın radyasyon kusurları gibi nedenlerden dolayı oluşan oksitte tuzaklanmış yükler (Q_{ox}) yapıda hareketli yükleri yakalayabilir. Oksit ve oksit-yarıiletkendeki arayüzey arasında değişken yükler olabilir. Böylece MOS kapasitördeki yük yoğunluğu sayısı artırılmış olur. Oksit katmanında, tuzaklanmış yükler hem pozitif hem de negatif olabilir. Ancak, genellikle pozitiftir. Yapıdaki pozitif yüklerin artması nedeniyle C-V eğrilerini daha negatif voltajlara kaydırabilir (Lök, 2017).

4. YÖNTEM

4.1 ZnO Tabakasının Özellikleri

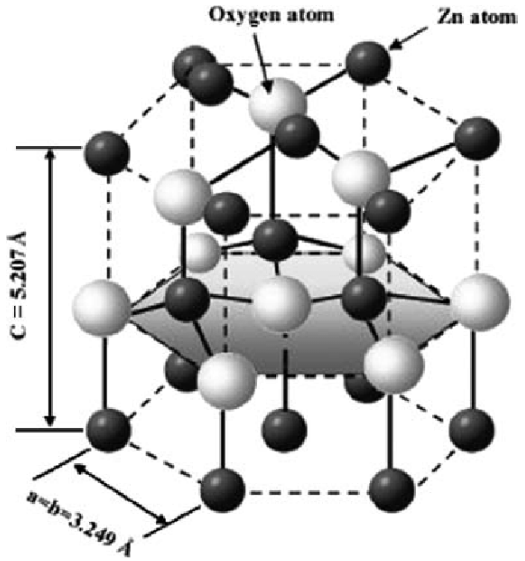
Çinko oksit (ZnO) düşük elektriksel dirence sahip bir yarıiletken malzemedir. ZnO doğada bol miktarda bulunması, toksik olmaması, elektrokimyasal olarak kararlı olması ve optoelektiksel özelliklerinin iyi olması gibi birçok nedenden dolayı bilimsel açıdan ilgi görmüş ve üzerinde çok sayıda çalışma yapılmıştır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, özellikle ZnO'nun katkılı formları üzerine odaklanmıştır. Bu çalışmaların bir kısmında manyetik olmayan Zn ile yer değiştiren katkı atomları nedeni ile yüksek Curie sıcaklıklarına sahip malzemelerin üretilmesi amaçlanmaktadır (Güngör ve Güngör, 2017).

ZnO optik ve elektriksel özellikleri nedeniyle çok fazla çalışılmıştır. Son zamanlarda, çinko-oksit-nano yapıları, uygulamaları büyütmek için dikkat çekmektedir. Oksit tabaka üzerine ZnO film büyütüldüğünde genişleyen kusurların düşük konsantrasyonuna ve dolayısıyla elektronik ve fotonik cihazlarda diğer yarıiletken malzemelere göre daha iyi performans gösterir. Bunlar arasında ZnO nanoçubukları, ultraviyole (UV) lazerler, ışık yayan diyotlar (LED), alan emisyon cihazları gibi elektronik, optoelektronik, elektrokimyasal ve elektromekanik cihazların üretilmesinde oldukça fazla ilgi görmektedir (Yuanyuan vd. 2010).

Zn'nin doğada bol bulunabilir ve zehirsiz bir element olması ZnO'nun, SiO malzemeler içerisinde kullanımının yaygınlaşmasını sağlamıştır. Çinko periyodik tablonun II. grubunda, Oksijen VI. grubunda yer alır. Bu yüzden ZnO, II-VI grubu yarıiletken bileşikleri içerisindedir. Çoğu II-VI grubu bileşikleri gibi, ZnO büyük ölçüde iyonik (Zn^{+2}-O^{-2}) olarak bağlanır (Temel vd. 2017).

ZnO'nun yapısı; hekzagonal, kübik ZnS ve nadir gözlemlenen kübik NaCI olabilir. Bu yapılar içerisinde, yarıiletken ince filmler için ortam koşullarında en kararlı olması nedeniyle genellikle ZnO yapısı hekzagonal kristal yapısıdır (Şekil 4.1). Kafes sabitleri a = 3,25 Å, c = 5,2 Å; c/a oranı ~1,60 altıgen hücre için ideal değere (c/a = 1,633) yakındır. ZnO genellikle katkılama olmasa bile, n-tipi bir karaktere

sahiptir. ZnO'nun güvenilir p-tipi katkılaması zor olmaya devam etmektedir. Bu sorun, p-tipi katkı maddelerinin düşük çözünürlüğünden ve bunların bol miktarda n-tipi safsızlık ile kapatılmasından kaynaklanmaktadır. Kendinden n-tipi malzemede p-tipinin ölçülmesi ise numunelerin homojen olmaması ve safsızlık nedeniyle karmaşıktır (Vaseem vd. 2009; Temel vd. 2017).



Şekil 4.1 ZnO hekzagonal kristal yapısı (Vaseem vd. 2009)

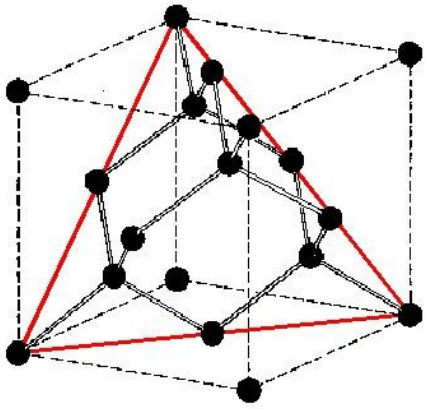
ZnO direkt (doğrudan) bant yapılıdır ve oldukça geniş yasak enerji bant aralığı değerine (~3,3 eV) sahip bir yarıiletkendir. Geniş bant aralığı ile ilişkili avantajlar arasında, yüksek arıza voltajları, daha düşük elektronik gürültü, yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek güç kullanımı gibi özellikler vardır. ZnO elektromanyetik dalga spektrumunun mavi ve morötesi bölgesinde LED yapımı için uygun malzeme olarak kabul edilmektedir. ZnO yarıiletkeninin fotoelektrik, piezoelektrik ve termoelektrik özellikleri oldukça iyidir ve bu özelliklerinden dolayı birçok uygulamada kullanılır. Bu uygulamalar; gaz sensörleri, ince film transistörler, fotoelektrik cihazlar, optoelektronik cihazlar, güneş hücreleri, UV dedektörler, piezoelektrik güç çeviriciler, yüzey akustik devreleri, termoelektrik aygıtlar, pH sensörleri, biosensörler, lazerler, lazer diyotlar, fotodedektörler gibi uygulamalardır (Temel vd. 2017).

ZnO, 60 meV'luk geniş eksiton bağlanma enerjisi, yüksek piezoelektrik sabiti, yüksek optik geçişlilik, kuvvetli ışık yayılması, büyük optik katsayısı, radyasyon

sertliği ve yüksek iletkenlik gibi mükemmel özellikleri nedeniyle en önemli ve ümit verici malzemelerden biridir. ZnO film, atomik katman biriktirme, darbeli lazer biriktirme, kimyasal buhar biriktirme, elektrodepozisyon, sprey piroliz, sol-jel ve püskürtme gibi birçok teknikle hazırlanabilir (Acar vd. 2018).

4.2 Yarıiletken Si Malzemenin Özellikleri

Silisyum elementi yer kabuğunun yaklaşık %28'ini oluşturan ve dünyada oksijenden sonra en bol bulunan elementtir. Doğada serbest halde bulunmayan Si, genellikle oksijenle bileşik yaparak oluşturduğu, silis ya da kuvars olarak bilinen silisyum dioksit (SiO_2) biçiminde görülür. Saf Silisyum iletkenlik bandı mutlak sıfır sıcaklığında (T = 0 °K) tamamen boş olduğu için düşük sıcaklıklarda iyi bir yalıtkan özelliği gösterir. Bu nedenle elektronik cihaz üretiminde oldukça yaygın kullanılan bir yarıiletken malzemedir (Algün, 1996). Bir silisyum kristali Şekil 4.2'de gösterilmektedir.

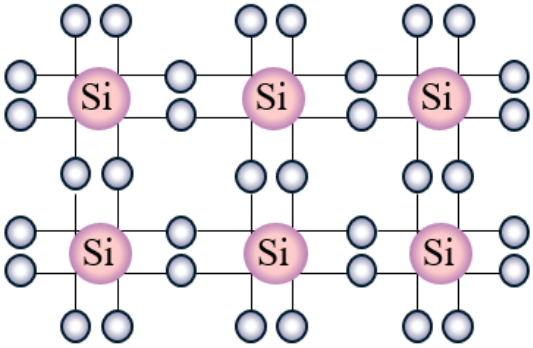


Şekil 4.2 Silisyum <111> kristal düzlemi (URL-1, 2020)

Silisyum periyodik tabloda IV-A grubunda yer alır. Atom numarası 14, atom ağırlığı 28,086 olup kristal siyahtan geriye değişen renge sahip kırılgan, sert bir yapıdadır. Yoğunluğu 2,33 g/cm^3 ve Mohs skalasına göre 7 sertliktedir. Silisyum 1410 °C'de erir ve 2355 °C' de kaynar. Metal ve ametal arası metaloid bir elementtir. En dıştaki yörüngede 4 değerlik elektronu vardır. Bu, tek bir kristal haline getirildiğinde, yarıiletken ürünler için bir malzeme olarak kullanılabilir. Çekirdekler kristalleştiğinde elektronları paylaşır ve her çekirdeğin etrafında 8 elektronla bağlanırlar. Elektrik çoğunlukla bu saf monokristal silikon durumunda iletilmez.

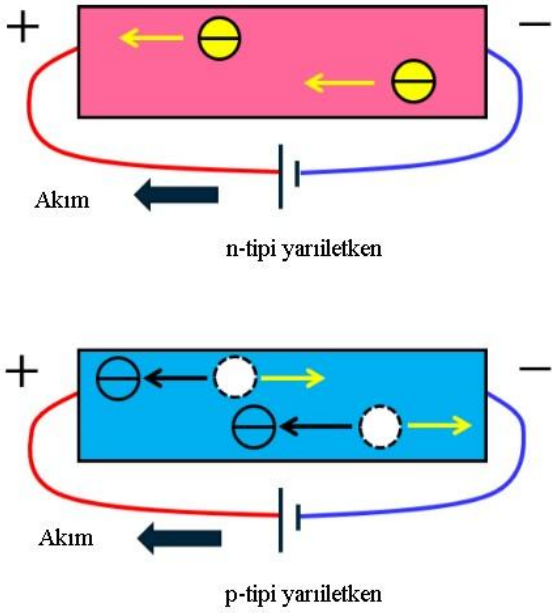
Silisyumun diğer safsızlıklar ile katkılanması onu değiştirir, böylece iletken olur (Algün, 1996).

Silisyumdaki yasak enerji bant aralığı oda sıcaklığında (T = 300°K) 1,12 eV'dur (Singh, 1994). Dolaylı bant yapısına sahip olmasından dolayı iletkenlik bandındaki bir elektronun valans bandına direk geçiş yapması mümkün değildir. Yarıiletken, katkılanan safsızlıkların türüne bağlı olarak p-tipi veya n-tipi olarak kategorize edilir.



Şekil 4.3 Düzenli bir yapıda Silisyum atomlarının bağlanması (URL-2, 2020)

Düzenli bir yapıda silisyum atomlarının bağlanması Şekil 4.3'te gösterilmektedir. n-tipi ve p-tipi yapılarda farklı katkılamalar söz konusudur. n-tipi (Fosfat katkılanmış) bir yarıiletkende elektron fazlalığı söz konusudur. Bu serbest bir elektrondur. Gerilim uygulandığında, elektronun pozitife (+) çekildiği ve serbestçe hareket edebildiği (akım akışı) bir duruma geçer. p-tipi (Bor katkılanmış) yarıiletkende, elektronun olmadığı bir "boşluk" vardır. Bu boşluğa delik, deşik ya da hol denir. Elektronlar pozitif (+) kutba çekilir ve delikleri kapatmak için hareket eder. Daha sonra, elektronlar deliklere hareket ettikçe, yeni delikler oluşur. Ardından bitişik elektronlar yeni deliklere yeniden hareket eder. Bu işlem tekrarlanırken, elektronlar pozitif (+) kutba doğru hareket eder ve aynı zamanda delikler negatif (-) kutba doğru hareket eder gibi görünür. Gerçekte yalnızca elektronlar hareket eder. Ancak deliklerin pozitif yüklü parçacıklara sahip olduğu düşünülebilir (URL-2, 2020).



Şekil 4.4 n-tipi ve p-tipi yarıiletkende elektron ve deliklerin akışı (URL-2, 2020)

n-tipi bir yarıiletkende elektronlar artı kutba doğru hareket ederken akım elektronların hareketinin tersi yönde akar. p-tipi yarıiletkende ise delikler eksi kutbun yönüne doğru hareket ediyor gibi görünür. Ancak aslında elektronlar hareket eder (Şekil 4.4). Sonuç olarak, hem p-tipi hem de n-tipi yarıiletkenler metal kadar iletken olmayan akım akışına sahip olabilir. Bu nedenle, daha iyi akım akışı veya yüksek iletkenlik isteniyorsa yarıiletken kullanılmaz. Bir yarıiletkenin avantajı belirli koşullara bağlı olarak akım akışına izin verme ya da bunları durdurma yeteneğidir. Bir yarıiletkenin arkasındaki temel ilke, bir p-n eklem kullanarak düzeltme davranışıdır (URL-2, 2020).

Günümüzde Silisyum yarıiletken malzemenin en çok kullanıldığı alan mikroelektronik ve güneş hücresi endüstrisidir. Yarıiletken güneş hücrelerinin %98'i Silisyumdur. Saf Silisyum, Bor, Galyum, Fosfor ya da Arsenik ile katkılandırıldığında; transistörler, güneş hücreleri ve doğrultucular gibi, elektronik endüstrisinde büyük önem taşıyan cihazların yapımında kullanılan silikon karışımları elde edilir. Elektronik mikroçiplerin yapımında yarıiletken olarak kullanılır. Bilgisayarlar ve entegre devreler Silisyum teknolojisi üzerinde inşa edilir. Aynı zamanda lazerler, transistörler, diyotlar, yalıtkan malzemeler gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

4.3 Radyo-Frekans (RF) Püskürtme Yöntemi

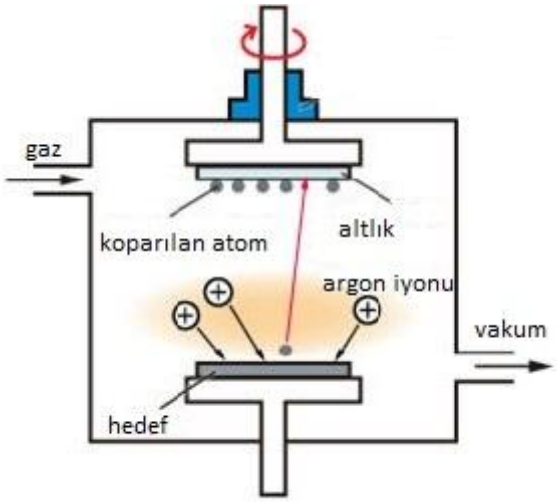
Diğer ince film biriktirme sistemleriyle karşılaştırıldığında (MOCVD, MBE vb.) basit aparatları, düşük biriktirme sıcaklığı ve uygun bir fiyata sahip olması nedeniyle tercih edilen RF püskürtme sistemi vakum odası, vakum pompası, radyo frekansı güç kaynağı, eşleştirme ünitesi olmak üzere dört ana kısımdan oluşur. Vakum odasının basıncını düşürmek amacıyla vakum pompası kullanılmaktadır. Basıncın düşürülme nedeni, vakum odasını havadaki diğer gazlardan temizlemek ve iyonize olmuş parçacıkların yüksek enerjili çarpışmalar yapmasını sağlayarak plazması oluşturmak istenen materyalin saflığı ve kalitesini arttırmaktır (Bozkaplan, 2015).

Püskürtme yönteminde saf metaller, yarıiletken malzemeler, alaşımlar ve bileşikler (oksitler, nitrit, sülfit ve karbürler) kullanılabilir. Püskürtme yöntemi kaplanacak alttaş ile aynı bileşime sahip olan filmin çökelmesine olanak sağlar. Diğer ince film biriktirme teknikleriyle kıyaslandığında, püskürtme yöntemi daha homojen ve güvenilir sonuçlar verir (Akın, 2015).

En yaygın olarak frekansı 13,56 MHz olan değişken RF güç kaynağı hedef bölüme doğru iyonları hızlandırmak için kullanılır. RF kondansatörün engellemesi durumunda DC güç kaynağı beslem ve plazma sağlamak için RF'den optimize güç transferi ile eşleşen ağları geliştirmeye ihtiyaç duyar. Püskürtülmüş atomlar ve püskürtülmüş gaz arasında gerçekleşen olası bir kimyasal reaksiyondan kaçınmak için, püskürtülmüş gaz olarak daima Argon gibi belirli şartlar altında kimyasal reaksiyona girmeyen (inert) bir gaz kullanılır.

Plazma iyonları hedefe çarptığında, elektriksel olarak yükü nötrdür ve atomlar gibi geri dönerler. Hedef malzemenin yalıtkan olması durumunda, hedef yüzey üzerinde pozitif bir yük durumu söz konusudur. Bu pozitif yük depolama bombardıman iyonları püskürtülmesine ve püskürtme sürecinin durmasına sebep olacak seviyeye ulaşabilir. Bu sürecin devam edebilmesi plazmadan yeterli sayıda elektronu çekmesini sağlamak için kutupların ters olması koşuluna bağlıdır. Hedef üzerinde uygulanan bir radyo-frekans voltajı ile kutupların ters yönlü durumu otomatik olarak sağlanır (Dahotre ve Sudarshan, 1999).

Püskürtme, yüzey atomlarını dağıtabilmek için belli bir enerjiye sahip iyonlarla hedef malzemenin bombardıman edilmesiyle oluşur. Hedefe yönelmiş enerjili iyonlar esnek olmayan çarpışma yoluyla hedefin yüzey atomlarının enerji ve momentum transferi gerçekleşir. Hedef yüzeyinin dışında yüzey bağlanma enerjisi ve momentumu yüzey atomları daha fazla enerji kazandığında püskürtme süreci başlar. Hedef atomlarının çarpışması ve etkileşimi oldukça karmaşıktır. Yüzeyin momentum açısını değiştirebilmek için çarpışmaların basamaklandırması gerekir. İyon enerjisinin %95'den fazlası çarpışmalar sonucunda hedef malzemede ısı enerjisine dönüşür (Akın, 2015).



Şekil 4.5 RF püskürtme ile kaplanan filmin şematik gösterimi

Tohum tabakasını oluşturmak için Şekil 4.5'te gösterildiği gibi RF püskürtme sisteminin altlık kısmına temizleme işlemi gerçekleştirilmiş yarıiletken alttaş yüzey tutucu üzerine yerleştirilir. Hedef bölümünde ise istenilen kalınlıkta kaplanacak malzeme bulunur. Ünite içerisindeki vakumun istenilen değerlere düşmesi için belirli bir süre beklenir. Vakum sistemi ile (~$1x10^{-6}$ Torr basınç altına düştüğünde) RF sinyali gönderilerek, ortamda bulunan Argon söktürme gazı ile plazma oluşturulur. Yarıiletken alttaş üzerine tohum tabakası olarak istenilen kalınlıkta kaplama yapılabilir. Kalınlığı RF püskürtme cihazı içinde yer alan kalınlık kontrol cihazı ile tespit edilir. Kaplanan filmde X ışını kırınımı (XRD) ölçümü yapılır. XRD verilerinden kristal yapısının a,c örgü parametreleri ve Warren-Scherrer metodu kullanılarak tanecik boyutu hesaplanır.

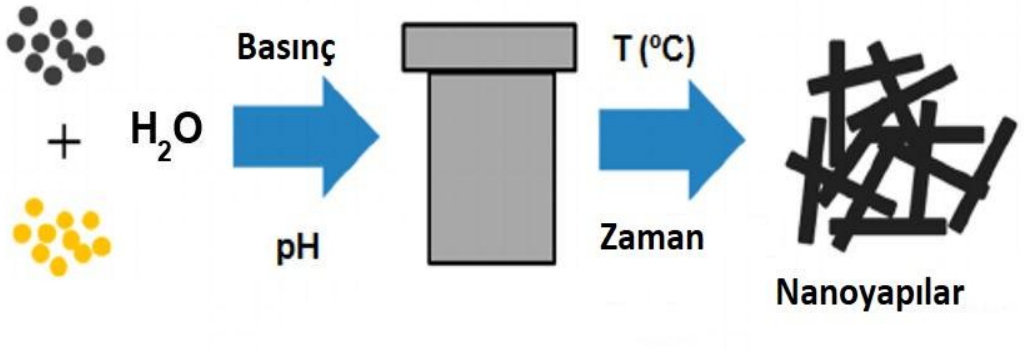
4.4 Hidrotermal Yöntemle Nanoyapıların Sentezlenmesi

Çinko oksit nanoçubuk tabanlı optoelektronik cihazlar oldukça geniş çapta incelenmiştir. ZnO'nun tohum katmanı, basit bir çözelti büyümesinde nanoçubukların yönelimini de etkilemektedir. Bu nedenle, tohum katmanının hidrotermal yöntemle ZnO nanoçubuklarının büyümesi üzerindeki etkisini anlamak güvenilir ZnO nanoçubuk tabanlı p-n eklem cihazlarının imalatını kolaylaştırabilir.

Son zamanlarda, tek boyutlu (1D) ZnO nanoçubukları, yapı cihazı imalatına uygunluğu nedeniyle nanobilim araştırmalarında, özellikle dikey olarak hizalanmış ZnO nanoçubuklarında daha fazla odaklanılmıştır. Nano malzemelerin boyutlarının optik ve elektriksel özelliklerini etkilediği bilinmektedir. Elektronik cihaz uygulamasında nanoçubuk ile ilgili birçok çalışma yakın zamanda yapılmıştır. Çoğu durumda cihaz, nanoyapının uzunluk veya çapının cihaz performansı üzerindeki etkisini açıkça belirlemek için basitçe tek bir nanoçubuk üzerinde üretilmiştir. Ancak tek nanoçubuk tabanlı cihazlar, yetersiz malzeme miktarı nedeniyle ticari kullanıma uygun olmamaktadır. Bu nedenle, tek bir nanoçubuk yerine ZnO nanoçubuk dizileri üretilmektedir (Thongma vd. 2017).

ZnO nanoçubuklarını büyütmek için, dikey fırlatma sistemi (VLS) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) gibi birçok yöntemle sağlanabilir. Bununla birlikte belirtilen yöntemler genellikle yüksek sıcaklık ve karmaşık süreç altında gerçekleştirilir. İyi hizalanmış ZnO nanoçubuk dizisini büyütmenin alternatif bir yolu, düşük sıcaklıkta (<100°C) çalıştırılan ve karmaşık olmayan donanım gerektiren hidrotermal yöntemdir. Bu yöntem yüksek verimliliğe sahip, basit, düşük maliyetli ve çevre dostu yöntemlerden biridir (Thongma vd. 2017; Sannakashappanavar vd. 2018).

ZnO nanoçubuklarının dikey yönelimi, iyi hizalanması ve iyi kristal morfolojisi, tohum tabakası kristalliğinin optimize edilmesiyle elde edilebilir. Nanoçubuk boyutunu kontrol etme yeteneğinin, cihaz özelliklerini ve performanslarını geliştirmek için anahtar parametrelerden biri olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte, aynı çapa sahip farklı ZnO nanoçubuk uzunluklarının veya tam tersinin kontrol edilebilirliği oldukça zordur. Nanoçubukların uzunluğu ve hizalanması, cihazların özelliklerinde çok belirleyici bir rol oynamaktadır. Bunların tohum tabakalarının özelliklerine bağlı olduğu bulunmuştur (Thongma vd. 2017).



Şekil 4.6 Hidrotermal yöntem ile nanoyapıların sentezlenme şeması (Lee vd. 2015)

Alttaş üzerine RF püskürtme yöntemi ile tohum tabakası yerleştirildikten sonra hidrotermal yöntemle nanoçubukların üretilmesi için Zn kaynağı olarak çinko nitrat ($Zn(NO_3)$) bileşiği, çözücü olarak ise saf su (H_2O) kullanılır. Farklı konsantrasyonlarda çözeltiler elde edilerek istenilen miktarda çinko nitrat ve sisteme gerekli OH^- iyonlarının (hidroksil kaynağı) kazandırılması amacıyla 1:1 oranlarında hekzametilen tetramin (HMTA) ($C_6H_{12}N_4$) ilave edilerek çözelti 1 saat boyunca önce oda sıcaklığında karıştırılır. Hazırlanan çözelti yüksek sıcaklığa dayanıklı otoklav kap içerisine konulup, alttaş dik bir şekilde batırılır ve bu şekilde etüve konulur.

Büyütme işlemi esnasında çinko nitrat çözünerek çinko ve nitrat iyonlarını, HMTA ise büyütme için gerekli olan hidroksil iyonlarını sağlayan Amonyak (NH_3) ve Formaldehit (HCHO)'e çözünür. Bu durumda HMTA'nın, NH3'ün çözünmesi sonucu oluşan hidroksil iyonlarına sebep olduğu için pH tamponu olarak büyütmeye katkı sağlar. Ayrıca farklı süre ve sıcaklık değerleri denenerek en uygun parametreler belirlenir (Şekil 4.6). Etüvde belirli bir sıcaklıkta ve sürede kalan filmler deiyonize (saf) su ile yıkanarak azot gazı ile kurutulur. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile oluşturulan nanoçubukların çapı, yüksekliği ve dizilişi (yüzey morfolojileri) incelenir.

Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar, elektronik ve optoelektronik cihazlardaki geniş uygulamaları için geliştirilmiş nanoçubukların özelliklerini daha da geliştirmek için gelecekteki çalışmaları olumlu yönde desteklemektedir. Nanoçubuklar; elektronik cihazlar, fotovoltaik hücreler, optoelektronik cihazlar gibi birçok cihazda kullanılabilir.

4.5 Kristal Temizleme

İdeal bir metal-oksit-yarıiletken (MOS) kapasitör yapabilmek için, yarıiletkenin organik ve metalik kirlerden temizlenmesi gerekir. Bu nedenle kimyasal temizleme işlemi <100> yüzey yönelimli 1-10 Ω.cm özdirençli Boron (B) katkılandırılmış p-Si alttaşları 1x1 cm^2 ebatlarında kesilip etanol (C_2H_5OH) içerisine atılmıştır. Üretime hazır hale getirebilmek için kullanılan temizlik aşamaları sırasıyla aşağıda verilmiştir.

i. Seyreltik hidroflorik asit (%5 HF) içerisinde 30 saniye bekletildi.

ii. Deiyonize su ile durulandı ve 5 dk bekletildi.

iii. Deiyonize su ile birlikte 3 dk ultrasonik banyoda yıkandı.

iv. Etil alkol (etanol) ile birlikte 3 dk ultrasonik banyoda yıkandı.

v. 100 ^oC'de etüvde kurutuldu.

4.6 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al Tipi MOS Yapının Hazırlanması

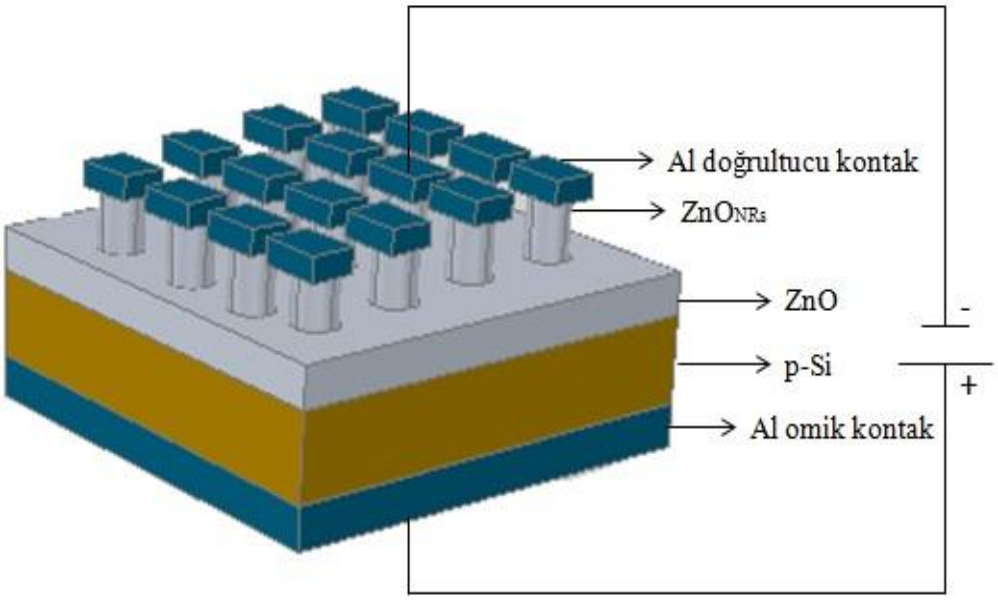
100 nm kalınlıktaki ZnO tohum tabakası, RF püskürtme kullanılarak p-tipi Si alttaşları üzerine bırakıldı. Püskürtme, ZnO hedefi kullanılarak 50 ^oC alttaş sıcaklığında gerçekleştirildi. Ar:O_2 (80:20) gazının basıncı 10 mTorr, alttaş dönüş hızı 10 rpm, RF gücü 100 W ve püskürtme sisteminin taban vakum basıncı $1x10^{-6}$ Torr iken 56 dakikalık kaplama işlemi gerçekleştirildi. Tohum tabakasının kristal yapısını oluşturmak amacıyla kaplama işleminden hemen sonra numuneler kül fırında hava ortamında 600 ^oC'de 30 dakika tavlandı.

Tohumlanan alttaşlar üzerine ZnO nanoçubukları oluşturabilmek için 10 ve 20 mM'lık iki farklı çözelti hazırlandı. Eşmolar konsantrasyonlarda (1:1) çinko asetat dehidrat ($Zn(CH_3COO)_2.2H_2O$) ve hidroksil anyon (OH^-) kaynağı için hekzametilen tetramin ($C_6H_{12}N_4$) 30 ml'lik deiyonize su içerisine yerleştirildi. 30 ^oC'de 1 saat boyunca homojen olması için manyetik karıştırıcı ile karıştırıldı. Çözelti otoklav kap içerisine aktarıldı ve ZnO/p-Si alttaşlar otoklav kaba dik bir şekilde yerleştirilerek kapatıldı. Hidrotermal reaksiyonun sağlanması için otoklav kap etüv içerisine

konularak 90 ^{o}C'de 2, 3 ve 4 saat tutuldu. Reaksiyondan sonra, alttaşlar üzerinde biriken çözelti kalıntılarını arındırmak için deiyonize su ile yıkanıp etüv içerisinde kurutuldu.

ZnO/p-Si alttaşlar üzerine ZnO nanoçubuklar oluşturulduktan sonra omik ve doğrultucu kontak oluşturma aşamasına geçildi. Bir omik kontak olarak yüksek saflıkta (%99,999) Al (100 nm) metali, DC püskürtme sisteminde ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si alttaşların arka tarafına yaklaşık $1x10^{-6}$ Torr basınç ile Ar gazı kullanılarak kısmi basıncı 40 mTorr, alttaş dönüş hızı 10 rpm ve DC gücü 135 W iken 30 dk kaplandı. Kaplama işleminden sonra numuneler kül fırında hava ortamında 20 dakika boyunca 450 ^{o}C'de tavlandı. Bu şekilde omik kontak oluşturma işlemi tamamlandı ve aynı zamanda ZnO nanoçubukların kristal yapısı düzenlenmeye çalışıldı.

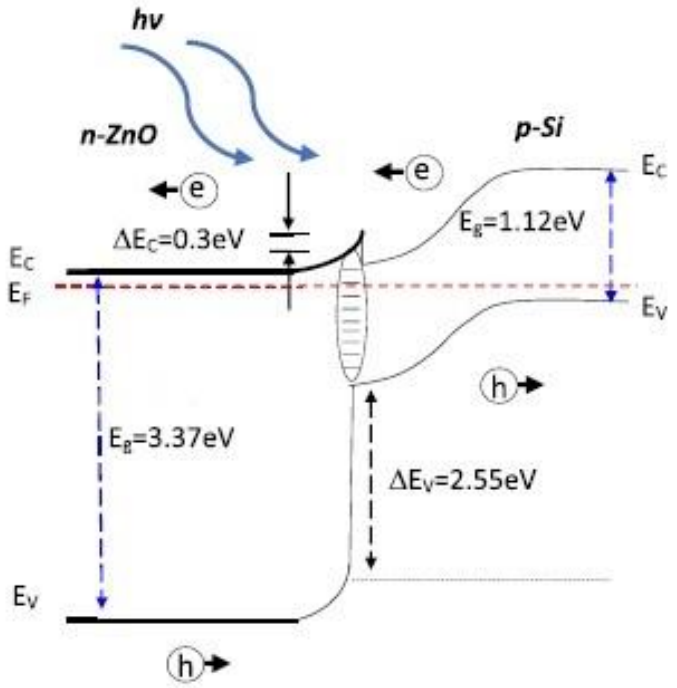
Son olarak ZnO nanoçubuklar üzerine 1 mm yarıçaplı Al (100 nm) doğrultucu kontakları DC püskürtme sistemi ile biriktirildi (Şekil 4.7). Böylelikle Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al numunelerinin üretim işlemleri tamamlandı. Üretilen numunelerin çözelti miktarları ve nanoçubuk üretimi için bekletilen süreye göre isimler verildi (Tablo 4.1).



Şekil 4.7 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapının şematik gösterimi

Tablo 4.1 Üretim aşamalarına göre numuneler

Numune adı	Hidrotermalde kullanılan çözelti miktarı (mM)	Nanoçubuk üretimi için 90 ^{o}C'de bekletilen süre (saat)
PD_{10-2}	10	2
PD_{10-4}	10	4
PD_{20-2}	20	2
PD_{20-3}	20	3
PD_{20-4}	20	4



Şekil 4.8 Üretilen MOS yapıların enerji bant diyagramı (Rüzgar ve Çağlar, 2020)

Şekil 4.8'deki enerji bant diyagramı, aydınlatma şiddeti altında fotodiyotların I-V özelliklerini incelemek için kullanılır. ZnO yüksek şeffaflığa sahip olduğundan, gelen ışığın görünür bölgesi ZnO ince filmden geçer ve p-Si tarafından emilirken, gelen ışığın UV kısmı ZnO tarafından emilir. ZnO ince filmleri tarafından emilen yüksek enerjili ($h\nu > E_g$) fotonlar, yapıda elektron-deşik çiftleri oluşturur. Ters beslemde çalıştığında yapının tüketim tabakası genişliği maksimuma çıkar ve elektron-deşik rekombinasyonu en aza indirilir. Ardından, deşikler ve elektronlar elektrik alanı tarafından sırasıyla ZnO ve p-Si yarıiletkenlerinin negatif ve pozitif elektrotlarına sürüklenir. Böylece, karanlık akım ve foto akım arasındaki fark, ileri besleme kıyasla ters beslemde daha yüksek hale gelir (Mekki vd. 2016; Rüzgar ve Çağlar, 2020).

4.7 Deneysel Ölçüm Sistemi

Akım-voltaj, kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri Kastamonu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yarıiletken Uygulamaları Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirildi. Nanoçubuk boyutu ve yönelimi, taramalı elektron mikroskobu (SEM; FEI Quanta FEG 250) ile değerlendirildi. Güneş ışığına bağlı akım-voltaj (I-V) özellikleri Keithley 2400 akım kaynağı, Scientech SF300A solar simülatörü tarafından ölçüldü ve AC/DC dönüştürücü kart ile bir bilgisayar kullanılarak kontrol edildi. Kapasitans-voltaj (C-V) iletkenlik-voltaj (G–V) karakteristikleri için Wayne Kerr 6500B empedans analizörü kullanıldı. I-V, C-V ve G-V ölçümlerinin yapıldığı düzenekler Şekil 4.9'da gösterilmektedir.

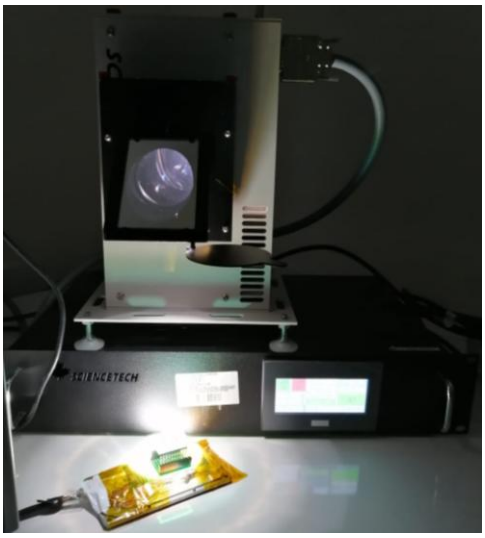
Şekil 4.9 Deneysel ölçüm sistemi

4.7.1 Akım-Voltaj Ölçüm Sistemi

Akım voltaj ölçümlerini almak için kullanılan Keithley 2400 cihazı (Şekil 4.10) kaynak ölçüm birimi cihazları, hassas voltaj ve akım kaynağını birleştirir. 5 A ve 1100 V'ye kadar yarıiletken ve diğer elektronik cihazları karakterize etmek için ölçüm yapar. Cihaz, DMM benzeri bir arayüz ve standart LabTracer2 I-V eğri yazılımı ve LabVIEW sürücülerine sahiptir. Ölçüm birimi cihazları, endüstrinin en geniş I-V ve direnç uygulamalarında zamanla test edilmiş doğruluk, hassasiyet ve ölçüm sonuçlarıyla yüksek performans sunar (URL-3, 2020).

Şekil 4.10 Keithley 2400 cihazı

Aydınlatma şiddetine bağlı yapılan ölçümlerde kullanılan Sciencetech SF-300-A (Şekil 4.11) daha fazla ışın veya daha fazla ultraviyole üretimi gerektiren uygulamalar için düşük maliyetli bir 300 W solar simülatör sistemidir. SF-300-A ark lambası muhafazası, ampul, güç kaynağı, filtre tutucusu, manuel kapak ve UV ile kaynaşmış silika lensler içerir. Mevcut Hava Kütlesi filtreleri arasında AM0, AM1.0, AM1.5 ve AM2.0 bulunur. Hava kütlesi filtresi olmadığında hedef üzerindeki güç yoğunluğu 2,5 güneşe kadar çıkabilir (URL-4, 2020).

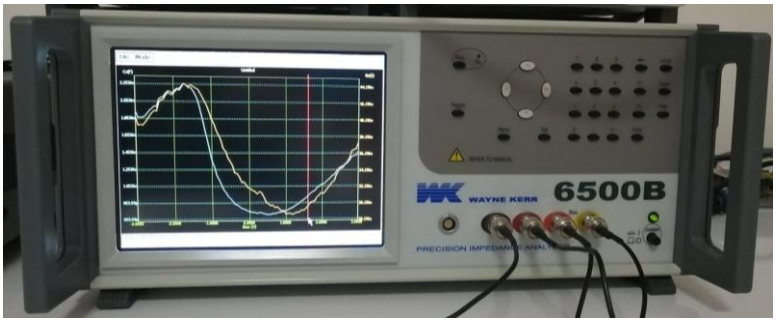


Şekil 4.11 Sciencetech SF300A solar simülatörü

4.7.2 Kapasitans-Voltaj ve İletkenlik-Voltaj Ölçüm Sistemi

Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri için kullanılan Wayne Kerr 6500B cihazı (Şekil 4.12) hassas empedans analizörleri, bileşenlerin 120 MHz'e kadar olan frekanslarda hassas ve hızlı test edilmesini sağlar. Temel ölçüm doğruluğu ± %0,05'dir. Doğruluk ve çok yönlülük, hassas analiz cihazlarını pasif bileşen tasarımı,

dielektrik malzeme karakterizasyonu ve üretim testi dâhil birçok farklı görev ve uygulamada kullanılmaktadır. Ölçülen iki parametrenin aynı anda grafiksel taraması mevcuttur. Taranan parametreler frekans, sürücü seviyesi ve DC voltajdır (URL-5, 2020).



Şekil 4.12 Wayne Kerr 6500B empedans analizörü

5. BULGULAR

Hazırlanan Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların bazı temel elektriksel parametreleri akım-voltaj (I-V), kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G-V) ölçümleri kullanılarak incelendi. I-V ölçümleri ±6 V aralığında karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde (25, 50, 75 ve 100 mW/cm^2), C-V ve G-V ölçümleri ise ±3 V aralığında ve 10 kHz frekanslı ac sinyal ile hem doğru hem de ters ön gerilim altında oda sıcaklığında gerçekleştirildi.

Oda sıcaklığında doğru ön gerilim I-V ölçümlerinden MOS yapıların ters doyma akımı (I_o), idealite faktörü (n), sıfır beslem potansiyel engel yüksekliği (Φ_{Bo}), kısa devre direnci (R_{sh}) ve seri direnç (R_s) değerleri Termiyonik Emisyon teorisi, Ohm Kanunu, Cheung ve Cheung yasası kullanılarak elde edildi. C-V ve G-V ölçümlerinden ise yapının verici katkı atomlarının yoğunluğu (N_D), kurulma voltajı (V_o) değeri, Fermi enerji seviyesi (E_F), tüketim tabakasının genişliği (W_D), metal ile yarıiletken arasında oluşan potansiyel engel yüksekliği Φ_{Bo}, imaj kuvveti engel yüksekliğinin düşmesi ($\Delta_{\Phi B}$), maksimum elektrik alanı (E_m) ve iletim bandındaki durumların etkin yoğunluğu (N_c) değerleri elde edildi. Elde edilen bu deneysel sonuçlar sunuldu ve değerlendirildi.

5.1 Aydınlatma Şiddetine Bağlı Akım-Voltaj Karakteristikleri

Termiyonik emisyon teorisi, Ohm yasası, Cheung ve Cheung'in yöntemi gibi teoremler yapıların seri direnç, idealite faktörü, potansiyel engel yüksekliği vb. bazı elektronik parametrelerini hesaplamak için kullanılmaktadır. Güvenilir sonuçlar elde etmek ve elde edilen sonuçları birbirleriyle karşılaştırmak için farklı yöntemler kullanılır. Uygulanan voltaj aralığı gibi bazı nedenlerden dolayı hesaplanan elektronik parametreler yöntemden yönteme farklılık gösterebilir. Bu kullanılan yöntemlerin bazı avantajları ve dezavantajları vardır. Örneğin, yarı logaritmik I-V grafiğinin R_S ve arayüzey katmanı nedeniyle yeterince geniş bir doğrusal aralığı olmadığında, elektronik parametrelerin termiyonik emisyon (TE) teorisinden değerlendirilmesinin doğruluğu ve güvenilirliği azalır. Bu durumda, Cheung ve

Cheung'in yöntemi kullanılabilir. Bu nedenle elde edilen sonuçların güvenirliğini artırmak için bu çalışmada çeşitli yöntemler kullanılmıştır (Çiçek vd. 2019).

Doğru ve ters ön-gerilimde incelenen Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların akım-gerilim karakteristikleri Şekil 5.1'de hem yarı logaritmik hem doğrusal ölçeklerde aynı grafikte gösterilmektedir. Şekilde karanlık ve artan aydınlatma seviyelerinin etkisi görülmektedir. Üretilen MOS yapıların ters voltaj akımında izlenen artış davranışı ile aydınlatma seviyesinin artması bir fotodiyot davranışı gösterdiği söylenebilir. Yapılar bir Schottky engel diyotu (SBD) gibi davranır ve akım-voltaj özellikleri Termiyonik emisyon modeline uyar. Termiyonik emisyon teorisine göre bir arayüzey yalıtkan tabakasına ve seri direnç R_s'ye sahip bir metal-yalıtkan-yarıiletken Schottky engel diyotundan geçen akım aşağıdaki eşitlikler ile verilmektedir (Sharma, 1984; Sze ve Kwok, 2007; Tan vd. 2016).

$$I = I_o \exp\left(\frac{q(V - IR_S)}{nkT}\right)\left[1 - exp\left(\frac{-q(V - IR_S)}{kT}\right)\right] \tag{5.1}$$

$$I_o = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bo}}{kT}\right) \tag{5.2}$$

Burada q elektron yükü ($1{,}6x10^{-19}$ C), T mutlak sıcaklık (Kelvin), V Schottky bağlantısına uygulanan voltaj, IR_s terimi R_s üzerindeki voltaj düşüşü, k Boltzmann sabiti ($1{,}38x10^{-23}$ $J.K^{-1}$), I_o ters doyma akımı, A doğrultucu kontak alanı, A* p-Si için 32 $Acm^{-2}K^{-2}$ olan etkili Richardson sabiti, n idealite faktörü ve Φ_{Bo} sıfır beslem potansiyel engel yüksekliğidir. Diyot üzerindeki voltaj düşüşü, V > 3kT/q iken V-IR_s olarak toplam voltaj düşüşü ile seri direnç potansiyeli arasındaki fark ile ifade edilebilir. Burada, saturasyon (doyma) akımı I_o, eşitlik 5.2'de gösterildiği gibi sıfır voltajdaki düz bir ln(I) çizgisinin kesim noktasından elde edilebilir.

İdealite faktörü n, eşitlik 5.1'den ve sıfır beslem potansiyel engel yüksekliği eşitlik 5.2 den çıkarılabilir.

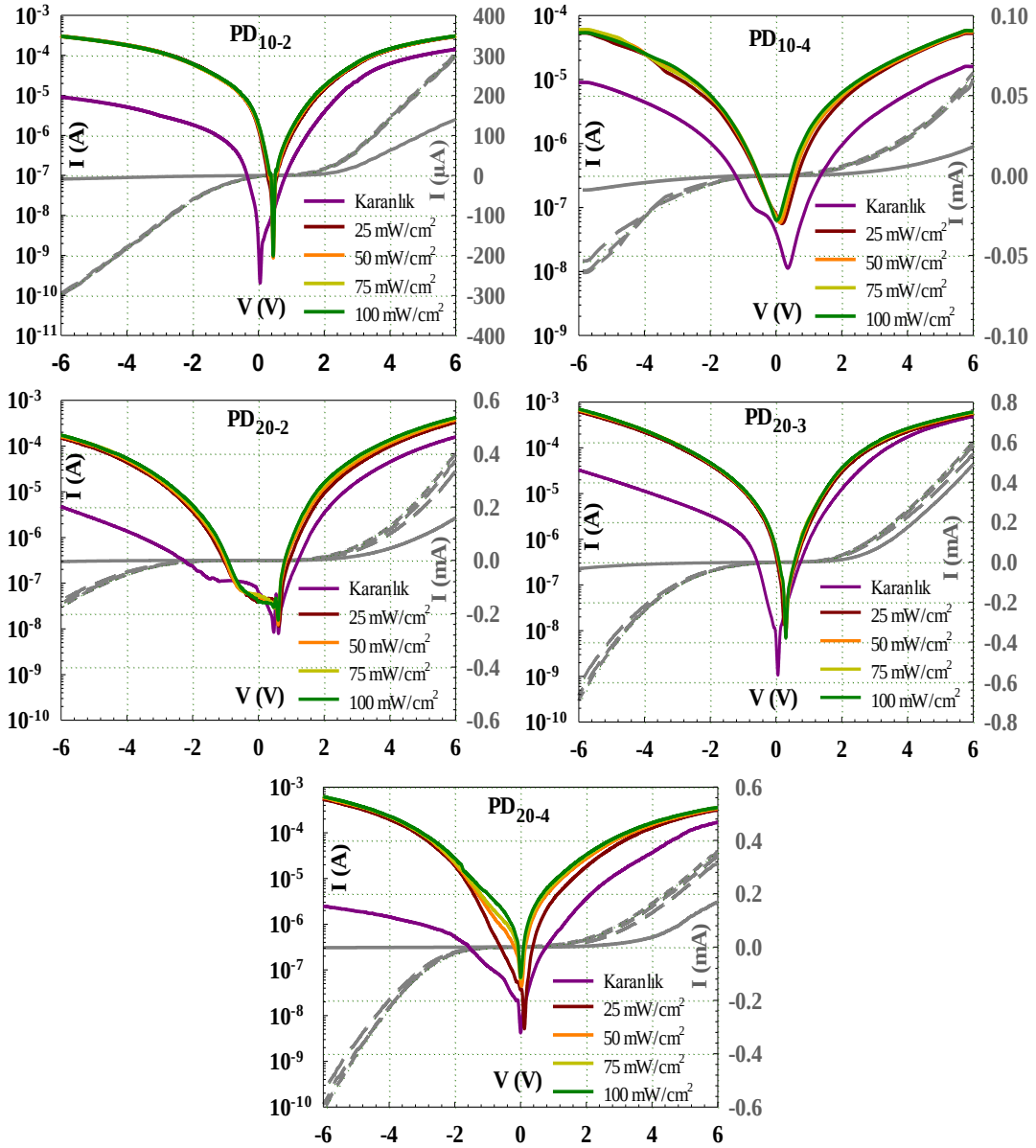
$$\Phi_{Bo} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^{*}T^{2}}{I_o} \right) \tag{5.3}$$

$$n = \frac{q}{kT} \frac{d(V - IR_S)}{d(\ln(I))} \tag{5.4}$$

Eşitlik 5.4'e göre ln(I)-V grafiğinin eğimi (ln(I) ekseninin kesişme noktası), idealite faktörünü verir. Burada uygulanan gerilim sıfırdır ve 3kT/q'nun üzerindeki doğrusal bölge ise bize $\ln(I_o)$ değerini verir. Sıfır beslem potansiyel engel yüksekliği veya görünen engel yüksekliği eşitlik 5.3 kullanılarak belirlenebilir.

Deneysel olarak elde edilen I_o, n, Φ_{Bo}, R_{sh} ve R_s değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir. Tablodaki veriler aydınlatma seviyelerindeki artış ile idealite faktöründe bir artış ve sıfır beslem potansiyel engel yüksekliğinde bir azalma olduğunu doğrulamıştır. Karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde Φ_{Bo} değerleri 0,78 ile 0,61 eV arasında, n değerleri ise 7,33 ile 11,15 arasında değişmektedir.

Şekil 5.2 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların karanlıkta sıfır beslem potansiyel engel yükseklikleri ve idealite faktörü değerlerinin dağılımını göstermektedir. Şekilden üretilen MOS yapıların karanlıkta en düşük idealite faktörü ve en yüksek sıfır beslem potansiyel engel yüksekliği değerinin $PD_{20\text{-}2}$ numunesinde olduğu görülmektedir. Aydınlatma seviyesindeki artış Φ_{Bo} değerlerinde bir azalmaya ve n değerlerinde bir artışa sebep olmuştur. Aydınlatma şiddeti arttıkça idealite faktörünün artışı, MS arayüzeyinde homojen olmadıkları varsayılarak açıklanabilir. Ek olarak, karanlıkta daha yüksek n değerleri, MS arayüzeyinde, R_s'de, arayüzey ZnO katmanında ve uzay yükü bölgesinde üretim-rekombinasyonda potansiyel engel yüksekliği homojensizliklerinin ve arayüzey durum yoğunluğunun (N_{ss}) varlığına atfedilebilir (Tan vd. 2016).



Şekil 5.1 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde I-V karakteristikleri

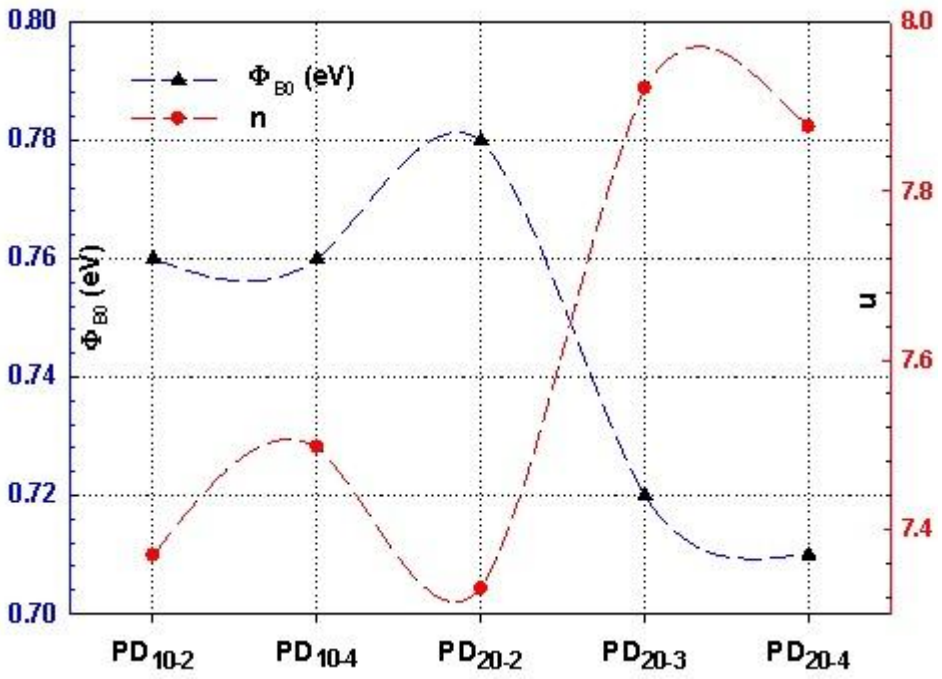
Doğru beslemdeki yarı-logaritmik ln(I)–V grafiğinde yüksek akımdaki eğriliğin nedeni kontak tellerinden veya yarıiletkenin bulk direncinden kaynaklanan seri dirençtir. I–V grafiğinin doğrusal bölgesi seri direncin, arayüzey yalıtkan katmanının ve uygulanan voltajın yeterince büyük olduğu arayüzey durumlarının etkisine bağlı olarak doğrusallıktan önemli ölçüde sapabilir. Ayrıca, uygulanan ters voltaj ile akım yavaşça yükselir ve herhangi bir doygunluk etkisi göstermez. Ters akımın bu yumuşak veya hafif doyurucu olmayan davranışı, Schottky engel yüksekliğinin

metal-yarıiletken arayüzeyinde arayüzey yalıtkan katmanının varlığı ile açıklanabilir (Tataroğlu ve Altındal, 2008).

İdeal diyot n = 1 idealite faktörüne sahip olmasına rağmen, diyotlar genellikle oksit tabakalarının, seri dirençlerin, potansiyel engel yüksekliği homojensizliklerinin vb. etkisinden kaynaklanan nedenlerle birden daha büyüktür. MOS yapılarındaki engel homojensizliklerinin diğer nedenleri ise çoklu fazlar, yüzeyler, kusurlar, farklı fazların karışımı gibi arayüzey kusurlarıdır. Bu etkiler, idealite faktörlerinin daha büyük değerlere sahip olmasına neden olur. Bu nedenle homojen olmama durumları önemli bir rol oynayabilir ve deneysel I-V özelliklerinin değerlendirilmesinde dikkate alınmalıdır (Nicollian ve Brews, 1982; Selçuk vd. 2012; Çiçek vd. 2018; Çiçek, 2020).

Tablo 5.1 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların aydınlatma şiddetine bağlı elektriksel parametreleri

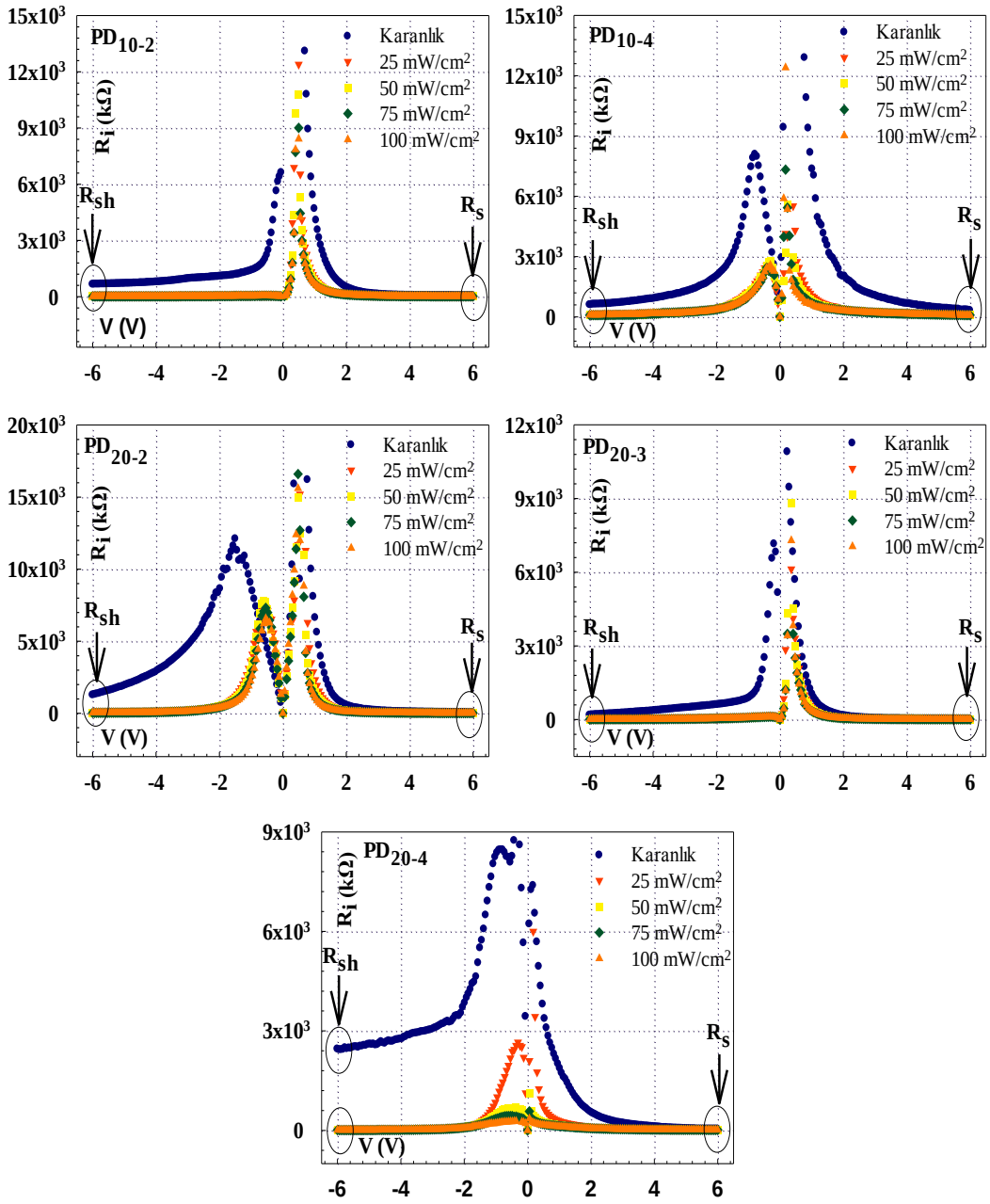
Numune	Aydınlatma Şiddeti (mW/cm^2)	I_o (A) (TE)	n (TE)	Φ_{Bo} (eV) (TE)	Cheung		Ohm Kanunu	
					dV/dln(I) R_s (kΩ)	H(I) R_s(kΩ)	R_{sh} (kΩ)	R_s(kΩ)
PD_{10-2}	0	$1,23x10^{-9}$	7,369	0,76	47,342	48,906	657,28	42,057
	25	$6,19x10^{-9}$	7,455	0,72	16,844	19,298	19,78	20,102
	50	$1,02x10^{-8}$	8,082	0,71	16,135	17,590	20,13	19,866
	75	$1,52x10^{-8}$	8,616	0,70	15,987	16,950	19,89	19,621
	100	$1,60x10^{-8}$	8,696	0,69	15,322	16,358	20,05	19,563
PD_{10-4}	0	$1,04x10^{-9}$	7,497	0,76	299,67	300,95	610,53	330,13
	25	$1,43x10^{-8}$	8,581	0,70	154,12	152,86	99,07	102,26
	50	$3,17x10^{-8}$	9,785	0,68	148,15	143,40	92,99	97,014
	75	$4,82x10^{-8}$	10,65	0,67	121,56	141,94	91,84	91,757
	100	$6,56x10^{-8}$	11,15	0,66	120,42	140,91	104,01	92,392
PD_{20-2}	0	$6,33x10^{-10}$	7,33	0,78	32,997	33,480	1272,1	37,936
	25	$3,69x10^{-9}$	8,49	0,74	17,648	19,091	40,09	18,062
	50	$9,21x10^{-9}$	9,31	0,71	16,339	18,241	37,54	16,031
	75	$1,32x10^{-8}$	9,65	0,70	14,865	17,257	34,83	15,218
	100	$1,88x10^{-8}$	10,15	0,69	14,067	15,568	34,55	14,275
PD_{20-3}	0	$7,51x10^{-9}$	7,921	0,72	9,693	9,087	182,93	12,277
	25	$1,57x10^{-8}$	8,157	0,69	7,317	8,586	9,72	11,133
	50	$3,04x10^{-8}$	9,219	0,68	6,015	7,983	9,02	10,306
	75	$3,94x10^{-8}$	9,496	0,67	6,047	7,787	8,67	10,392
	100	$5,70x10^{-8}$	10,38	0,66	5,982	7,664	8,48	10,079
PD_{20-4}	0	$1,09x10^{-8}$	7,876	0,71	34,845	34,550	2446,6	35,457
	25	$5,64x10^{-8}$	8,217	0,67	18,168	19,262	11,05	19,425
	50	$2,56x10^{-7}$	9,706	0,63	17,412	18,855	10,17	17,682
	75	$3,76x10^{-7}$	10,52	0,62	12,921	17,004	9,77	17,053
	100	$4,89x10^{-7}$	10,88	0,61	12,832	16,942	9,65	16,942



Şekil 5.2 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların karanlıktaki Φ_{Bo} ve n değerleri

Şekil 5.2 ve Tablo 5.1'den açıkça görüldüğü üzere, idealite faktörleri arttıkça sıfır beslem potansiyel engel yükseklikleri azalır. MOS yapıları arasında daha yüksek idealite faktörlerinin genellikle daha düşük gözlenen sıfır beslem potansiyel engel yüksekliklerine eşlik ettiği görülmüştür.

Voltaja bağlı direnç, SBD'lerin seri ve kısa devre dirençleri Ohm yasasından (R_i = dV_i/dI_i) elde edilmiştir ve Tablo 5.1'de verilmiştir. R_{sh} ve R_s değerleri, Şekil 5.3'teki R_i grafiğine karşı uygulanan ön-gerilim voltajından belirlenmiştir. Şekil 5.3'te görüldüğü gibi, her iki direnç değeri de aydınlatma seviyelerinin artmasıyla değerlik bandı yüklerinin iletkenlik bandına uyarılması durumunda azalır ve uygulanan ileri gerilimin artmasıyla sadece R_s değerleri azalır. Schottky bağlantısına uygulanan voltaj, arayüzey ve tüketim katmanları arasında ve ayrıca diyot yapısının R_s'si arasında paylaşılır. Yalıtkan katmanının kalınlığına bağlı olan bu paylaşılan voltaj büyüklüğü, R_{sh} ve R_s SBD'lerin güvenilirliğini ve performansını belirleyen önemli parametrelerdir (Tan vd. 2016). R_s'nin etkisi, Şekil 5.1'deki yarı logaritmik I–V grafiklerinden yüksek doğru voltaj bölgesinde aşağı doğru bir eğrilik olarak görülebilir.

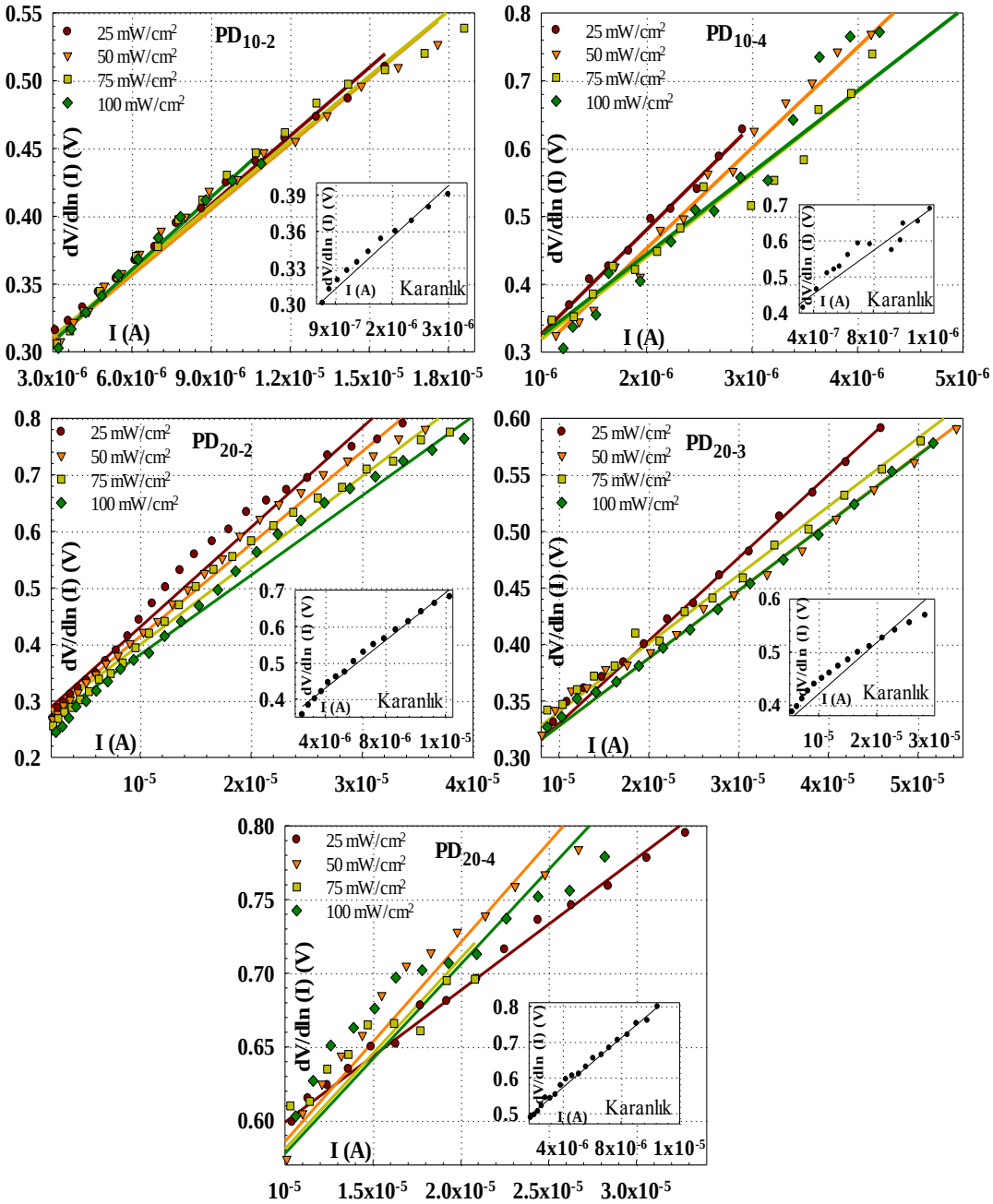


Şekil 5.3 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS tipi yapıların karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde R_i-V karakteristikleri

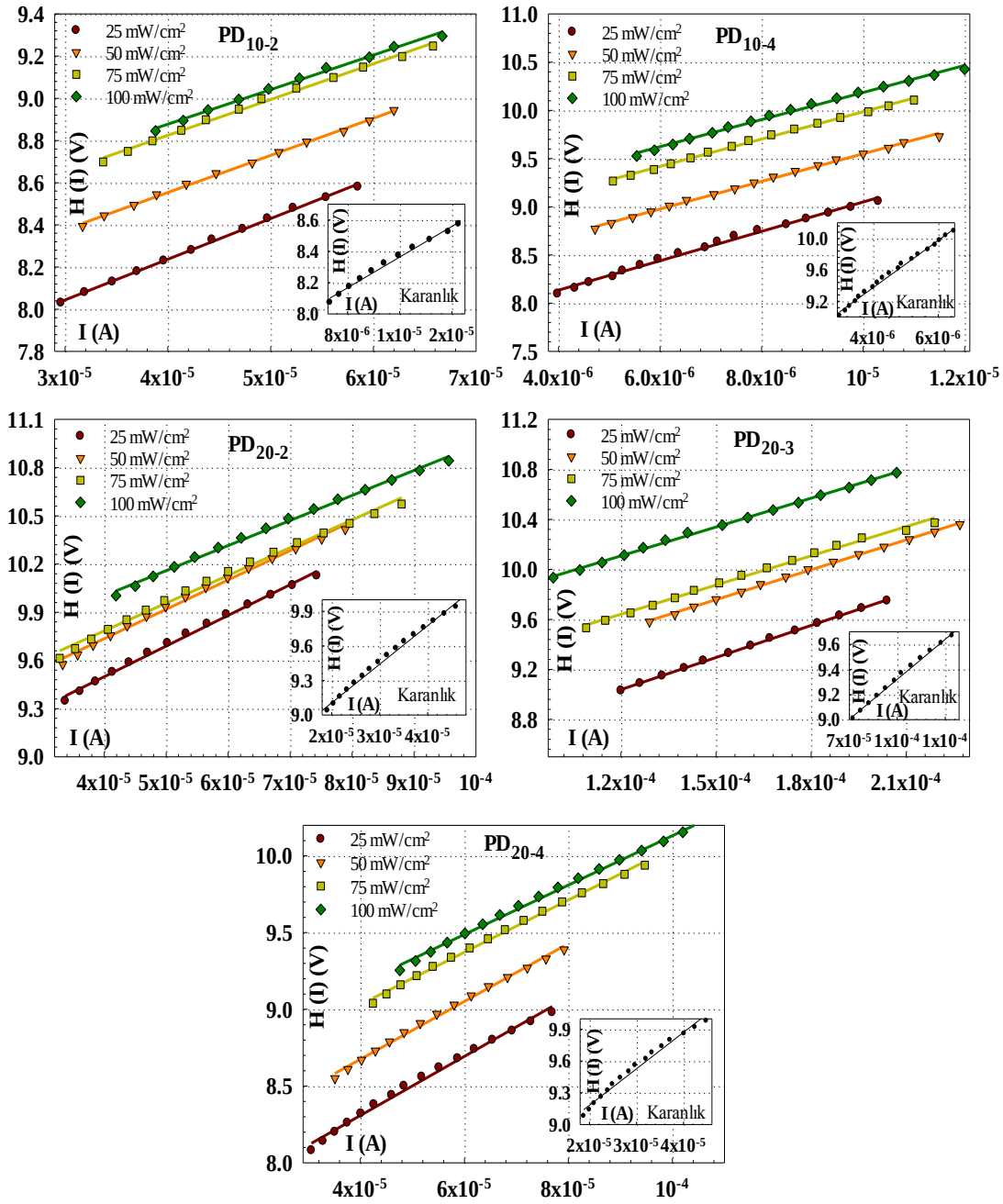
Cheung ve Cheung'in yöntemi, doğru beslem I-V karakteristiklerinin doğrusal olmayan bölgesinde çeşitli aydınlatma seviyeleri altında R_s değerlerini elde etmeyi sağlar. R_s değerleri eşitlik 5.5 ve 5.6 kullanılarak Cheung ve Cheung yöntemi ile belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır (Cheung ve Cheung, 1986).

$$\frac{dV}{d(ln(I))} = n\,\frac{kT}{q} + IR_s \tag{5.5}$$

$$H(I) = V - n\,\frac{kT}{q}\,\ln\left(\frac{I}{AA^{*}T^{2}}\right) = n\Phi_{Bo} + IR_s \tag{5.6}$$



Şekil 5.4 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde dV/dln(I)-I grafikleri



Şekil 5.5 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde H(I)-I grafikleri

Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te oda sıcaklığı koşullarında Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altında incelenen H(I)-I ve dV/dln(I)-I grafikleri verilmiştir. R_s değerleri, eşitlik 5.5'ten elde edilebildiği gibi, her aydınlatma seviyesi için dV/dln(I)-I grafiklerinin eğiminden de elde edilmektedir. R_s'nin alternatif bir tespiti, H(I)-I grafiğinin eğimi ile elde edilebilen R_s değerlerinin tutarlılığını karşılaştırmayı sağlar. Eşitlik 5.5 ve 5.6'dan türetilen R_s değerleri

uyumludur ve Tablo 5.1'de açıkça görüldüğü gibi aydınlatma şiddetleri arttıkça azalmaktadır.

Foto akımın karanlık akıma oranı diyotların foto-duyarlılığını (PS) tanımlar (I_{ph}/I_{dark}) (Mekki vd. 2016). Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların foto-duyarlılıkları 25, 50, 75 ve 100 mW/cm^2'de hesaplanmış ve Tablo 5.2'de verilmiştir. Tabloda en yüksek foto-duyarlılığın -6 V ve 100 mW/cm^2' de PD_{20-4} numunesinde 253,57 değerinde olduğu görülmektedir. Ayrıca PD_{20-2}, PD_{20-3} ve PD_{20-4} numunelerinde artan aydınlatma şiddeti ile birlikte foto-duyarlılık değerlerinin de arttığı açıkça görülmektedir.

Optoelektriksel cihaz parametreleri fotodiyot karakterizasyonu için önemlidir. Cihazın duyarlılığı (R) aşağıdaki denklemden hesaplanabilir (Rüzgar ve Çağlar, 2020).

$$R = \frac{I_p - I_d}{PA} \tag{5.7}$$

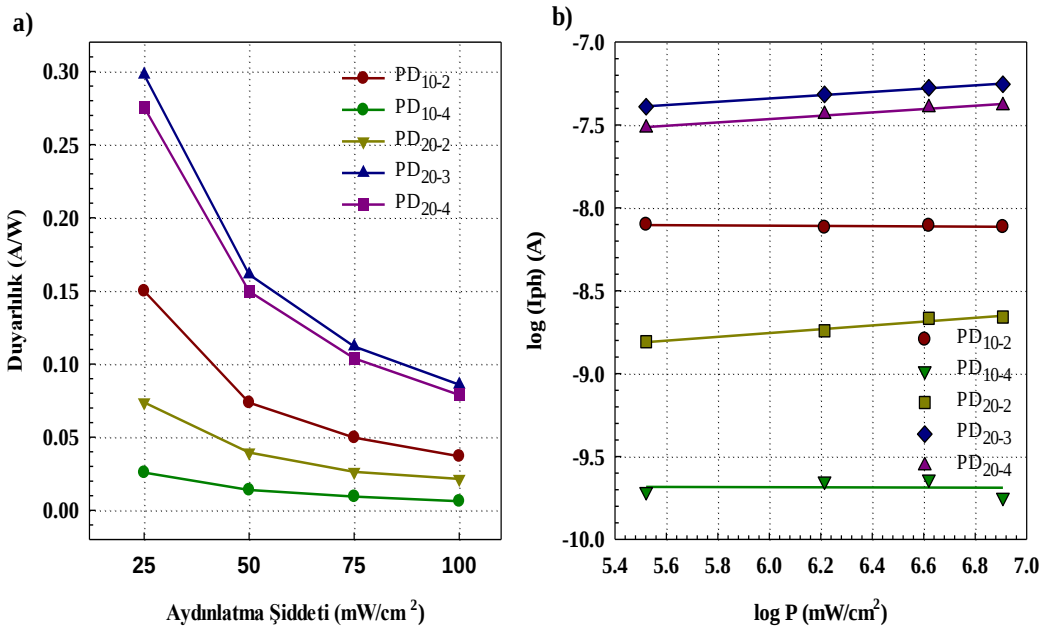
Burada I_p, I_d, P ve A sırasıyla foto akımı, karanlık akımı, aydınlatma gücü yoğunluğu ve fotodiyotun aktif alanını ifade eder. Hazırlanan Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapılar için fotodiyotun aktif alanı 7,85 x 10^{-6} m^2'dir.

Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların elde edilen tüm duyarlılık değerleri Tablo 5.2'de verilmiştir. Duyarlılık değerleri eşitlik 5.7'de görüldüğü gibi artan aydınlatma şiddeti ile azalmalıdır. Bu durum Tablo 5.2 ve Şekil 5.6-a'da verilen tüm aydınlatma şiddetlerinde açıkça görülmektedir. En yüksek duyarlılık değeri PD_{20-3} numunesi için 25 mW/cm^2 aydınlatma şiddetinde 0,314 A/W elde edilmiştir.

Çoğu ticari foto-sensör duyarlılığı genellikle 0,1 A/W ila 0,2 A/W arasında değişmektedir. Tablo 5.2'de MOS yapılar için elde edilen duyarlılık değerleri ZnO nanoçubuklardaki malzeme kusurları ve safsızlıktan kaynaklanıyor olabilir (Fang vd. 2009).

Tablo 5.2 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların -6 V'da hesaplanan optoelektriksel cihaz parametreleri

Aydınlatma Şiddeti (mW/cm^2)	Duyarlılık (R) (A/W)				
	PD_{10-2}	PD_{10-4}	PD_{20-2}	PD_{20-3}	PD_{20-4}
25	0,154	0,030	0,076	0,314	0,276
50	0,076	0,016	0,040	0,169	0,150
75	0,051	0,011	0,027	0,117	0,104
100	0,038	0,007	0,022	0,090	0,079
Aydınlatma Şiddeti (mW/cm^2)	Foto-duyarlılık (PS)				
	PD_{10-2}	PD_{10-4}	PD_{20-2}	PD_{20-3}	PD_{20-4}
25	33,23	6,16	31,72	18,82	221,47
50	32,66	6,56	33,88	20,29	240,59
75	33,04	6,65	36,53	21,09	250,48
100	32,78	5,95	36,82	21,56	253,57



Şekil 5.6 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların a) Aydınlatma şiddetine bağlı duyarlılık grafiği b) log(I_{ph})-logP grafiği

Diyotların fotoiletkenlik mekanizması eşitlik 5.8 ile analiz edilebilir (Rüzgar ve Çağlar, 2020).

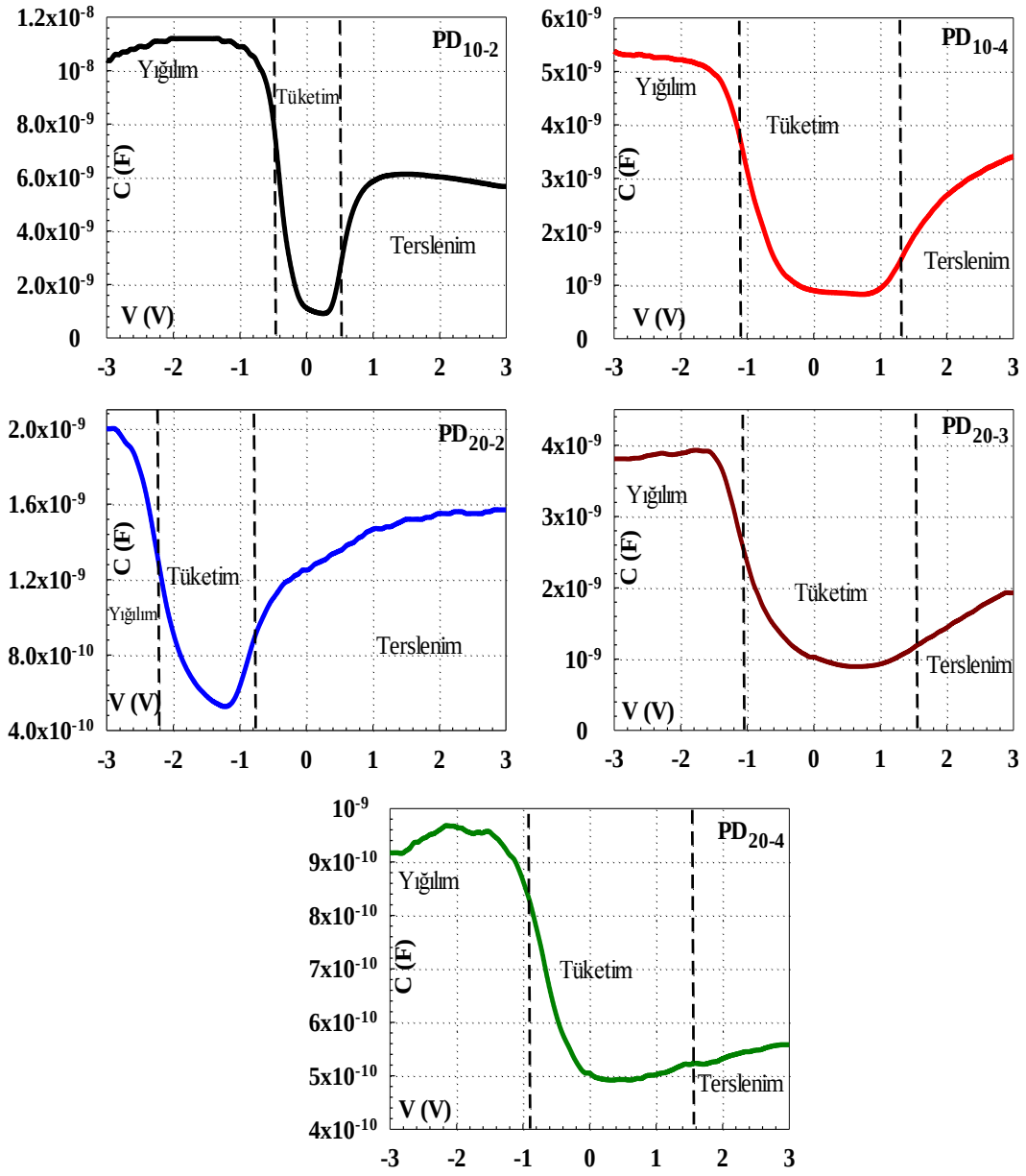
$$I_{ph} = AP^{\delta} \tag{5.8}$$

Eşitlik 5.8'de verilen I_{ph}, A, P ve δ sırasıyla foto akımı, sabit, ışık yoğunluğu ve aydınlatma katsayısıdır. Aydınlatma katsayısı δ değerini bulmak için Şekil 5.6-b'de verilen grafikte log(I_{ph}) ile log(P) arasındaki eğim kullanılır. Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların Şekil 5.6-b grafiğinden elde edilen δ değerleri 0,003 ile 0,114 arasındadır.

Foto-iletkenlik mekanizmasında oldukça önemli olan aydınlatma katsayısı değerleri, δ = 0,5 ve δ = 1 olduğunda diyotların foto-iletkenlik mekanizması sırasıyla bir bimoleküler rekombinasyon süreci ve bir monomoleküler rekombinasyon süreci ile ilişkilidir. δ değeri 0,5 ile 1 arasında olduğunda ise, foto-iletkenlik mekanizması bantta sürekli bir tuzaklama merkezlerinin dağılımı ile açıklanır. Son olarak hesaplanan δ değeri 1'den büyükse, foto-iletkenlik mekanizması süper doğrusal davranış sergiler (Mekki vd. 2016; Rüzgar ve Çağlar, 2020).

5.2 Kapasitans-Voltaj ve İletkenlik-Voltaj Karakteristikleri

Şekil 5.7'de görüldüğü gibi, 10 kHz frekans değerinde C-V grafikleri, yığılım, tüketim ve terslenim bölgeleri olarak adlandırılan üç ayrı bölgeyi göstermektedir. Şekilden de görüldüğü üzere tüm numuneler için yığılım bölgeleri uygulanan gerilimin sıfır voltajdan küçük olduğu negatif voltajlar bölgesi, tüketim bölgeleri PD_{20-2} numunesi hariç genellikle ±1 V aralığında, terslenim bölgeleri ise pozitif voltaj bölgeleridir. Ayrıca C-V eğrilerinin davranışı, her numune için farklıdır.



Şekil 5.7 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların 10 kHz'de C-V eğrileri

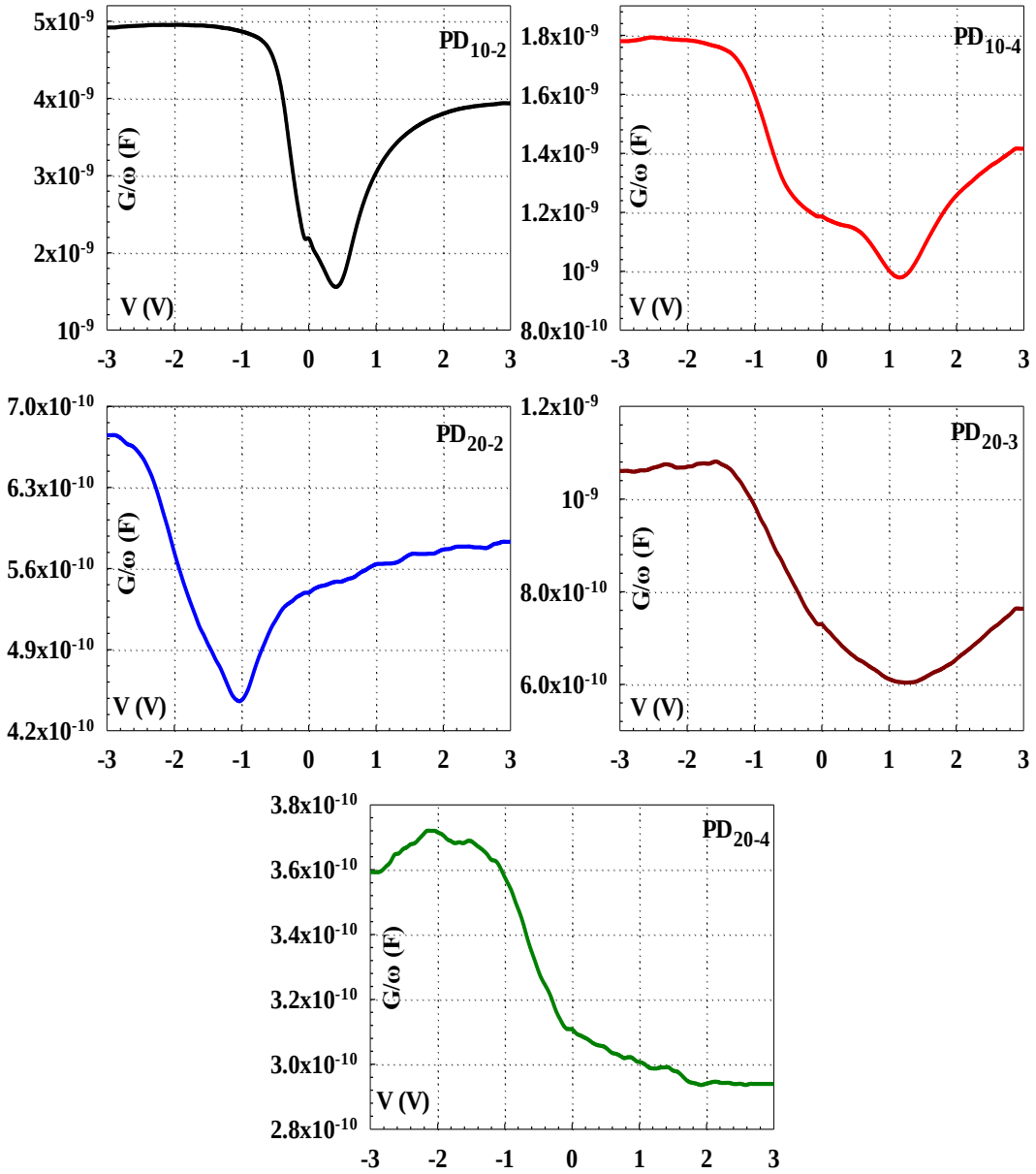
C-V eğrilerinde tüketim bölgesinde meydana gelen yarılma yarıiletken-oksit arasında ve yasak enerji bant aralığında lokalize olmuş arayüzey durumlarının varlığına atfedilebilir. C-V eğrilerinin tüketim bölgesinde görülen pik pozisyonu ve değeri yarıiletkenin yasak enerji bant aralığında yarıiletken-oksit arayüzeyinde arayüzey durumlarının özel dağılımından, yavaş ve hızlı durumların varlığından etkilenmektedir (Uslu, 2010).

Şekil 5.7'de görüldüğü gibi kapasitans değerlerinin tüketim bölgesindeki değişimi, dış elektrik alan altında yarıiletken-oksit arayüzeyindeki arayüzey durumlarının

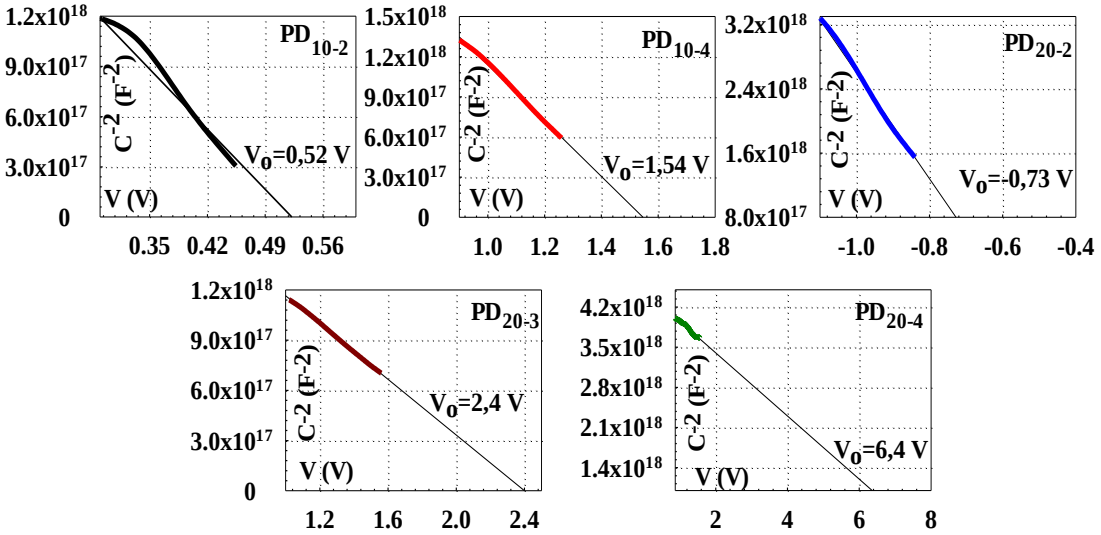
yeniden yapılanmasından ve yeniden düzenlenmesinden kaynaklanabilir. Terslenim bölgesinde kapasitansdaki değişime ise R_s'nin etkisi sebep olabilir. Görüldüğü gibi R_s kapasitans ölçümleri üzerinde arayüzey durumları kadar etkili bir parametredir. Yarıiletkenin arkasına ideal bir omik kontağın yapılamaması, yarıiletkendeki yapısal kusurlar, kirlilikler R_s'ye sebep olan faktörlerdendir. İyi performans sergileyen bir MOS yapı elde edebilmek için bu faktörlerin etkisi üretim aşamasında ve ölçüm esnasında alınacak önlemlerle en aza indirilebilir (Nicollian ve Brews, 1982; Aldemir vd. 2020).

Şekil 5.8'de Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların oda sıcaklığında 10 kHz frekans değerinde G/ω-V eğrileri verilmiştir. Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'den görüldüğü gibi ön-gerilim altında C-V eğrileri ve G/ω-V eğrileri pikler vermektedir. Bu durum literatürde anormal bir durum olarak isimlendirilir ve bu piklerin varlığı genellikle yapıdaki arayüzey oksit tabakasının varlığına, arayüzey durumlarının düşük frekansta ac sinyalini takip edebilmesine ve R_s'ye atfedilmektedir (Uslu vd. 2010; Demirezen vd. 2012).

Fotonların enerjisinin yarıiletkenin enerji bant aralığından daha büyük olduğu bilinmektedir. Bu durum yarıiletkenin tüketim bölgesinde elektron-deşik çiftlerinin oluşumuna yol açabilir. Tüketim bölgesinde böyle bir durum söz konusu olduktan sonra yapılar bir elektrik alanı ile gerilirse, bu elektron-deşik çiftleri tane sınırlarında güçlü yerel iç elektrik alanı ile ayrılır. Elektronlar, elektrik alanı tarafından hızlı bir şekilde yalıtkan tabakasından dışarı atılırken, deşikler yavaşça süpürülür ve bu nedenle kusurlar tarafından yakalanabilir. Sonuç olarak, diyotlarda ek bir foto kapasitans ve iletkenlik olacaktır (Alialy vd. 2013).



Şekil 5.8 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların 10 kHz'de G/ω-V eğrileri



Şekil 5.9 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların 10 kHz'de C^{-2}-V eğrileri

Schottky ideal olmayan bir diyot için, ters beslem kapasitansının ters karesi, voltajın doğrusal bir fonksiyonudur (Sze ve Kwok, 2007).

$$C^{-2} = \frac{2(V_R + V_0)}{q\varepsilon_s\varepsilon_0 N_d A^2} \tag{5.9}$$

Burada V_R uygulanan ters ön-gerilim, V_o C^{-2}-V grafiğinin lineer bölgesinin x ekseni (voltaj ekseni) kesiminden elde edilen kurulma voltajı, A diyotun doğrultucu kontak alanı, N_D donör (verici) konsantrasyonudur. Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların, C^{-2}-V grafiği R_s'nin etkisi ve N_{ss}'nin belirli yoğunluk dağılımı nedeniyle bir pik verir. Böylece sıfır beslem potansiyel engel yüksekliği değeri Φ_{Bo} aşağıdaki eşitlikten elde edilebilir.

$$\Phi_B(C-V) = V_0 + \frac{kT}{q} + E_F - \Delta_{\Phi B} = V_D + E_F - \Delta_{\Phi B} \tag{5.10}$$

Burada V_D sıfır beslem difüzyon potansiyeli, kT/q termal enerji ve E_F Fermi enerji seviyesi aşağıdaki eşitlikten elde edilebilir.

$$E_F = \frac{kT}{q} ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right) \tag{5.11}$$

Denklemde verilen N_C, Si iletim bandındaki etkin durum yoğunluğudur ve aşağıdaki eşitlikten elde edilir.

$$N_C = 4{,}82x10^{15}T^{3/2}\left(\frac{m_e^*}{m_0}\right)^{3/2} \text{ ve } m_e^*/m_o = 0{,}98 \tag{5.12}$$

m_e^* ve m_o sırasıyla etkin elektron kütlesi ve serbest elektron kütlesidir.

Eşitlik 5.10'da verilen $\Delta_{\Phi B}$ imaj kuvveti engel yüksekliğinin düşmesidir ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilir (Sze ve Kwok, 2007).

$$\Delta_{\Phi B} = \left[\frac{qE_m}{4\pi\varepsilon_s\varepsilon_o}\right]^{1/2} \tag{5.13}$$

E_m ise maksimum elektrik alanıdır ve aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$E_m = \left[\frac{2qN_DV_0}{\varepsilon_s\varepsilon_o}\right]^{1/2} \tag{5.14}$$

Tablo 5.3 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların 10 kHz'de C^{-2}-V eğrisinden hesaplanan elektriksel parametreleri

Numune	$N_D(cm^{-3})$	E_F(eV)	V_o(V)	Φ_B(C-V) (eV)	$\Delta_{\Phi B}$(eV)	W_D(cm)	E_m(V/cm)
PD_{10-2}	$8{,}28x10^{13}$	0,214	0,52	0,75	0,00615	$3{,}02x10^{-4}$	$3{,}45x10^{3}$
PD_{10-4}	$1{,}55x10^{14}$	0,199	1,54	1,75	0,00944	$3{,}79x10^{-4}$	$8{,}11x10^{3}$
PD_{20-2}	$4{,}67x10^{13}$	0,228	-0,73	-0,48	0,00580	$4{,}76x10^{-4}$	$3{,}07x10^{3}$
PD_{20-3}	$4{,}02x10^{14}$	0,175	2,40	2,58	0,01339	$2{,}91x10^{-4}$	$1{,}63x10^{4}$
PD_{20-4}	$8{,}92x10^{14}$	0,155	6,4	6,56	0,02088	$3{,}23x10^{-4}$	$3{,}97x10^{4}$

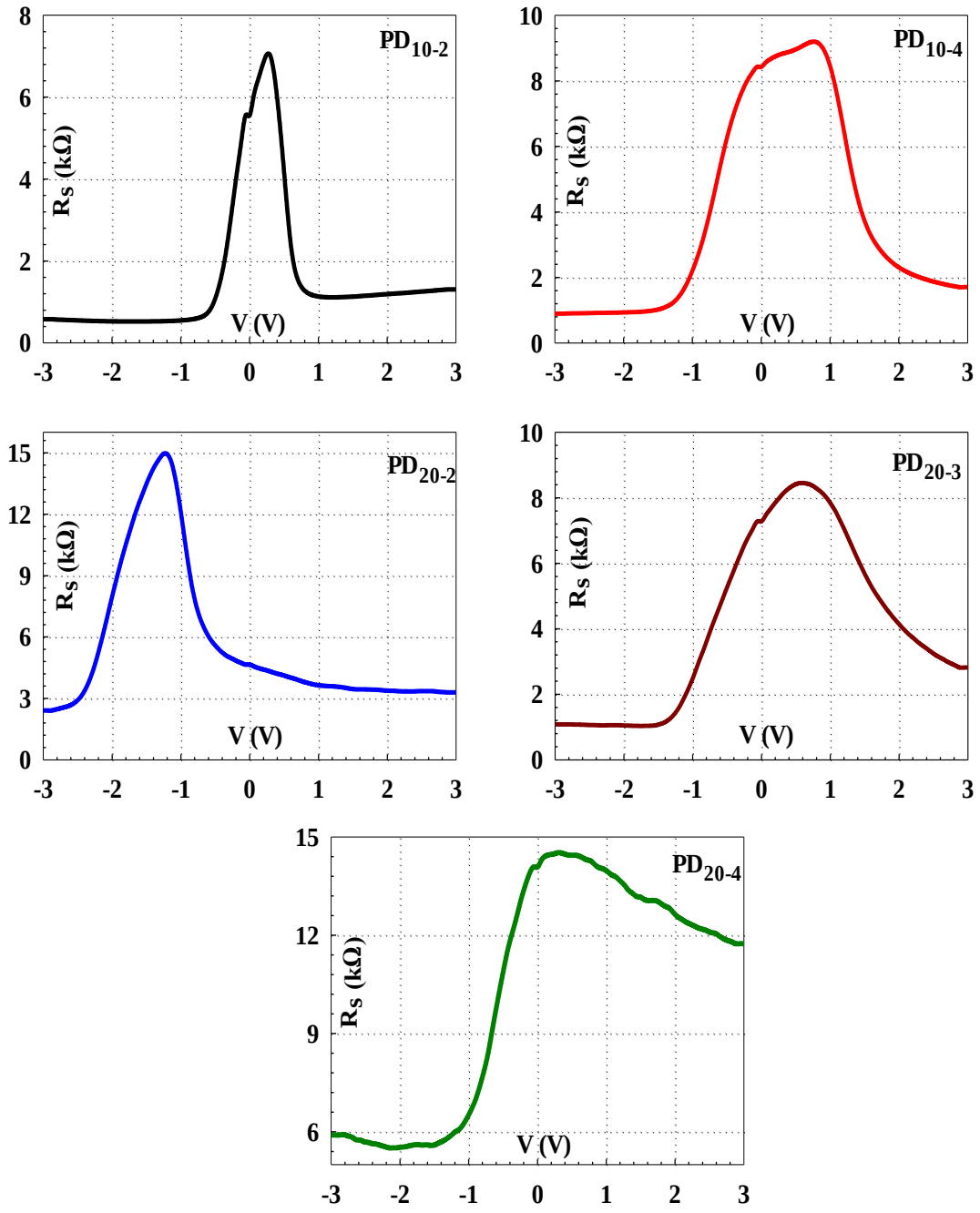
Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların temel elektriksel parametrelerini hesaplamak için C^{-2}-V eğrileri oda sıcaklığında 10 kHz frekans değerinde elde edildi ve Şekil 5.9'da verildi. Görüldüğü gibi, C^{-2}-V eğrileri farklı voltaj aralıklarında lineer bir davranış göstermektedir. Bu lineer bölgelerde; Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS tipi yapılar için yukarıdaki denklemler kullanılarak elde edilen V_o, N_D, E_F, W_D, E_m, $\Delta_{\Phi B}$ ve Φ_{Bo} değerleri Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3'ten görülebileceği gibi PD_{10-2} numunesi için Φ_{Bo} değerleri, Tablo 5.1'de verilen MOS yapılar için doğru beslem I-V verilerinden elde edilen karanlıktaki Φ_{Bo} değeri ile uyumludur. PD_{10-4}, PD_{20-3} ve PD_{20-4} numunelerinin ise C^{-2}-V eğrisinden hesaplanan Φ_{Bo} değerleri, doğru beslem I-V verilerinden elde edilen karanlıktaki Φ_{Bo} değerleri daha yüksektir. Akım-voltaj ve kapasitans-voltaj ölçümlerinden elde edilen sıfır beslem potansiyel engel yükseklikleri arasındaki fark, esas olarak homojensizliklerden kaynaklanmaktadır. Sıfır beslem potansiyel engel yükseklikleri arasındaki bu tutarsızlık, bir arayüzey tabakası veya yarıiletkendeki arayüzey durumları, imaj kuvvetinin düşürülmesinin etkisi, engel homojensizlikleri ve ölçüm sisteminin yapısı gibi nedenlerle açıklanabilir (Sze ve Kwok, 2007; Alialy vd. 2013).

MOS yapılarda seri direnci hesaplamak için birçok yöntem vardır (Norde, 1979; Nicollian ve Brews, 1982; Rhoderick ve Williams, 1988). Bu çalışmada, Nicollian ve Brews tarafından geliştirilen ve diğer metotlara göre daha doğru, hızlı ve hassas olarak kabul gören admitans metodu kullanılarak oda sıcaklığında 10 kHz frekansta MOS yapıların seri direnç değerleri aşağıdaki denklem ile elde edildi (Nicollian ve Brews, 1982).

$$R_S = \frac{G_m}{({G_m}^2 + {C_m}^2\omega^2)} \tag{5.15}$$

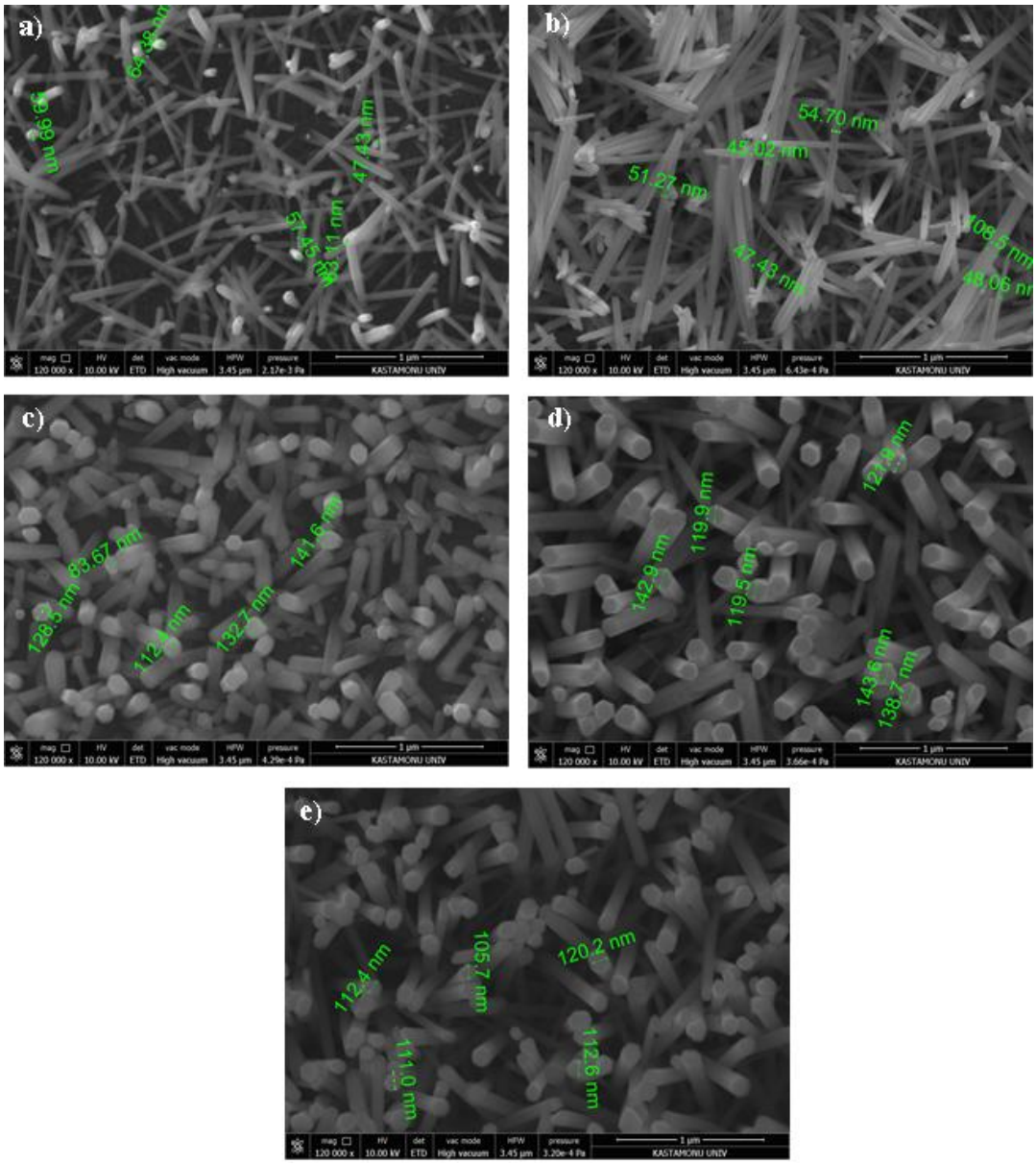
Burada C_m ve G_m sırasıyla kuvvetli yığılım bölgesindeki kapasitans ve kondüktans değerleridir. Bu yapıların gerçek seri direnç değerleri kuvvetli yığılım bölgesindeki C ve G/ω değerlerinden elde edilir. Ancak bu formül voltaja bağlı R_s değerlerini elde etmek içinde kullanılır ve bu yapının iletim mekanizmaları hakkında da bize önemli ipuçları verir.



Şekil 5.10 Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların 10 kHz'de R_s-V eğrileri

Şekil 5.10'da görüldüğü gibi R_s değerleri, voltaja oldukça bağlıdır ve genellikle ±1 V aralığında pikler vermektedir. Diğer numunelerden farklı davranış gösteren PD_{20-2} numunesinde ise bu pik değerlerinin pozisyonları negatif voltaj bölgesine kaymaktadır. R_s' nin bu davranışı, yarıiletken-oksit arasında ve yasak enerji aralığında lokalize olmuş arayüzey durumlarının yeniden yapılanıp düzenlenmesine atfedilir (Sze ve Kwok, 2007; Uslu, 2010).

5.3 Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi (SEM)



Şekil 5.11 ZnO nanoçubukların SEM görüntüleri a) PD_{10-2} b) PD_{10-4} c) PD_{20-2} d) PD_{20-3} e) PD_{20-4}

Şekil 5.11'de p-Si alttaşlar üzerine bırakılan ZnO tohum tabakalarının hidrotermal yöntemle büyütülmüş ZnO nanoçubuklarının elde edilen taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri ZnO yapılarının nanoçubuklar şeklinde olduğunu kanıtlamaktadır. PD_{10-2}, PD_{10-4}, PD_{20-2}, PD_{20-3} ve PD_{20-4} numuneleri sırasıyla ortalama 58,47; 59,16; 119,77; 131,08 ve 112,38 nm çaplara sahip olan yoğun nanoçubuk dizileridir. Nanoçubuk çaplarının 20 mM çözelti miktarı içeren numunelerde 10 mM çözelti miktarı içeren numunelere göre

arttığı görülmektedir. Ayrıca nanoçubuk üretimi için beklenen süre arttıkça numunelerin nanoçubuk çaplarının genellikle arttığı görülmektedir. Bu, nanoçubuk çaplarının büyüme çözeltisinin miktarı ve çözeltide bekleme süresiyle değiştiğini dolayısıyla büyüme oranında bir artışa neden olduğunu ortaya koymaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, farklı süre ve çözelti miktarlarında hazırlanan Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların elektriksel karakteristikleri oda sıcaklığında hem karanlık hem de farklı aydınlatma şiddetlerinde akım-voltaj (I-V), 10 kHz frekans değerinde kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G-V) ölçümleri geniş bir voltaj aralığında incelendi. Karanlık ve aydınlatma şiddetine bağlı ölçüm sonuçlarından MOS yapıların bazı temel elektriksel parametreleri hesaplandı. Özellikle yapının seri direnci ve arayüzey durumları gibi temel parametrelerin etkisi incelendi. Doğru ve ters ön-gerilim I-V ölçümlerinden diyotun doyma akımı I_o, metal ile yarıiletken arasında oluşan sıfır beslem potansiyel engel yüksekliği Φ_{Bo}, idealite faktörü n, seri ve kısa devre dirençleri (R_s ve R_{sh}) aydınlatma şiddetine bağlı elde edildi. Deneysel I-V ölçümlerinden elde edilen I_o, n, Φ_{Bo}, R_s ve R_{sh} parametrelerinin aydınlatma şiddetine oldukça bağlı olduğu gözlendi. C-V ve G-V ölçümlerinden ise elde edilen V_o, N_D, E_F, W_D, E_m, $\Delta_{\Phi B}$ ve Φ_{Bo} değerleri Tablo 5.3'te verildi.

Şekil 5.1' den de görüldüğü gibi, Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların doğru ve ters ön-gerilim altındaki yarı-logaritmik ln(I)-V eğrileri hem karanlık hem de tüm aydınlatma şiddetlerinde PD_{10-4} numunesi hariç iyi bir doğrultma özelliğine sahiptir. Doğrultma oranları PD_{10-2}, PD_{10-4}, PD_{20-2}, PD_{20-3} ve PD_{20-4} numuneleri için karanlıkta sırasıyla 15,62; 1,85; 33,53; 14,90 ve 69 olarak bulundu. Doğrultma oranı diyot performansını etkileyen önemli bir parametredir ve ne kadar yüksek ise diyot performansı da o kadar iyidir. Buna göre sonuçlar üretilen Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların 20 mM hidrotermal çözelti miktarı ve nanoçubuk üretiminde hidrotermal reaksiyonun gerçekleşmesi için etüvde 4 saat bekleme süresine sahip PD_{20-4} numunesinin daha iyi bir doğrultmaya sahip olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.1'de görüldüğü gibi yüksek gerilim bölgesinde ln(I)-V eğrileri seri direnç etkisinden dolayı lineerlikten sapmakta ve bükülmeye sebep olmaktadır. ln(I)-V eğrilerinin bu davranışı, R_s etkisinin düşük ve orta gerilim bölgelerinde ihmal edilebileceği ancak ileri ön-gerilim voltajları için ise R_s etkisinin mutlaka dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

MOS yapıların güvenilirliğini ve performansını etkileyen önemli parametrelerin başında seri direnç ve kısa devre direnci gelmektedir. Bu nedenle, Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların R_i-V grafikleri ±6 V aralığında Ohm yasası kullanılarak elde edildi (Şekil 5.3). MOS tipi fotodiyotların seri direnci R_s, pozitif voltaja (6 V) karşılık gelen değerden ve kısa devre direnci R_{sh}, negatif voltaja (-6 V) karşılık gelen değerlerden elde edildi. Aynı zamanda R_s değerleri ileri pozitif ön-gerilimler için Cheung ve Cheung yöntemi kullanılarak da elde edildi. ±6 V aralığında her iki yöntemle elde edilen sonuçlar Tablo 5.1'de verildi ve R_s değerlerinin uyumlu olduğu gözlendi. Tablodan görüldüğü üzere R_s değerleri kΩ seviyelerinde bulundu ve artan aydınlatma şiddeti ile beraber R_s değerlerinin azaldığı görüldü. R_s değerleri aynı zamanda C-V ve G-V ölçümleri üzerindeki etkisini incelemek için Nicollian ve Brews' in admitans metodu kullanılarak voltaja bağlı grafiği 10 kHz için elde edildi. Ayrıca MOS yapıların Ohm kanunundan hesaplanan teoride sonsuz olması beklenen kısa devre dirençleri (R_{sh}'ler) karanlıkta 182,93 ve 2446,60 kΩ değerleri arasında bulundu.

Doğru beslem ln(I)-V eğrilerinden elde edilen idealite faktörü değerleri karanlıkta 7,33 ve 7,92 değerleri arasında değişmektedir. Bu idealite faktörü değerlerinin 1'den büyük olması genellikle oksit tabakalarının, seri dirençlerin, potansiyel engel yüksekliği homojensizliklerinin, arayüzey durumlarının vb. etkisinden kaynaklanan nedenlere atfedildi (Nicollian ve Brews, 1982; Selçuk vd. 2012; Çiçek vd. 2018; Çiçek, 2020). Artan aydınlatma şiddeti ile idealite faktörü n değerlerinin artması ise yarıiletken-metal arasındaki potansiyel engelin homojensizliğine atfedildi (Sharma, 1984; Uslu, 2010).

Doğru beslem ln(I)-V eğrilerinin lineer bölgesinin akım eksenini kestiği noktadan hesaplanan Φ_{Bo} değerleri karanlıkta 0,71 ve 0,78 aralığındadır. Farklı aydınlatma şiddetleri için Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların doğru beslem ln(I)-V eğrilerinden elde edilen deneysel n ve Φ_{Bo} değerleri arasında lineer bir ilişki mevcuttur. Literatüre uygun olarak artan aydınlatma şiddeti ile birlikte Φ_{Bo} değerleri azalırken n değerleri artmaktadır. Bu durum Tablo 5.1'deki değerlerden açıkça görülmektedir.

Tablo 6.1 Nanoçubuk temelli yapıların karşılaştırılması ve oda sıcaklığında karanlıktaki I-V ölçümlerinden elde edilen temel elektriksel parametreleri

	Numune	NRs Çapları (nm)	Temel Elektriksel Parametreler			Kaynak
			n (TE)	Φ_{Bo} (eV) (TE)	R_s (kΩ)	
1	Al/ZnO_{-NRs}/ZnO/p-Si/Al (PD_{10-2})	~58,47	7,37	0,76	47,34[g] 48,90[h]	Bu çalışma
	Al/ZnO_{-NRs}/ZnO/p-Si/Al (PD_{10-4})	~59,16	7,49	0,76	299,67[g] 300,95[h]	Bu çalışma
	Al/ZnO_{-NRs}/ZnO/p-Si/Al (PD_{20-2})	~119,77	7,33	0,78	32,99[g] 33,48[h]	Bu çalışma
	Al/ZnO_{-NRs}/ZnO/p-Si/Al (PD_{20-3})	~131,08	7,92	0,72	9,69[g] 9,08[h]	Bu çalışma
	Al/ZnO_{-NRs}/ZnO/p-Si/Al (PD_{20-4})	~112,38	7,87	0,71	34,84[g] 34,55[h]	Bu çalışma
2	Au/ZnO_{-NRs}/ZnO/p-Si/Al[a]	66	8,81	0,68	32,1[ı]	(Kamruzzaman ve Zapien, 2017)
	Au/$ZnLiO_{-NRs}$/ZnO/p-Si/Al[b]	81	8,83	0,66	16,9[ı]	
3	Ag/SnO_{2-NRs}/p-Si/Ag[c]	-	4,50	0,78	392[g] 313[h]	(Özel vd. 2020)
	Ag/SnO_{2-NRs}/ SnO_2/p-Si/Ag[c]	-	2,80	0,72	14,3[g] 13,6[h]	
4	Au/ ZnO_{-NRs}/ZnO/ITO[d]	~60-90	3,04	0,75	-	(Mwankemwa vd. 2017)
5	Pd /ZnO_{-NRs}/ZnO/ITO[e]	100-150	4,45	0,55	-	(Ahmed vd. 2018)
	Pd/ZnO_{-NRs}(%4 Ce katkılı) /ZnO/ITO[e]	100-150	3,00	0,76	-	
6	Pd /ZnO_{-NRs}/ZnO/ITO[f]	~50-150	4,80	0,55	-	(Ahmed vd. 2018)
	Pd / ZnO_{-NRs}(%1,5 Sm katkılı) /ZnO/ITO[f]	~50-150	2,50	0,72	-	

[a] NRs üretimi: Hidrotermal yöntem, 90 °C, 5 sa, 50 mM (çözelti miktarı)
[b] NRs üretimi: Hidrotermal yöntem, 90 °C, 5 sa, 75 mM (çözelti miktarı)
[c] NRs üretimi: Hidrotermal yöntem, 95 °C, 6 sa
[d] NRs üretimi: CBD, 60 °C, 4 sa, 35 mM (çözelti miktarı)
[e] NRs üretimi: CBD, 90 °C, 2 sa
[f] NRs üretimi: CBD, 90 °C, 2 sa, 100 mM (çözelti miktarı)
[g] Cheung ve Cheung yöntemi: dV/dln(I)
[h] Cheung ve Cheung yöntemi: H(I)
[ı] Norde yöntemi: F(V)

Üretilen Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların, nanoçubuk temelli cihazların etkisini ve temel elektriksel parametrelerini karşılaştırmak için literatürdeki çalışmalardan elde edilen değerler Tablo 6.1'de verilmiştir. Çalışmalarda nanoçubuk üretimleri hidrotermal yöntem ve kimyasal banyo biriktirme (CBD) ile

gerçekleştirilmiştir. Tablodan bu çalışmadaki nanoçubuk çaplarının diğer çalışmalarla yakın aralıklarda olduğu görülmektedir. Aynı zamanda bu çalışmada hidrotermal yöntem ile üretilen ZnO nanoçubukların diğer çalışmalara kıyasla aynı sıcaklıkta (90 ^{o}C) daha az süre ve/veya çözelti miktarında benzer veya daha yüksek nanoçubuk çaplara sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 6.1'de görüldüğü üzere bu çalışmadaki tüm numunelerin Φ_{Bo} değerlerinin diğer çalışmalardaki değerlerle benzer veya daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Tabloda Cheung ve Cheung yönteminden hesaplanan bu çalışmadan elde edilen R_s değerlerinin PD_{20-3} numunesinde, bu çalışmadaki diğer numunelere ve diğer çalışmalarda verilen R_s değerlerine kıyasla daha düşük ve ideale daha yakın değerde olduğu görülmektedir. Tabloda verilen bu çalışmadaki idealite faktörü n değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum oksit tabakalarının, seri dirençlerin, potansiyel engel yüksekliği homojensizliklerinin, arayüzey durumlarının, nanoçubuk yapısı vb. etkisinden kaynaklanan nedenlere atfedilir. Üretilen MOS yapılarda R_s'nin etkisi azaltılarak idealite faktörü değerleri düşürülebilir.

Tablo 6.2 Fotodiyotların 100 mW/cm^2'de hesaplanan parametrelerinin karşılaştırılması

	Numune	R (A/W)	PS	Kaynak
1	Al/ZnO$_{-NRs}$/ZnO/p-Si/Al (PD_{10-2})	0,038	32,78	Bu çalışma
	Al/ZnO$_{-NRs}$/ZnO/p-Si/Al (PD_{10-4})	0,007	5,95	Bu çalışma
	Al/ZnO$_{-NRs}$/ZnO/p-Si/Al (PD_{20-2})	0,022	36,82	Bu çalışma
	Al/ZnO$_{-NRs}$/ZnO/p-Si/Al (PD_{20-3})	0,090	21,56	Bu çalışma
	Al/ZnO$_{-NRs}$/ZnO/p-Si/Al (PD_{20-4})	0,079	253,57	Bu çalışma
2	Al/ZnO/p-Si/Ag	0,66	700	(Rüzgar ve Çağlar, 2020)
	Al/ZnO(%1 Sn katkılı)/p-Si/Ag	0,50	800	
	Al/ZnO(%5 Sn katkılı)/p-Si/Ag	1,09	900	
3	Au/GO(0,005 MB katkılı)/p-Si/Al	-	2095	(Mekki vd. 2016)
	Au/GO(0,01 MB katkılı)/p-Si/Al	-	5182	
	Au/GO(0,1 MB katkılı)/p-Si/Al	-	1744	

Fotodiyot karakterizasyonu için önemli bir parametre olan Al/ZnO_{NRs}/ZnO/p-Si/Al tipi MOS yapıların optoelektriksel cihaz parametreleri farklı aydınlatma şiddetleri altında duyarlılık ve foto-duyarlılık değerleri hesaplandı ve Tablo 5.2'de verildi. Şekil 5.6-a ve Tablo 5.2'de görüldüğü gibi artan aydınlatma şiddeti ile duyarlılık değerlerinin azaldığı görüldü. Aynı zamanda Tablo 6.2'de MOS yapıların 100 mW/cm^2'de hesaplanan duyarlılık (R) ve foto-duyarlılık (PS) değerleri literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırıldı.

Deneysel C-V karakteristikleri oda sıcaklığında 10 kHz'de Şekil 5.7'de açıkça görüldüğü gibi yığılım, tüketim ve terslenim bölgelerine sahiptir. Bu bölgeler Şekil üzerinde gösterildi ve etkileri değerlendirildi. Ayrıca C^{-2}-V karakteristiklerinden V_o, N_D, E_F, W_D, E_m, $\Delta_{\Phi B}$ ve Φ_{Bo} değerleri elde edildi ve Tablo 5.3'te verildi. Tablodaki verilerden üretilen MOS yapıların (PD_{20-2} numunesi hariç) hidrotermal çözelti miktarı ve bekleme süresi arttıkça verici konsantrasyonu N_D, kurulma voltajı Vo, potansiyel engel yüksekliği Φ_{Bo} ve maksimum elektrik alanı E_m değerlerinin de arttığı gözlemlendi.

ZnO nanoçubukların boyutu ve dizilişlerini incelemek amacıyla SEM görüntüleri Şekil 5.11'de verildi ve değerlendirildi. Buna göre nanoçubuk çaplarının büyüme çözeltisinin miktarı ve çözeltide bekleme süresiyle büyüme oranında bir artışa neden olduğu tespit edildi.

Sonuç olarak bundan sonraki benzer çalışmalarda doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmek için MOS yapıların son derece temiz laboratuvar ortamlarında üretilmesi ve ölçüm esnasında numunelerde oluşabilecek zararların önlenmesi için oldukça dikkatli çalışılması önerilir. Ölçümler geniş bir voltaj, frekans ve sıcaklık aralığında alınmalıdır. Elektriksel, optoelektriksel vb. karakteristiklerinden elde edilen değerler birden fazla yöntemle ve literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

Acar, F. Z., Büyükbaş-Ulusan, A., & Tataroğlu, A. (2018). Analysis of interface states in Au/ZnO/p-InP (MOS) structure. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(15), 12553-12560. doi:10.1007/s10854-018-9371-y.

Ahmed, M. A. M., Meyer, W. E., & Nel, J. M. (2018). Structural, optical and electrical properties of a Schottky diode fabricated on Ce doped ZnO nanorods grown using a two step chemical bath deposition. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 87, 187-194. doi:10.1016/j.mssp.2018.07.021.

Ahmed, M. A. M., Mwankemwa, B. S., Carleschi, E., Doyle, B. P., Meyer, W. E., & Nel, J. M. (2018). Effect of Sm doping ZnO nanorods on structural, optical and electrical properties of a Schottky diodes prepared by chemical bath deposition. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 79, 53-60. doi:10.1016/j.mssp.2018.02.003.

Akın, B. (2015). Au/ZnO/n-GaAs (MIS) Schottky Engel Diyotların (SBDs) Elektriksel Karakteristiklerinin Frekans ve Voltaja Bağlı İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Ankara.

Aldemir, D. A., Lapa, H. E., Özdemir, A. F., & Uçar, N. (2020). Doğal oksit arayüzey tabakalı Zr/p-Si Schottky diyotlarının yüksek frekanslarda kapasite-gerilim ve iletkenlik-gerilim karakteristiklerinin analizi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(3), 1024-1030. doi:10.17798/bitlisfen.655179.

Algün, G. (1996). Gözenekli Silisyumda Elektriksel Olayların İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.

Alialy, S., Tecimer, H., Uslu, H., & Altındal, Ş. (2013). A comparative study on electrical characteristics of Au/N-Si Schottky diodes, with and without bi-doped PVA interfacial layer in dark and under illumination at room temperature. *Journal of Nanomedicine & Nanotechnology*, 4(3). doi:10.4172/2157-7439.1000167.

Ayhan, S. (2012). n-Si/Metal Kompleksi/Au Yapıların Aygıtsal Özellikleri ve Panaf Metal Kompleksinin Optiksel Özelliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Diyarbakır.

Baran, H. M. (2015). MOS Kapasitörün Elektriksel Özellikleri Üzerine Gama Radyasyonun Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Ankara.

Bozkaplan, C. (2015). RF Saçtırma Yöntemi ile Biriktirilen CdS ve ZnS İnce Filmlerin Karakterizasyonu ve Heteroeklem Üretiminde kullanılması. Doktora Tezi, *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Diyarbakır.

Büyükbaş, A. (2015). AuGe/SiO_2/p-Si/AuGe (MOS) Kapasitörün Elektrik ve Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Ankara.

Çetinkaya, S. (2011). Al/ZnO/p-Si ve Au/CuO/p-Si Schottky Yapıların Farklı Metotlarla Elde Edilmesi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Hatay.

Cheung, S. K., & Cheung, N. W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49(2), 85-87. doi:10.1063/1.97359.

Çiçek, O. (2016). Polivinil Alkol Arayüzey Tabakalı Schottky Engel Diyotların Hazırlanması ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Karabük.

Çiçek, O., Tan, S. O, Tecimer H., & Altındal, Ş. (2018). Role of graphene-doped organic/polymer nanocomposites on the electronic properties of Schottky junction structures for photocell applications. *Journal of Electronic Materials*, 47(12), 7134-7142. doi:10.1007/s11664-018-6644-4.

Çiçek, O., Kurnaz, S., Bekar A., & Öztürk, Ö. (2019). Comparative investigation on electronic properties of metal-semiconductor structures with variable ZnO thin film thickness for sensor applications. *Composites Part B*, 174. doi:10.1016/j.compositesb.2019.106987.

Çiçek, O. (2020). Improving the electronic properties of Au/n-Si type Schottky junction structure with graphene-PVP nano-thin film by using the I-V, C^{-2}-V and G/ω-V characteristics. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 19, 172-178. doi:10.1109/TNANO.2020.2972036.

Dahotre, N. B., & Sudarshan, T. S. (1999). *Intermetallic and seramic coatings* 1rd ed. New York: Marcel Dekker Inc.

Demirezen, S., Sönmez, Z., Aydemir, U., & Altındal, Ş. (2012). Effect of series resistance and interface states on the I-V, C-V, and G/ω-V characteristics in Au/Bi-doped polyvinyl alcohol (PVA)/n-Si Schottky barrier diodes at room temperature. *Current Applied Physics*, 12(1), 266-272. doi:10.1016/j.cap.2011.06.016.

Erbaş Aral, H. (2010). MIS Yapıların Dielektrik Özelliklerinin Frekans ve Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Ankara.

Fang, F., Futter, J., Markwitz, A., & Kennedy, J. (2009). UV and humidity sensing properties of ZnO nanorods prepared by the are discharge method. *Nanotechnology*, 20(24). doi:10.1088/0957-4484/20/24/245502.

Gökçen, M., & Altuntaş, H. (2009). On the profile of temperature dependent electrical and dielectric properties of Au/SiO_2/n-GaAs (MOS) structures at various frequencies. *Physica B*, 404(21), 4221-4224. doi:10.1016/j.physb.2009.08.023.

Göksu, T., Yıldırım, N., Korkut, H., Özdemir, A. F., Turut, A., & Kökçe, A. (2010). Barrier height temperature coefficient in ideal Ti/n-GaAs Schottky contacts. *Microelectronic Engineering*, 87(9), 1781-1784. doi:10.1016/j.mee.2009.10.012.

Growe, A. S. (1967). *Physics and technology of semiconductor devices*. New York: Jonh Wiley & Sons.

Güngör, E., & Güngör, T. (2017). ZnO ince filmlerin sıcaklığa bağlı elektriksel davranışında Co etkisinin incelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 19(56), 421-431. doi:10.21205/deufmd.2017195643.

Kamruzzaman, M., & Zapien, J. A. (2017). Reduction of Schottky barrier height, turn on voltage, leakage current and high responsivity of Li doped ZnO nanorod arrays based Schottky diode. *Journal of Nanoscience & Nanotechnology*, 17(7). doi:10.1166/jnn.2017.13741.

Lee, D. U., Park, H. Y., Park, M. G., Ismayilov, V., & Chen, Z. (2015). Synergistic bifunctional catalyst design based on perovskite oxide nanoparticles and intertwined carbon nanotubes for rechargeable zinc−air battery applications. *Applied Materials & Interfaces*, 7, 902-910. doi:10.1021/am507470f.

Lök, R. (2017). Electrical characterization and gamma irradiation response of $HfSiO_4$ metal oxide semiconductor (MOS) capasitors. Yüksek Lisans Tezi, *Abant İzzet Baysal Üniversitesi Doğal ve Uygulamalı Bilimler Enstitüsü*. Bolu.

Mekki, A., Dere A., Mensah Darkwa, K., Al-Ghamdi A., Gupta, R. K., Harrabi, K., Farooq, W. A., El-Tantawy, F., & Yakuphanoğlu, F. (2016). Graphene controlled organic photodetectors. *Synhtetic Metals*, 217, 43-56. doi:10.1016/j.synthmet.2016.03.015.

Mwankemwa, B. S., Nambala, F. J., Kyeyune, F., Hlatshwayo, T. T., Nel, J. M., & Diale, M. (2017). Influence of ammonia concentration on the microstructure, electrical and raman properties of low temperature chemical bath deposited ZnO nanorods. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 71, 209-216. doi: 10.1016//j.mssp.2017.08.005.

Nicollian, E. H., & Brews, C. R. (1982). *MOS Physics and technology devices*. New York: Jonh Wiley & Sons.

Norde, H. (1979). A modified forward IV plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50(7), 5052-5053. doi:10.1063/1.325607.

Nurtan, Y. (2010). Au/SiO_2/n-Si MOS Yapıların C-V-f ve G-V-f Karakteristiklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Konya.

Ohring, M. (1992). *The materials science of thin films*. New Jersey: Academic Press.

Özel, K., Atılgan, A., Köksal, N. E., & Yıldız, A. (2020). A route towards enhanced UV photo-response characteristics of SnO_2/p-Si based heterostructures by hydrothermally grown nanorods. *Journal of Alloys and Compounds*, 849. doi:10.1016/j.jallcom.2020.156628.

Rhoderick, E. H., & Williams, R. H. (1988). *Metal-semiconductor contacts 2nd ed*. Oxford: Clarendon Press.

Rüzgar, Ş., & Çağlar, M. (2020). Fabrication and characterization of solution processed Al/Sn:ZnO/p-Si photodiodes. *Material Science in Semiconductor Processing*, 115. doi:10.1016/j.mssp.2020.105076.

Saghrouni, H., Jomni, S., Belgacem, W., Elghoul, N., & Beji, L. (2015). Temperature dependent electrical and dielectric properties of a Metal/Dy_2O_3/n-GaAs (MOS) structure. *Material Science in Semiconductor Processing*, 29, 307-314. doi:10.1016/j.mssp.2014.05.039.

Sannakashappanavar, B. S., Pattanashetti, N. A., Byrareddy, C. R., & Yadav, A. B. (2018). Study of annealing effect on the growth of ZnO nanorods on ZnO seed layers. *Materials Today:Proceedings*, 17(3), 553-559.

Selçuk, A. B., Bilge Ocak, S., & Karadeniz, S. (2012). Gaussian distribution on electrical characteristics of Al/SiO_2/p-Si Structures. *American Journal of Materials Science*, 2(4), 125-130. doi:10.5923/j.materials.20120204.05.

Sharma, B. L. (1984). *Metal-Semiconductor Schottky barrier junctions and their applications* (pp. 1-3). New York: Plenum Press.

Singh, J. (1994). *Semiconductor devices an introduction*. New York: McGrawHill.

Sze, S. M., & Kwok, K. Ng. (2007). *Physics of semiconductor devices* 3rd ed. New Jersey: Jonh Wiley & Sons.

Tan, S. O., Uslu Tecimer, H., Çiçek, O., Tecimer, H., Orak, İ., & Altındal, Ş. (2016). Electrical characterizations of Au/ZnO/n-GaAs Schottky diodes under distinct illumination intensities. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27(8), 8340-8347. doi:10.1007/s10854-016-4843-4.

Tan, S. O. (2018). Schottky yapılar üzerine inceleme ve analiz çalışması. *Politeknik Dergisi*, 21(4), 977-989. doi:10.2339/politeknik.426648.

Tataroğlu, A., & Altındal, Ş. (2008). Analysis of interface states and series resistance of MIS Schottky diodes using the current-voltage (I-V) characteristics. *Microelectronic Engineering*, 85(1), 233-237. doi:10.1016/j.mee.2007.05.043.

Taur, Y., & Ning, T. H. (1998). *Fundamentals of modern VLSI devices*. New York: Cambridge University Press.

Temel, S., Nebi M., & Peker, D. (2017). Sol-gel döndürerek kaplama tekniği ile saydam iletken ZnO ince filmlerin üretilmesi ve karakterizasyonu. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(3), 51-59.

Thongma, S., Boonkoom, T., Tantisantisom, K., & Krisdanurak, D. (2017). Influence of ZnO seed layer on the alignment of hydrothermal growth ZnO NR array and influence of surface area of metal contact on p-n junction diode behavior. *Materials Today:Proceedings*, 5(7), 15203-15207. doi:10.1016/j.matpr.2018.04.083.

URL-1. Biointerface: Si(111) surface diamond lattice structure, http://www.biointerface.org/nano/templates/silicon/, Erişim tarihi: 07/11/2020.

URL-2. Movement of electrons and holes in semiconductor, http://www.shindengen.com/products/semi/column/basic/semi/rectifying_action.html, Erişim tarihi: 09/11/2020.

URL-3. Series 2400 SourceMeter SMU Instruments, http://www.farnell.com/datasheets/2619865.pdf, Erişim tarihi: 10/11/2020.

URL-4. Small Area Collimated Lens Based Solar Simulators SF Series, http://www.scienceteching.com/fileuploader/download/download/?d=1&file=custom%2Fupload%2FFile-1580320136.pdf, Erişim tarihi: 10/11/2020.

URL-5. 6500B Series Impedance Analyzer, http://www.waynekerrtest.com/products_detail.php?indexs=4, Erişim tarihi: 10/11/2020.

Uslu, H. (2010). Au/(Co, Zn-Katkılı) Polivinil Alkol/n-Si Schottky Engel Diyotlarının Hazırlanması ve Elektriksel Özelliklerinin Aydınlatma Şiddetine Bağlı İncelenmesi. Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Ankara.

Uslu, H., Altındal, Ş., Aydemir, U., Dökme, İ., & Afandiyeva, İ. M. (2010). The interface states and series resistance effects on the forward and reverse bias I-V, C-V, and G/ω-V characteristics of Al-TiW-Pd_2Si/n-Si Schottky barrier diodes. *Journal of Alloys and Compounds*, 503(1), 96-102. doi:10.1016/j.jallcom.2010.04.210.

Vaseem, M., Umar, A., & Hahn, Y. B. (2009). ZnO nanoparticles: growth, properties, and applications. A. Umar & Y. B. Hahn (Eds.), *Metal oxide nanostructures and their applications* (pp. 1-36). California: American Scientific Publishers.

Yuanyuan, S., Yang, Z., Cao, H., & Liu, Z. (2010). Controlled c-oriented ZnO nanorod array sand m-plane ZnO thin growth on Si substrate by a hydrothermal method. *Journal of Crsytal Growth*, 312(4), 568-572. doi:10.1016/j.jcrysgro.2009.11.045.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Merve KARASÜLEYMANOĞLU

Doğum Yeri ve Yılı : KASTAMONU / 1994

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Mustafa Kaya Anadolu Lisesi, 2012

Lisans : Bülent Ecevit Üniversitesi, 2016