

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

ÜÇ BİLEŞENLİ METAL OKSİT ESASLI FOTOSENSÖRLERİN ÜRETİLMESİ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erdal KARAKUŞ

OCAK - 2025

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

ÜÇ BİLEŞENLİ METAL OKSİT ESASLI FOTOSENSÖRLERİN
ÜRETİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erdal KARAKUŞ

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Burhan COŞKUN

Ocak – 2025

“ÜÇ BİLEŞENLİ METAL OKSİT ESASLI FOTOSENSÖRLERİN ÜRETİLMESİ” adlı tez çalışması **Erdal KARAKUŞ** tarafından hazırlanmış olup aşağıdaki jüri tarafından **OY BİRLİĞİ** ile Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Burhan ÇOŞKUN
Kırklareli Üniversitesi

.....

Jüri Üyeleri:

Prof. Dr. Serpil AKÖZCAN PEHLİVANOĞLU
Kırklareli Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL
Gazi Üniversitesi

.....

Tez Savunma Tarihi: 08/01/2025

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

ETİK BEYAN

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

Erdal KARAKUŞ
08/01/2025

ÖZET

ÜÇ BİLEŞENLİ METAL OKSİT ESASLI FOTOSENSÖRLERİN ÜRETİLMESİ

Erdal KARAKUŞ

Yüksek Lisans Tezi

Kırklareli Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Danışman: Doç. Dr. Burhan COŞKUN

Ocak 2025, 51 sayfa

Hazırlanan Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si (5:2:2:1) fotodiyotun elektrik ve optik özellikleri; karanlık ile 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddeti altında $\pm 4\text{V}$ aralığında incelendi. Temel elektrik parametrelerden idealite faktörü (n), ters-beslem doyma akımı (I_0), metal/yarıiletken arayüzeyinde oluşan engel yüksekliği (Φ_{B0}), seri/kısa devre dirençleri (R_s , R_{sh}) ve doğrultma oranı ($RR=I_F/I_R$ ($\pm 4\text{V}$)) termiyonik emisyon (TE) teorisi baz alınarak hesaplandı. Bir fotodiyotun performansını önemli ölçüde etkileyen arayüzey durumlarının enerjiye bağlı dağılım ($N_{ss}-(E_{ss}-E_v)$) ve voltaja bağlı rezistans (R_i) profilleri de sırasıyla Card-Rhoderick ve Ohm yasası kullanılarak elde edildi. Bu temel elektriksel parametrelerden n , R_s ve Φ_B değerleri; Norde ve Cheung fonksiyonlarından da elde edilerek TE teorisinden elde edilenlerle ve mevcut literatürle kıyaslandı. Bir fotodiyotun ışığa bağlı duyarlılığını belirleyen optik parametrelerden foto-duyarlılık (S), foto-tepki (R) ve foto-dedektivite (D^*) değerleri voltaja bağlı olarak elde edildi. Elde edilen sonuçlar, hazırlanan fotodiyotun iyi bir doğrultma özelliğine sahip olduğu ve aydınlatma şiddetine oldukça duyarlı olduğu ve dolayısıyla fotodiyot, güneş pili ve diğer optik uygulamalarda klasik metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) fotodiyotlar yerine başarıyla kullanılabileceğini göstermiştir. $\ln(I_F)-\ln(V_F)$ eğrileri; düşük, orta ve yüksek voltajlara karşılık gelen farklı eğimli üç lineer bölge sergiledikleri ve bu eğimler kullanılarak akım-iletiminde Ohmik, uzay-yükü sınırlı akım (SCLC) ve tuzak-yükü sınırlı akım (TCLC) mekanizmalarından hangisinin etkin olduğu belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si fotodiyot; Elektrik ve optik özellikler; Arayüzey durumları, Foto-duyarlılık.

ABSTRACT

FABRICATION OF THREE-COMPONENT METAL OXIDE BASED PHOTODETECTORS

Erdal KARAKUŞ

MSc Thesis

Kirklareli University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Burhan COŞKUN

January 2025, 51 pages

The investigation electric and optic characteristics of the fabricated Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si (5:2:2:1) photodiode in dark and under 100 mW/cm^2 in the voltage range of $\pm 4\text{V}$. Their basic electrical parameters such as ideality-factor (n), reverse saturation current (I_0), the formation of barrier-height (Φ_{B0}) at metal/semiconductor interface, series/shunt resistances (R_s , R_{sh}), rectification-ratio ($RR=I_F/I_R \pm 4\text{V}$) were calculated by using thermionic-emission (TE) theory. Both the energy dependent of ($N_{ss}-(E_{ss}-E_v)$) and voltage dependent resistance (R_i) distributions were obtained from the Card-Rhoderick and Ohm Law, respectively. Among these parameters n , R_s , and Φ_{B0} was also calculated from the Norde and Cheung functions and compared with both TE and available literature. Optical parameters that determine the light-dependent sensitivity of a photodiode like photo-sensitivity (S), photo-responsibility (R), and photo-detectivity (D^*) values were also obtained. Obtained results show that the fabricated photodiode has good rectification ratio and more sensitivity to illumination so can be successfully used in solar cells and optical applications instead in conventional metal/insulator/semiconductor (MIS) photodiodes. The $\ln(I_F)-\ln(V_F)$ plots have also show three different linear regimes with different slopes. Among Ohmic, space charge limited current (SCLC), and trap charge limited current (TCLC) mechanisms, in current conduction mechanism, which was dominated determined by using the slopes of these linear parts.

Keywords: Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si photodiode; Electric and dielectric properties; Surface states, Photosensitivity.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca bilimsel katkı ve yardımlarıyla beni yönlendirerek her türlü desteğini ve emeğini esirgemeyen değerli danışmanım Doç. Dr. Burhan COŞKUN hocama sonsuz teşekkür eder saygılarımı sunarım.

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

Bu süreçte sabırları, sevgileri ve destekleriyle her an yanımda olan sevgili eşim Dilek KARAKUŞ ve hayatımın neşesi oğlum E. Doğaç KARAKUŞ'a da minnettarım. Onların varlığı, bu çalışmayı tamamlarken en büyük motivasyon kaynağım oldu.

Erdal KARAKUŞ

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	vii
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. SCHOTTKY TİPİ MS VE MIS YAPILARININ TEORİSİ	5
2.1. Metal/Yarıiletken (MS) ve Metal/Arayüzey-tabaka/Yarıiletken (MIS) Yapılar ...	5
2.2. MS ve MIS tipi Schottky Engel Diyotlarda Akım-İletim Mekanizması	8
2.3. MS ve MIS tipi Schottky Engel Diyotların Optik Özellikleri	11
2.4. Fotodiyot Üretiminde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri ve İşlevleri.....	12
2.4.1. Kadmiyum Oksit (CdO)	12
2.4.2. Çinko Oksit (ZnO)	13
2.4.3. Nikel Oksit (NiO)	15
2.4.4. Titanyum (Ti)	16
2.4.5. Silisyum (Si).....	18
3. DENEYSEL DETAYLAR	21
4. DENEYSEL SONUÇLAR	25
4.1 Karanlık ve Işık Altındaki Deneysel Akım-Voltaj Karakteristikleri	25
4.2 Fotoelektrik Karakteristikleri.....	35
4.3 Sığa-Voltaj Karakteristikleri.....	38
5. SONUÇLAR.....	43
KAYNAKLAR.....	45
ÖZGEÇMİŞ	51

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge 2. 1. n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler için doğrultucu ve ohmik kontak oluşumu.....	5
Çizelge 2. 2. Si kristalinin temel fiziksel özellikleri.....	20
Çizelge 4. 1. Karanlık ve 100mW/cm^2 ışık şiddeti altında elde edilen temel elektriksel parametreler.	29
Çizelge 4. 2. Karanlık ve 100mW.cm^{-2} ışık şiddeti altında elde edilen diğer elektriksel parametreler.	31



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 2. 1. P-tipi MS diyotun enerji band diyagramı (a) kontak yapılmadan önce (b) kontak yapıldıktan sonra.....	6
Şekil 2. 2. MS Schottky kontağın enerji bant diyagramları: (a) ileri beslem (forward, $V>0$) ve (b) ters beslem (reverse, $V<0$) durumları.	7
Şekil 2. 3. CdO'nun kristal yapısı.	12
Şekil 2. 4. NiO'in kristal yapısı. [87].....	15
Şekil 2. 5. Elmas ve elmas benzeri Si (ve Ge) yapılara ait kristal yapı [59].....	18
Şekil 3. 1. Deneysel ölçümlerin gerçekleştirilmesinde kullanılan ölçüm ve kontrol cihazlarını.....	22
Şekil 3. 2. Hazırlanan Al/(ZnCdNiTiO ₂)/p-Si Quaternary fonksiyonel Schottky tipi fotodiyotların şematik yapısı.....	22
Şekil 3. 3. Hazırlanan Al/(ZnCdNiTiO ₂)/p-Si Quaternary fonksiyonel Schottky tipi fotodiyotların akım-voltaj-ışık şiddeti (I-V-P) ölçüm sistemi.	23
Şekil 3. 4. Hazırlanan fotodiyotun enerji-bant diyagramı.....	23
Şekil 3. 5. Hazırlanan fotodiyotun elektronik devresi.	23
Şekil 4. 1. Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyotun karanlık ortamda metrik ve yarı logaritmik skaladaki I-V ölçümleri.....	25
Şekil 4. 2. Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyotun 100mW.cm ⁻² ışık şiddeti altında metrik ve yarı logaritmik skaladaki I-V ölçümleri.....	26
Şekil 4. 3. Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyotun karanlık ve 100mW.cm ⁻² ışık şiddeti altında elde edilen R _i -V _i eğrileri.	28
Şekil 4. 4. Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyotun karanlık ve 100mW.cm ⁻² ışık şiddeti altında elde edilen dV/dln(I) - V ve H(I) - V grafikleri.	30
Şekil 4. 5. Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyotun karanlık ve 100mW/cm ² ışık şiddeti altında elde edilen F(V)-V grafiği.	32
Şekil 4. 6. Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyotun karanlık ve 100mW/cm ² ışık şiddeti altında elde edilen üç farklı voltaj bölgesi için ln(I _F)-ln(V _F) grafikleri.	33
Şekil 4. 7. Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyotun karanlık ve 100mW.cm ⁻² ışık şiddeti altında elde edilen N _{ss} - (E _{ss} -E _v) dağılım profilleri.	35
Şekil 4. 8. Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyotun 100mW.cm ⁻² için S-V grafiği.....	36
Şekil 4. 9. Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyotun 100mW.cm ⁻² için R-V grafiği.	37
Şekil 4. 10. Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyotun 100mW.cm ⁻² için D [*] -V grafiği.....	37
Şekil 4. 11. Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyotun 500 kHz de ölçülen C-V grafiği.	39
Şekil 4. 12. Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyot 500 kHz için ters beslem C ⁻² -V grafiği	39

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
$C_o(F)$	Boş kapasitörün sığası
$C_i(F)$	Arayüzey tabakanın sığası
C_m	Ölçülen sığa değeri
E	Elektrik alan
$E_c (eV)$	Yarıiletkenin iletkenlik bandı kenarı
$E_g (eV)$	Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
$E_F (eV)$	Fermi enerji
$E_v (eV)$	Yarıiletkenin valans bandı kenarı
F	Sığa birimi-Farad
S	İletkenlik birimi
$G_m (S)$	Ölçülen iletkenlik değeri
$\omega (=2\pi f)$	Açısal frekans
Hz	Frekans birimi-Hertz
$I (A)$	Akım
$I_0 (A)$	Ters beslem doyma akımı
$J (A.cm^{-2})$	Ters beslem doyma akım yoğunluğu
$P (Watt/cm^2)$	Aydınlatma şiddeti
$R(Watt/Amper)$	Fototepki
$D^* (Jones)$	Etkin dedektivity
S	Sensitivity
n	İdealite faktörü
$R_s (\Omega)$	Diyotun seri direnci
$R_{sh} (\Omega)$	Diyotun kısa devre direnci
$V (V)$	Devreye uygulanan gerilim

V_D (V)	Diyot üzerine düşen gerilim
V_F (V)	Diyota uygulanan ileri beslem gerilimi
V_R (V)	Diyota uygulanan ters beslem gerilimi
ϵ_0 (F/m)	Boşluğun elektrik geçirgenliği
ϵ^*	Kompleks dielektrik sabiti
σ	Elektrik iletkenlik
σ_{ac} (S/cm)	AC elektriksel iletkenlik
Φ_B (eV)	Schottky engel yüksekliği
Φ_{Bo} (eV)	Sıfır beslem Schottky engel yüksekliği
Φ_e (eV)	Etkin engel yüksekliği
Φ_m (eV)	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s (eV)	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ_e (eV)	Elektron yakınlığı
$^{\circ}C$	Sıcaklık birimi-Celcius derece
K	Sıcaklık birimi (Kelvin olarak)
d_i	Arayüzey tabakanın kalınlığı
W_D	Tükenim tabakası genişliği

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

N_{ss}	Arayüzey durumları
SCLC	Uzay-yükü sınırlı akım
TCLC	Tuzak-yükü sınırlı akım



1. GİRİŞ

Metal/yarıiletken (MS) ve metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) yapılara bu konudaki önemli katkılarından dolayı bilim insanı W. Schottky' ye atfen genelde Schottky diyotları (SDs) veya Schottky engel diyotları (SBDs) olarak adlandırılır. Schottky engel/bariyer diyotların gelişimi 1874 yıllarına kadar uzanır. F. Braun, 1874' de bakır (Cu), demir (Fe) ve kurşun sülfür (PbS) kristalleri üzerindeki metal kontakların doğrultucu özellik gösterdiğini ispatladı [1-3]. Daha sonraları, nokta-kontaklı diyotların kararsız oldukları tespit edilmiş ve dolayısıyla bunların yerini, bir yarıiletkenin Silisyum (Si), Germanyum (Ge) veya Arsenit (As) yüzeyine ince bir metal tabakanın kaplanması veya büyütülmesi ile oluşturulan MS diyotlar almıştır [5-10]. Schottky ve Mott daha sonra birbirinden bağımsız olarak aynı sürede, metal ile yarıiletken arasında oluşan potansiyel engel oluşumunun fizikini hem daha detaylı açıklamak hem de engelin yüksekliği ile geometrisini belirtmeye çalışmak için modeller önerdi [1-4].

Son zamanlarda, bilim adamları, bu klasik MS tipi SD' ler yerine farklı, arayüzeyi yalıtkan, ferroelektrik, saf veya metal/metal-oksit MIS, MFS ve MPS tipi SD' ler üzerine yoğunlaştılar [11-15]. Burada, bilim adamları metal ile yarıiletken (M/S) arasına özellikle daha yüksek dielektrikli bir arayüzey tabaka kullanarak MS yapının performansını ve kalitesini artırmaya amaçlamışlardır. Onlara göre, yüksek dielektrikli bir arayüzey tabaka hem yarıiletken ile arayüzey tabaka arasında istenmeyen çok sayıdaki tuzağın veya izinli enerji seviyesini hem de diyotun seri direnci (R_s) ile kaçak akımını önemli ölçüde azaltacağına inanıyorlardı [17-21]. Bu arayüzey tabakaların dielektrik sabiti değerleri kadar, kalınlıkları ve homojenlikleri de o kadar önemlidir. Böylesi bir dielektrik tabaka metal ile yarıiletkeni birbirinden izole eder, aralarındaki yük geçişlerini düzenler ve istenmeyen kaçak akımı da önemli ölçüde azaltır. Schottky tipi diyotların yüksek frekanslarda çalışabilmeleri ve hızlı tepki süresine sahip olmalarıyla, güç-döğrultme devrelerinde, fotodiyotlarda, güneş pillerinde ve optoelektronik aygıt teknolojisi gibi çeşitli alanlarda uygulama alanı mevcuttur [3-7]. Metal oksit nano yapılar daha yüksek ışık toplama özelliğine veya ışığa karşı yüksek duyarlılıklarından dolayı optik ve fotonik uygulamalarda da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [21-26].

Ancak bu yarıiletken aygıtların performansı veya başka bir ifadeyle kalitesini ve gerek akım-iletim mekanizmalarını gerekse de kapasitans/kondüktans-voltaj (C/G-V) ölçümlerini etkileyen çok sayıda faktör mevcuttur. Bunların başlıcaları yarıiletken kristalin yüzey temizleme ile fabrikasyon işlemleri, metal ile yarıiletken arasında doğal veya yapay olarak oluşturulan bir ince arayüzey tabaka/film, onun kalınlığı ile dielektrik sabiti değeri, yarıiletkene katkılanan alıcı veya verici katkı atomlarının (N_A , N_D) yoğunluğu, yine metal-yarıiletken arasında oluşan engelin biçimi/homojenliği, arayüzey tabaka ile yarıiletken arasında oluşan arayüzey durumları/tuzakları, yapının seri ve kısa devre dirençleri, sıcaklık, frekans ve elektrik alan veya voltajdır [27-35].

Bu tez çalışmasında, hazırlanan Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si (5:2:2:1) fotodiyotun hem elektrik hem de optik özellikleri; karanlık ile 100 mW/cm^2 aydınlatma/ışık şiddeti altında ve $\pm 4\text{V}$ gerilim aralığında I-V ve C/G-V ölçümleri kullanılarak detaylıca incelendi. Diyotun temel elektrik parametreleri olan n , I_0 , M-S arasında oluşan sıfır-beslem potansiyel engel-yüksekliği (Φ_{B0}), R_s , R_{sh} ve $RR=I_F/I_R$ değerleri standart termiyonik emisyon (TE) teorisi baz alınarak hem karanlık hem de belli bir ışık şiddeti altında hesaplandı. Buna ilave olarak, enerjiye ($E_{ss}-E_v$) bağlı N_{ss} ve voltaja bağlı R_i profilleri de sırasıyla Card-Rhoderick ve Ohm yasası kullanılarak elde edildi. Yine temel elektriksel parametrelerden n , R_s ve Φ_B değerleri; Norde ve Cheung fonksiyonlarından da elde edilerek hem TE teorisinden elde edilenlerle hem de mevcut literatür ile kıyaslanarak yorumlandı. Hazırlanan bu diyotların ışığa tepkilerini belirlemek için, foto-duyarlılık (S), foto-tepki (R) ve foto-dedektivity (D^*) değerleri voltaja bağlı olarak tespit edildi. Elde edilen tüm deneysel sonuçlar, hazırlanan diyotların iyi bir doğrultma özelliği gösterdiği, ışık şiddeti ve voltaja da oldukça duyarlı olduğu ve dolayısıyla fotodiyot, güneş pili ve diğer optik uygulamalarda klasik MS veya MIS fotodiyotlar yerine başarıyla kullanılabileceğini göstermiştir. Çift-logaritmik I_F-V_F grafiklerinin ise, düşük, orta ve yüksek voltajlara karşılık gelen farklı eğimli üç lineer bölge sergiledikleri gözlemlendi. Bu grafiklerin eğimleri kullanılarak akım-iletiminde Ohmik, uzay-yükü ile sınırlı akım (SCLC) ve tuzak-yükü ile sınırlı akım (TCLC) mekanizmalarından hangisinin etkin olduğu da belirlendi.

Bu tez çalışması beş temel bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde MS ve MIS tipi diyotlar hakkında kısa bir “giriş” yapıldıktan sonra tezin temel amacı ve yapılan hesaplamalar hakkında bir özet verildi. İkinci bölümde, MS ve MIS tipi diyotlar/yapıların tarihçesi,

temel kavramlar ve enerji-bant diyagramlarının oluşumu ile metal ve yarıiletken kontak yapıldıktan sonraki termal denge durumu, ileri ve ters beslem altındaki olası iletim mekanizmaları hakkında gerekli teorik bilgiler verildi. Üçüncü bölümde, hazırlanan örneklerin temizleme ve fabrikasyon aşamaları ile kullanılan elektriksel ölçüm sistemleri hakkında gerekli açıklamalar ve ölçüm düzeneği hakkında gerekli açıklamalar yapıldı. Dördüncü bölümde, karanlık ve ışık altında I-V ve C/G-V ölçümlerinden elde edilen tüm elektriksel ve optik parametrelerle ilgili gerekli grafikler oluşturularak mevcut literatür ile kıyaslamalı olarak yorumlandı. Tezin son bölümünde ise, elde edilen sonuçların genel bir değerlendirmesi ve hem bu konuda hem de benzeri konularda ileride araştırmacılar tarafından yapılacak çalışmalara kısmen de olsa bir ışık tutmak amacıyla bazı önerilerde bulunuldu.





2. SCHOTTKY TİPİ MS ve MIS YAPILARININ TEORİSİ

2.1. Metal/Yarıiletken (MS) ve Metal/Arayüzey-tabaka/Yarıiletken (MIS) Yapılar

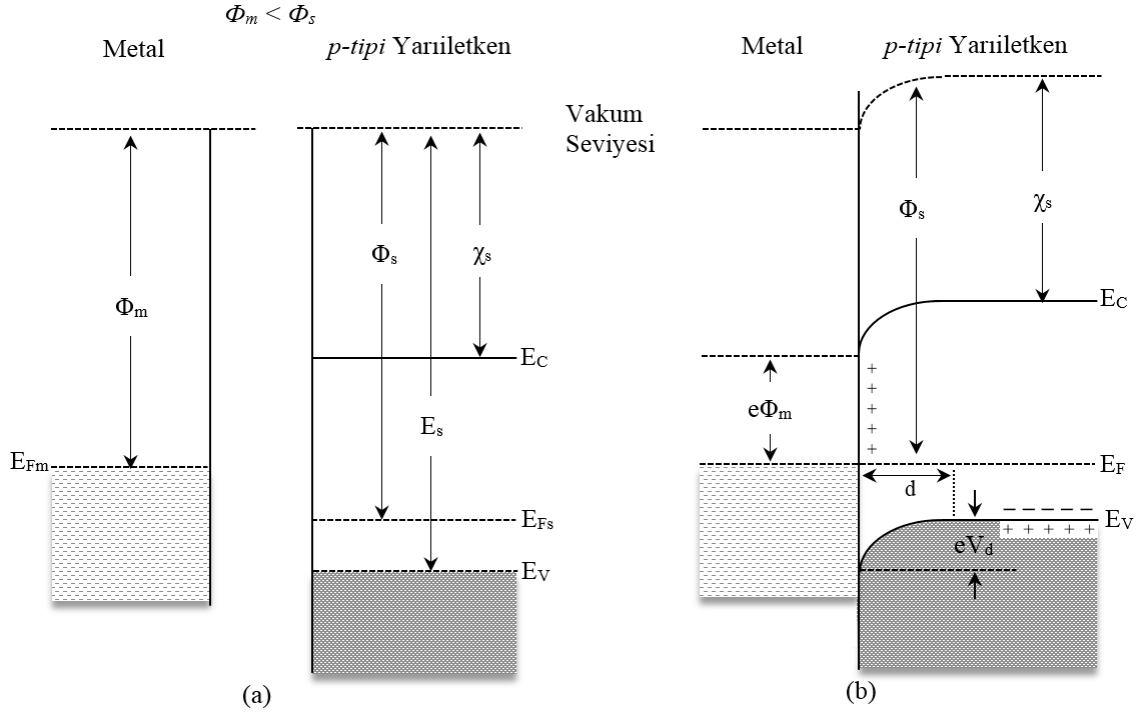
Schottky diyot yapımında, bir metal ile yarıiletken yüksek sıcaklık ve vakum altında kontak edildiğinde ortaya çıkan kontak türü ohmik ve doğrultucu/Schottky olarak ikiye ayrılır. Ancak bu arka-ohmik ve ön-Schottky kontaklarında kullanılan metallerin seçimi Schottky-Mott [1-3] teorisine göre belirlenir. Burada, dikkat edilecek en önemli husus kullanılan yarıiletken ile metal kontakların iş fonksiyonlarını karşılaştırmaktır. Metal ile yarıiletken kontak edildikten sonra seçilen metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına göre aralarında sıfır veya Φ_B yüksekliğinde bir potansiyel farkı/engeli oluşur. Ohmik ve doğrultucu/Schottky kontakların oluşması, yarıiletkenin n veya p tipi olmasına göre değişir ve bu durum aşağıdaki çizelgede özetlendiği gibidir.

	n-tipi yarıiletkenler için	p-tipi yarıiletkenler için
$\Phi_m > \Phi_s$	Doğrultucu/Schottky	Ohmik
$\Phi_m < \Phi_s$	Ohmik	Doğrultucu/Schottky

Çizelge 2. 1. n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler için doğrultucu ve ohmik kontak oluşumu.

Çizelge 2.1.' de belirtildiği gibi, n-tipi yarıiletken ile metal kontak edildiğinde, doğrultucu kontak elde etmek için $\Phi_m > \Phi_s$ ve ohmik kontak elde etmek için ise aksine $\Phi_m < \Phi_s$ olmalıdır. Fakat p-tipi bir yarıiletkende ise durum tam tersidir. Yani p-tipi yarıiletken ile metal kontak edildiğinde, doğrultucu kontak elde etmek için $\Phi_m < \Phi_s$ ve ohmik kontak elde etmek için ise $\Phi_m > \Phi_s$ olmalıdır [1-2]. Ohmik kontak, metal ile yarıiletken arasında bir potansiyel farkının olmaması demektir ve dolayısıyla akım ile voltaj arasında hem ileri hem de ters beslemde lineer bir ilişki vardır. Ancak doğrultu/Schottky kontak durumunda, diyot ileri beslem durumunda akım üstel olarak artarken, ters beslemde ise neredeyse hiç akım geçirmez ve bu durum diyotun “Doğrultma özelliği” olarak bilinir.

Bir MS veya MIS tipi Schottky engel/bariyer diyotunda (SBD), alt ve üst kontaklar oluşturulduktan sonra, metal ile yarıiletken arasında bir potansiyel farkı ve başka bir ifadeyle potansiyel engeli oluşur. Şekil 2.1.' de metal/p-tipi yarıiletken (MS) kontaklarda, sırasıyla p-tipi yarıiletken ile metal kontak edilmeden önceki ve kontak yapıldıktan sonraki termal denge durumu için enerji-bant diyagramı Şekil 2.1. (a, b)' de verildi.

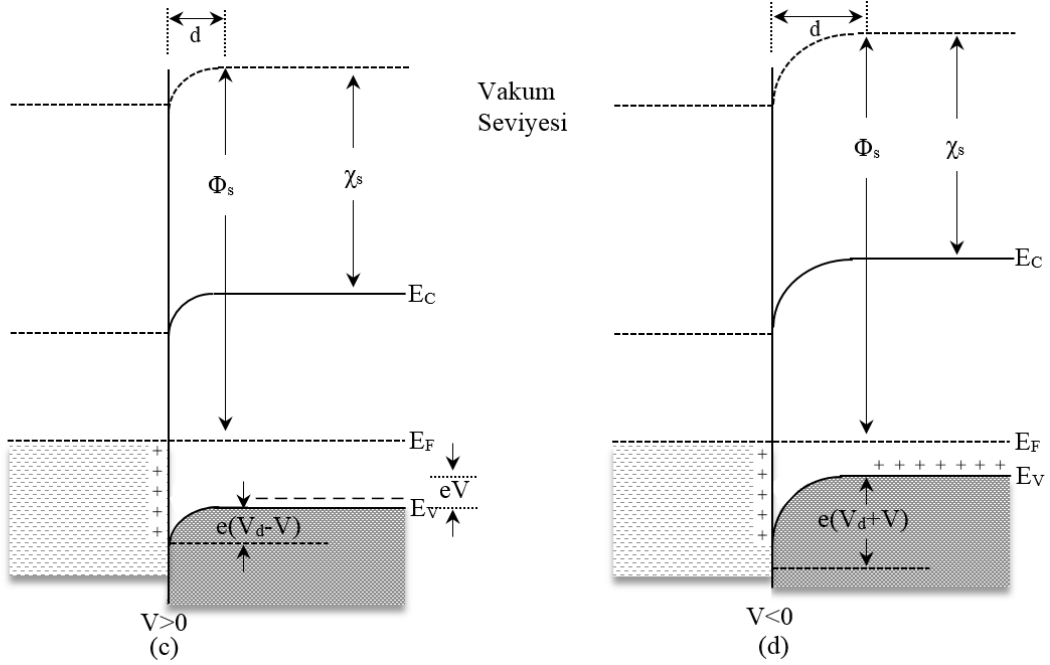


Şekil 2. 1. P-tipi MS diyotun enerji band diyagramı (a) kontak yapılmadan önce (b) kontak yapıldıktan sonra

Şekil 2.1.' deki Φ_m ve Φ_s nicelikleri sırasıyla metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları olup kendi Fermi enerji seviyesindeki yükleri vakum seviyesine veya serbest hale getirmek için gerekli olan enerji miktarıdır. Φ_s elektron veya hol yakınlığı ve E_{Fm} ile E_{Fs} ise sırasıyla metal ve yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleridir. Şekil 2.1.b 'de de görüldüğü gibi, metal ile p-tipi yarıiletken kontak edildikten sonra, metal ve yarıiletken tarafındaki elektron ve deşikler (holler) termal dengeye ulaşmaya kadar veya eşitlenene kadar, metal tarafında çoğunluk durumundaki elektronlar yarıiletkenin önyüzeyine geçerek arkasında holleri bırakarak eklemde bir iç elektrik alan veya potansiyel farkı oluşur. Çünkü, p-tipi yarıiletkende akım iletiminde çoğunlukta olan taşıyıcılar, holler iken azınlık-taşıyıcılar ise elektronlardır. Yani, termal dengede, metal-yarıiletken arasında bir potansiyel engeli

oluşur ve bu potansiyel engel-yüksekliği (qV_d), Eşitlik 2.1. ile verilir ve burada V_d difüzyon potansiyelidir [1-4].

$$qV_d = (\Phi_s - \Phi_m) \quad (2.1.)$$



Şekil 2. 2. MS Schottky kontağın enerji bant diyagramları: (a) ileri beslem (forward, $V>0$) ve (b) ters beslem (reverse, $V<0$) durumları.

Şekil 2.2. 'de de görüldüğü gibi, yarıiletken tarafı güç kaynağının (+) ucuna ve metal ise (-) ucuna bağlandığında, termal denge durumunda engelde oluşan iç elektrik alana zıt yönde bir elektrik alan oluşacağı için, eklemdeki toplam elektrik alan ve dolayısıyla tüketim/Schottky tabakası daralır. Böylece engel üzerinden metalden yarıiletkeneye veya yarıiletkenden metale yük geçişleri akarak diyotu iletim durumuna geçirir. Ters beslemde ise p-Si tarafı negatif ve metal tarafı pozitif beslendiğinde hem dış hem de iç elektrik alan aynı yönde olacaktır. Bu nedenle tükenim tabakası veya potansiyel engeli iyice genişler/artar, dolayısıyla metal ile yarıiletken arasındaki yük geçişleri iyice azalır ve ideal bir diyot için ters beslemdeki akım sıfır olur. Bu durum, Schottky ve Mott 'a göre, termal denge durumunda oluşan potansiyel engel yüksekliği (Φ_{B0}) kadar ise, diyota bundan küçük olmak üzere bir gerilim uygulanırsa (ileri beslemde) mevcut engel yüksekliği bu uygulanan ileri voltaj (V_F) kadar azalırken ters beslemde ise (V_R) kadar artar. Bu sebeple yarıiletken diyotların/yapıların en önemli özeliği; ileri beslemde akımı

geçirirken, ters beslemde geçirmemesidir. Bu durum literatürde Doğrultma Oranı (D.O.) veya Rectification Ratio (RR)” olarak isimlendirilir ve ideal durumda bu değer yaklaşık 10^9 mertebesinde. Başka bir ifadeyle, doğrultma oranı hazırlanan Schottky tipi diyotların performansını/kalitesini belirleyen çok önemli bir faktördür.

2.2. MS ve MIS tipi Schottky Engel Diyotlarda Akım-İletim Mekanizması

MS ve MIS tipi Schottky engel diyotlarda (SBD) akım iletimi hareketli yüklerden (elektron ve deşikler) kaynaklanır ve genelde bu akım iletimi ve akım-iletim mekanizmaları iki şekilde olur [1,2] :

- a) Termiyonik emisyon (TE): MS arayüzündeki potansiyel engel yüksekliğinden daha fazla enerji kazanan yüklerin engel tepesi üzerinden karşılıklı olarak metalden yarıiletken ve yarıiletken metale doğru geçmesidir.
- b) Tünelleme mekanizması (TM): İki türdür (termiyonik alan emisyonu (TFE) ve alan emisyonu (FE)) ve ikisinde potansiyel engeli üzerinden geçecek kadar enerjiye sahip olmayan elektrik yüklerinin engel içerisinden karşı tarafa geçmesidir. Bu durum, ancak yüksek katkı yarıiletkenlerde ve düşük sıcaklıklarda mümkün olabilir.

MS veya MIS tipi diyot, fotodiyot ve güneş pillerinin en temel elektriksel parametrelerinin başında idealite faktörü (n), ters-beslem doyma akımı (I_0), sıfır-beslem potansiyel engel yüksekliği (Φ_{B0}), seri ve kısa devre dirençleri (R_s , R_{sh}) ile doğrultma oranları (RR) gelir. Bu parametrelerin hesaplanmasında da genelde TE teori ve Cheung fonksiyonları kullanılır [2-4].

Bu parametrelerin çoğu deneysel olarak gerçekleştirilen I-V ölçümlerinden ileri beslemde elde edilen yarı-logaritmik lineer $\ln(I)$ -V eğrisinin kesişim noktası ($V=0$ da) ve eğiminden faydalanarak elde edilir. TE teorisine göre bir Schottky engeli üzerinden geçen akım ile doğrultucu kontağa uygulanan gerilim arasındaki ilişki; $R_s > 0$, $n > 1$ ve $V \geq 3kT/q$ durumu için aşağıdaki Eşitlik 2.2. 'de verilen ilişki vardır.

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2.2.)$$

Burada, -1 değeri, üstel ifade yanında ihmal edilecek kadar küçüktür ve dolayısıyla Eşitlik 2.2. aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilen bir doğru denklemdir.

$$\ln(I) = \ln(I_0 + (q/nkT) V) \quad (2.3.)$$

Burada k Boltzmann sabiti, T Kelvin cinsinden ortam sıcaklığı ve q ise elektrik yüküdür. Köşeli parantez önündeki I_0 ters beslem doyum akımı (Bkz. Eşitlik 2.4.), $\ln(I) - V$ grafiğinde; lineer kısmın voltaj eksenine fit edilmesiyle elde edilir.

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{B0}}{kT}\right) \quad (2.4.)$$

Burada, q elektronik yük ($=1.6 \times 10^{-19}$ C), A diyotun doğrultucu kontak alanı, Φ_{B0} sıfır beslem potansiyel engel yüksekliği ve A^* etkin Richardson sabitidir (p-Si için $32 \text{ A cm}^2\text{K}^2$ 'dir). Diğer en önemli ikinci parametre olan n değeri ise, $\ln(I) - V$ grafiğinde, lineer kısmın eğiminden aşağıda verilen Eşitlik 2.5. 'ten elde edilir.

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (2.5.)$$

Burada $dV/d(\ln I)$ terimi, $\ln(I)-V$ grafiğinin eğimidir. Eşitlik 2.4. yeniden düzenlenirse, sıfır beslem potansiyel engel yüksekliği için aşağıdaki şekline dönüşür ve dolayısıyla, elde edilen I_0 ve diyotun alanı (A) değerleri kullanılarak, sıfır-beslem potansiyel engel yüksekliği (Φ_{B0}) değeri Eşitlik 2.6. 'dan rahatlıkla hesaplanabilir.

$$q\Phi_{b0} = kT \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (2.6.)$$

Temel diyot parametrelerinden olan n, R_s ve Φ_B değerleri ikinci bir yol/metot olan Cheung fonksiyonlarından da hesaplanabilir. Ancak TE teorisi orta gerilim bölgelerine karşılık gelirken, Cheung fonksiyonları R_s ve arayüzey tabakanın etkili olduğu daha ileri pozitif gerilim/voltaj değerlerine karşılık gelir. Bu yüzden hesaplanan bu değerler arasında bazı farklılıklar görülebilir. Bu farklılıklar bu parametrelerin voltaja bağlı oluşundan ve kullanılan hesaplama metodunun doğasından kaynaklanır [1-5, 8-11].

Cheung fonksiyonları ileri beslem I-V verileri kullanılarak ve ileri pozitif voltaj bölgeleri için TE teorisinden türetilen ve R_s ' nin yanı sıra hem n hem de Φ_B değerlerini ikinci bir yöntemle bulunmasına yarayan ve aşağıda verilen iki denklemden (Bkz. Eşitlik 2.7. ve Eşitlik 2.8.) oluşur [38].

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (2.7)$$

$$H(I) = V - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = n\Phi_B + IR_S \quad (2.8)$$

$dV/d\ln(I)$ 'nin I 'ya göre grafiği R_s 'nin etkili olduğu ileri pozitif gerilim değerlerinde lineer bir bölge verir. Bu lineer bölgenin eğiminden R_s ve düşey eksenini kestiği noktadan da n değerleri kolayca elde edilir [1, 2, 38]. Eşitlik 2.7. 'den elde edilen n değeri, Eşitlik 2.8 'de yerine yazıldığında ise, $H(I)$ ile I arasında yine lineer bir bölge elde edilir. Eşitlik 2.8 'den de görüldüğü gibi, bu lineer bölgenin eğimi ikinci defa R_s değerini verirken, y-eksenini kestiği noktadan da ($=n.\Phi_B$), Φ_B değeri hesaplanır.

Schottky diyotun yeterince yüksek frekanslarda ölçülen C-V eğrilerinden, ters beslem bölgesinden elde edilen $C^{-2} - V$ grafiği de lineer bir bölge sergiler. Bu lineer bölgeye doğrusal bir fit uygulanmasıyla, y-ekseninin sıfır olduğu noktaya karşılık gelen kesişim (V_0) noktası ve dolayısıyla diyotun difüzyon potansiyelinin ($V_d=V_0+kT/q$) değeri; bu doğrunun eğiminden ise, taşıyıcı (alıcı) atomların sayısı N_A (cm^{-3}), potansiyel engel yüksekliği Φ_B (CV), Fermi enerji E_F (eV), tüketim bölgesinin/tabakasının genişliği (W_D) ve eklemde oluşan maksimum elektrik alan (E_m) parametreleri aşağıda verilen eşitliklerden (Bkz. Eşitlik 2.9., 2.10., 2.11. ve 2.12.) elde edilir [3-5].

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{Nv}{N_a}\right) \quad (2.9.)$$

$$N_A = \frac{2}{q\epsilon_s A^2} \left[-\frac{1}{d(C^{-2})/dV} \right] = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 \tan(\theta)} \quad (2.10.)$$

$$Nv = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m^*_h}{m_0} \right)^{3/2} \quad (2.11.)$$

$$W_D = \left(\frac{2\epsilon_s V_D}{q N_a} \right)^{1/2} \quad (2.12.)$$

Dolayısıyla elde edilen; V_0 , E_F ve kT/q değerleri kullanılarak metal ile yarıiletken arasında oluşan engel yüksekliği ters beslem C^{-2} -V grafiğinden aşağıda verilen Eşitlik 2.13 'ten hesaplanır.

$$\Phi_B(C - V) = V_0 + \frac{kT}{q} + E_F = V_D + E_F \quad (2.13.)$$

Yukarıdaki eşitliklerde; sırasıyla $(m_{eh}^*/m_0) = 0,55$, $m_0 (=9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})$ durgun elektronun kütlesi, $N_v (1.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3})$ iletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğu, ϵ_s ve ϵ_0 ise yarıiletkenin dielektrik sabiti ile boşluğun dielektrik sabitleridir.

2.3. MS ve MIS tipi Schottky Engel Diyotların Optik Özellikleri

Optoelektronik uygulamaları, ışığın elektronik malzemelerle/aygıtlarla kuantum mekaniksel etkileşimine dayanır ve bu uygulamalar bilgi-teknolojisi, telekomünikasyon, yenilenebilir enerji ile sağlık gibi alanlara kadar çeşitli uygulamalarda disiplinler arası geniş bir yer kaplar. Güneş pilleri, fotodiyotlar ve foto dedektörler/transistörler üzerine düşen güneş radyasyonunu herhangi bir dış elektrik alanı olmaksızın (iç elektrik hariç) elektrik enerjisine dönüştürebilir ve sensör uygulamalarında da yaygın olarak kullanılır. Fotodiyotlar gibi fotoiletken cihazlar, gelen ışığa tepki olarak elektriksel iletkenliklerini değiştirecek şekilde tasarlanmıştır. Yani enerjisi yarıiletkenin yasak enerji aralığından büyük olan fotonlar diyotun eklem bölgesi veya bu bölge yakınına gönderildiğinde ($hc/\lambda \geq E_g$), eklem civarında çok sayıda elektron-deşik çiftleri (e^- , h^+) oluşur ve bunlardan elektronlar iç elektrik alan ile zıt yönde ($F = -qE$) ve holler ise aynı yönde ($F = +qE$) harekete zorlanarak dış devre üzerinde net bir fotoakım oluşturur. Bu olay fotovoltaiik olay olarak bilinir ve iki aşamadan ibarettir. İlki, metal/yarıiletken veya PN eklem diyotun kontak edildikten sonra eklem bölgesinde; elektron ve hollerin difüzyonu sonucunda bir iç elektrik alanının oluşması ve ikincisi de ışık altında eklemde meydana gelen elektron-deşik çiftlerinin bir dış devre üzerinde hareket ettirilmesidir.

Işık altında bir fotodiyotun veya güneş pilinin fotovoltaiik özellikleri, farklı ışık şiddetleri altında özellikle ters beslem bölgesinde ölçülen karanlık akım (I_d) ve ışık altındaki (I_{ph}) akım değerleri kullanılarak belirlenebilir. Işığa duyarlı bir foto diyot için fotoduyarlılık (S), fototepki (R) ve fotodedektivity (D^*) değerleri karanlık ve ışık altındaki I-V eğrileri veya ölçümleri kullanılarak aşağıda verilen Eşitlik 2.14., Eşitlik 2.15. ve Eşitlik 2.16. 'dan kolayca hesaplanabilir [25, 26, 36].

$$S = \frac{I_{ph} - I_d}{I_d} \quad (2.14.)$$

$$R = \frac{I_{ph} - I_d}{P_{in}} \quad (A/W) \quad (2.15.)$$

$$D^* = R. (A/(2qI_d))^{0.5} \quad (2.16.)$$

Burada, I_d ve I_{ph} nicelikleri sırasıyla karanlık ve farklı ışık şiddetleri altında ölçülen akım değerleri, P diyotun üzerine gönderilen ışık şiddeti ve A ise diyotun alanıdır.

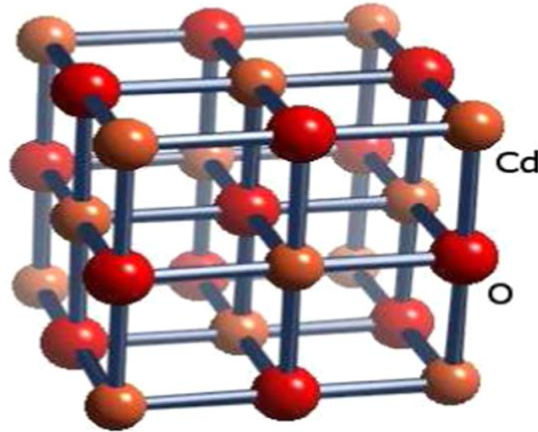
2.4. Fotodiyot Üretiminde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri ve İşlevleri

2.4.1. Kadmiyum Oksit (CdO)

Bir boyutlu (1B) veya yarı 1B yarıiletken nanomalzemeler, benzersiz özellikleri ve opto-elektronik nano sistem cihazları ile fonksiyonel malzemelerdeki çok çeşitli uygulamaları nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmüştür. Bu malzemeler arasında, 2,5 eV'lik büyük bir doğrudan bant aralığı ve 1,98 eV'lik dolaylı bir bant aralığına sahip olan kadmiyum oksit (CdO), şeffaf elektrotlar, güneş hücreleri, foto transistörler, fotodiyotlar ve gaz sensörleri gibi opto-elektronik uygulamalar için umut verici bir adaydır [53].

CdO'nun Kristal Yapısı

Kübik NaCl-benzeri bir yapıya sahip olan CdO' nun kristal yapısı Şekil 2.3. 'te gösterildiği gibidir. Birim hücreesindeki kadmiyum (Cd) ve oksijen (O) atomları, düzenli bir şekilde yerleşmiştir ve her atomun koordinasyon sayısı 6'dır [68]. CdO'nun kafes parametresi yaklaşık 4.695 Å olup, düzenli yapısı fotodiyotlar için uygun bir doğrultucu özellik sağlar [84].



Şekil 2. 3. CdO'nun kristal yapısı.

CdO'nun Elektriksel Özellikleri

Doğal n-tipi bir yarıiletken olarak davranır. Bu durum, kristal yapısındaki oksijen boşluklarının serbest elektronlar sağlamasıyla ilişkilidir [45]. CdO'nun yüksek taşıyıcı yoğunluğu, seri direnci azaltır ve enerji kayıplarını minimize eder. Bu durum, cihazın daha verimli çalışmasını sağlar [88]. CdO, metal ile oluşturduğu kontaklarda düşük ters akım ve yüksek doğrultma oranı sağlayarak cihazın doğrultma davranışını iyileştirir [88].

CdO'nun Optik Özellikleri

CdO'nun bant aralığı (2.3–2.7 eV) sayesinde görünür ışık absorpsiyonu ve geçirgenliği oldukça yüksektir. Bu, optoelektronik cihazlarda geniş bir dalga boyu aralığında kullanılmasını sağlar [85]. Yüksek foto-duyarlılığı (S) ve foto-tepkisi (R), malzemenin optik geçirgenliğine ve düzgün yüzey yapısına bağlıdır [70].

CdO'nun Termal ve Mekanik Stabilitesi

CdO'nun erime noktası $\sim 1300^{\circ}\text{C}$ civarındadır ve bu durum, onu yüksek sıcaklıklarda çalışabilen cihazlar için ideal bir malzeme yapar [84]. Termal genleşme katsayısı, CdO'nun metal kontaklarla uyumlu olmasını sağlar ve uzun ömürlü cihaz performansına katkıda bulunur. CdO'nun termal kararlılığı, uzun süreli cihaz dayanıklılığını artırır. Bu özellik, CdO'nun özellikle güneş pilleri ve fotodiyot uygulamalarında tercih edilmesine yol açar [86].

CdO'nun Yüzey ve Arayüzey Özellikleri

Yüzey özellikleri, arayüzey durumlarını (N_{ss}) düşük tutarak doğrultma özelliklerini artırır. Bu özellik, metal-oksit-yarıiletken (MIS) yapılarında daha stabil bir cihaz performansı sağlar [80]. Homojen bir CdO yüzeyi, metal kontaklarla uyumu artırır ve ışığa tepki süresini iyileştirir [48].

2.4.2. Çinko Oksit (ZnO)

Çinko oksit (ZnO), II-VI grubu yarı iletkenler sınıfında yer alan bir bileşik olup, genellikle fotonik, elektronik ve sensör teknolojilerinde kullanılmaktadır. Geniş bant aralığı (3.37 eV) ve yüksek uyarıcı enerjisi (örneğin, 60 meV) gibi özellikleri, ZnO'yu ultraviyole (UV) dedektörler, şeffaf iletken filmler ve fotodiyotlar gibi uygulamalarda ön

plana çıkarmıştır [74]. Ayrıca, ZnO'nun çevre dostu, bol ve ekonomik bir malzeme olması, onu yarı iletken teknolojilerinde tercih edilen bir materyal haline getirmektedir [79].

ZnO, yoğunluğu 5.606 g/cm^3 olan bir malzemedir. Isı iletkenlik katsayısı yaklaşık olarak 60 W/mK 'dir ve bu da ZnO'yu iyi bir termal iletken yapar [47]. Ayrıca, optik sabitleri ve dielektrik katsayıları, ZnO'nun elektronik ve fotonik cihazlarda kullanımını destekleyen kritik parametrelerdir [52].

ZnO'nun Kristal Yapısı

ZnO, doğal olarak hexagonal würtzit kristal yapısında bulunur. Bu yapı, Zn ve O iyonlarının tetrahedral koordinasyonu ile tanımlanır. Hexagonal yapısı, polar eksen (c-eksen) boyunca önemli piezoelektrik ve piroelektrik özellikler sergilemektedir [81]. ZnO'nun kübik (zinc blend) ve rocksalt (tuz yapısı) fazları da mevcuttur, ancak bu fazlar genellikle yüksek basınç altında stabilize olur [77].

ZnO'nun Elektriksel Özellikleri

ZnO, doğal olarak n-tipi bir yarı iletken davranışı gösterir ve bu durum genellikle yapısal oksijen boşluklarına veya çinko interstisyallerine bağlanır. Elektriksel iletkenliği, doping ile önemli ölçülerde artırılabilir. Özellikle Al, Ga veya In gibi elementlerle doping yapılarak iletkenlik özellikleri optimize edilebilir [65].

ZnO'nun Optik Özellikleri

ZnO, yüksek optik şeffaflığa ve ultraviyole bölgede yüksek absorpsiyon katsayısına sahiptir. Bant aralığının geniş olması, ZnO'yu şeffaf iletken oksit (TCO) ve UV fotodetektör uygulamaları için cazip bir malzeme haline getirmektedir. ZnO'nun floresans ve fotoluminesans özellikleri de önemlidir ve bu özellikler, kristal kusurları ile yakından ilişkilidir [69].

ZnO'nun Termal ve Mekanik Stabilitesi

ZnO, yüksek termal stabiliteye sahip bir malzemedir ve $1975 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar dayanıklılık gösterir [64]. Bu yüksek termal dayanıklılık, ZnO'yu yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun kılar. Mekanik olarak ZnO, sert ve dayanıklı bir yapıya sahiptir; Mohs sertlik

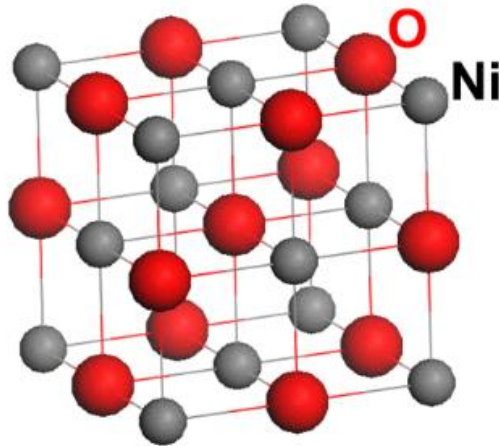
derecesi 4.5-5.0 arasındadır [83]. Ayrıca, piezoelektrik özellikleri, ZnO'yu sensör ve transdüser teknolojilerinde çok önemli bir malzeme yapmaktadır.

2.4.3. Nikel Oksit (NiO)

Nikel oksit (NiO), II-VI grubu oksit yarı iletkenler sınıfında yer alan ve özellikle enerji cihazları, manyetik malzemeler ve katalizör uygulamalarında kullanılan bir bileşik malzemedir. NiO, yüksek termal ve kimyasal stabiliteye sahip olması nedeniyle elektrokimyasal enerji dönüşüm cihazlarında yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Ayrıca, şeffaf iletken filmler ve spintronik cihazlar için de önemli bir bileşik olarak dikkat çekmektedir [46, 58].

NiO'nun Kristal Yapısı

NiO, doğal olarak bir antiferromanyetik davranış sergileyen kübik yapıdaki bir malzemedir. Şekil 2.4' te NiO' nun kristal yapısı gösterilmiştir. Yapının yüksek simetriye sahip olması, NiO'yu özellikle manyetik ve elektriksel özelliklerinin çalışılmasında ön plana çıkarmaktadır. Kristal yapı, Ni^{2+} iyonlarının oktahedral bir koordinasyon gösterdiği NaCl-tipi bir yapıya dayanır [57].



Şekil 2. 4. NiO'in kristal yapısı. [87]

NiO'nun Elektriksel Özellikleri

NiO, genellikle p-tipi bir yarı iletken davranışı gösterir. Bu durum, Ni iyonlarının valans durumları arasındaki denge ile bağlantılıdır. Elektriksel iletkenliğini, oksijen

eksiklerinden kaynaklanan delik taşıyıcıları belirler. Özellikle Li ve Mg gibi elementlerle doping yapılarak, iletkenlik özellikleri optimize edilebilir [72].

NiO'nun Optik Özellikleri

NiO, geniş bir bant aralığına (3.6-4.0 eV) sahiptir ve bu özelliği sayesinde şeffaf iletken oksit (TCO) uygulamalarında önemli bir malzeme olarak kullanılmaktadır. Ek olarak, NiO'nun fotokatalitik aktiviteleri, ultraviyole ve görünür ışık absorpsiyonu için optimize edilebilmektedir [76].

NiO'nun Termal ve Mekanik Stabilitesi

NiO, yüksek termal stabiliteye sahip bir oksit malzemedir ve bu özelliği, özellikle seramik ve kaplama uygulamalarında tercih edilmesini sağlar. Nikel oksit, 1955 °C'ye kadar termal dayanıklılık gösterebilir ve bu nedenle yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabilir [60]. Mekanik olarak sert bir yapıya sahip olan NiO, Mohs sertlik derecesi yaklaşık 5.5-6.0 arasındadır ve bu durum, çizilmeye ve aşınmaya dayanıklılığını artırır [54].

NiO'nun Fiziksel Özellikleri

NiO'nun yoğunluğu 6.67 g/cm³ olup, termal iletkenlik katsayısı 17.5 W/mK seviyesindedir. Bu fiziksel özellikler, NiO'yu hem termal hem de elektriksel olarak önemli bir malzeme haline getirmektedir. Dielektrik katsayısı ve optik sabitleri de NiO'nun elektronik ve optoelektronik cihazlarda kullanım potansiyelini destekler [61, 67].

2.4.4. Titanyum (Ti)

Titanyum (Ti), d-blok elementlerinden olup periyodik tablonun 4. grubunda yer alan, hafif, dayanıklı ve çok yönlü bir metaldir. Doğalda bulunan çeşitli minerallerden elde edilen titanyum, havacılık, uzay, biyomedikal ve kimya endüstrileri gibi çeşitli alanlarda yaygın bir şekilde kullanılır. Yüksek mukavemet-ağırlık oranı, olağanüstü korozyon direnci ve biyouyumluluğu, titanyumu çok sayıda ileri teknoloji uygulaması için ideal bir malzeme yapmaktadır [50, 73].

Ti'nin Kristal Yapısı

Titanyum, oda sıcaklığında hekzagonal kapalı paket (hcp) kristal yapıya sahiptir. Bu faz, α -titanyum olarak bilinir. 882 °C'nin üzerinde, titanyumun kristal yapısı vücut merkezli kübik (bcc) faza dönüşür ve bu faz β -titanyum olarak adlandırılır. Bu faz değişikliği, titanyum alaşımlarında mekanik ve fiziksel özelliklerin optimize edilmesinde kritik bir rol oynar [49, 82].

Ti'nin Elektriksel Özellikleri

Titanyum, yüksek elektrik direnci ($55 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) ile bilinir ve bu nedenle şiddetle iletken malzemeler kategorisinde yer almaz. Ancak, şiddetli oksijen ve azot afinitesi, titanyumun üzerinde yüksek dirençli ince oksit filmler oluşturmaya neden olur. Bu filmler, elektronik ve katalitik uygulamalarda kullanılır [75].

Ti'nin Optik Özellikleri

Titanyum, ultraviyole ve görünür spektrumda özellikle optik yansıma ve absorpsiyon özelliklerine sahiptir. Yansıma özellikleri, ince film kaplamalarında kullanılmasını sağlarken, titanyum dioksit (TiO_2) formu, fotokatalitik ve fotovoltaik uygulamalar için tercih edilir [66].

Ti'nin Termal ve Mekanik Stabilitesi

Titanyum, erime noktası (1668 °C) ve kaynama noktası (3287 °C) ile dikkat çeker. Yüksek sıcaklıklarda mekanik stabilitesini koruyabilir ve oksijenle reaksiyona girerek oksitlenmeye dirençli bir tabaka oluşturur. Mekanik olarak, titanyumun mukavemeti ve elastik modülü, çelikten daha düşük olsa da ağırlığının çok daha hafif olması avantaj sağlar. Bu nedenle havacılık ve uzay endüstrilerinde çok kullanışlı bir malzeme haline gelir [55, 59].

Ti'nin Fiziksel Özellikleri

Titanyum, yüksek korozyon direnci ve biyouyumluluğu ile bilinir. Bu özellikler, deniz suyu ortamında ve biyomedikal implantlarda kullanımını kolaylaştırır. Titanyumun

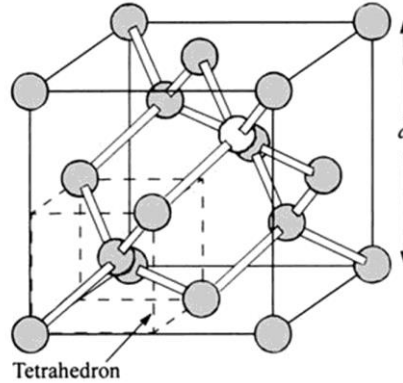
yoğunluğu 4.51 g/cm^3 olup, hafif yapısı çelik ve alüminyum arasında yer alır. Elastik modülü ise yaklaşık 116 GPa 'dır ve çok sayıda mekanik tasarım uygulaması için uygundur [78, 89].

2.4.5. Silisyum (Si)

Doğal bir yarıiletken olan Si sıkı paket elmas benzeri kristal yapıya sahip 14 atom numaralı ve 28 kütle numaralı 4. Grup elementidir. Yeryüzünde miktar olarak en çok bulunan ikinci element olan Si birçok kullanılan malzemenin ana elementidir. Düşük sıcaklıklarda yalıtkan gibi davranan Si, sıcaklığın yükselmesiyle iletkenlik bandına geçişin kolaylaşması nedeniyle iletkenlik kazanır. Bu sebepten yarıiletken olarak nitelendirilir. Element halde yarıiletkenlik gösteren iki elementten biridir.

Si'nin Kristal Yapısı

Silisyum, Şekil 2.5. 'te gösterildiği gibi elmas yapısına sahip bir kristal yapı sergiler. Bu yapı, her bir silisyum atomunun dört komşu silisyum atomuyla tetrahedral bir düzen içinde bağlandığı, yüzey merkezli kübik bir kafes oluşturur. Oda sıcaklığında (300 K) örgü sabiti $a=5.43095 \text{ Å}$ 'dır. Bu kristal yapı, yüksek mekanik dayanıklılık ve termal kararlılık sağlar [62].



Şekil 2. 5. Elmas ve elmas benzeri Si (ve Ge) yapılara ait kristal yapı [59].

Si'nin Elektriksel Özellikleri

Silisyum, yasak bant aralığı (band gap) 1.12 eV olan bir yarıiletken malzemedir.

- Elektron etkin kütlesi: $0.19m_0$
- Ağır delik etkin kütlesi: $0.16m_0$

- Hafif delik etkin kütlesi: $0.49m_0$

Bu özellikler, silisyumun taşıyıcı hareketliliğini ve elektronik cihazlardaki performansını belirler. Ayrıca, düşük elektriksel sızıntı akımları ve yüksek doğrultma oranları ile silisyum, diyotlar ve transistörler için idealdir [68].

Si'nin Optik Özellikleri

Silisyum, görünür ışık bölgesinde yüksek soğurma katsayısına sahip olduğundan optik uygulamalarda sınırlı kullanıma sahiptir. Ancak kızılötesi bölgede düşük soğurma özellikleri, onu fotodetektörler ve kızılötesi sensörler gibi uygulamalarda ideal kılar. Örneğin, $1.1\ \mu\text{m}$ dalga boyunda maksimum optik geçirgenlik sağlar. Bu, güneş pilleri ve fotodiyotlar gibi optoelektronik cihazlarda yaygın kullanım alanı bulmasını sağlar [56].

Si'nin Termal ve Mekanik Stabilitesi

Silisyum, yüksek termal iletkenlik ve mükemmel termal stabilite sunar:

- Erime noktası: 1414 K
- Isı iletkenliği: 150 W/mK

Bu özellikler, yüksek sıcaklık koşullarında çalışabilen elektronik cihazların üretiminde büyük avantaj sağlar. Aynı zamanda, silisyumun mekanik mukavemeti ve sertliği, mikroelektronik cihazlarda uzun ömürlü ve dayanıklı yapılar oluşturulmasına olanak tanır [62].

Si'nin Temel Fiziksel Özellikleri

Silisyumu yarıiletken endüstrisindeki en kullanışlı malzeme haline getiren özelliklerinin başında onun fiziksel özellikleri gelir. Kristal yapısı, yüksek erime noktası, düşük yoğunluk ve dielektrik sabiti gibi özellikleri, onu elektronik ve optoelektronik cihazların üretimi için ideal kılar. Ayrıca, mükemmel termal iletkenlik ve mekanik dayanıklılık, mikroelektronik sistemlerin yüksek sıcaklık ve zorlu çevre koşullarında güvenilir şekilde çalışmasını sağlar. Bu fiziksel özellikler, silisyumun hem klasik yarıiletken cihazlarda hem de ileri teknolojik uygulamalarda tercih edilmesinin temel nedenidir [1, 62]. Si'nin bazı temel özellikleri Çizelge 2.2.'de verilmektedir.

Fiziksel Özellik	Değer
Atom ağırlığı	28,09
Kristal yapısı	Elmas-benzeri
Örgü sabiti (Å)	5,43
Yoğunluk (g/cm ³)	2,328
Dielektrik sabiti	11,9
İletkenlik bandı durum yoğunluğu (cm ⁻³)	2,8x10 ¹⁹
Değerlik bandı durum yoğunluğu (cm ⁻³)	21,04x10 ¹⁹
İntrinsik taşıyıcı yoğunluğu (cm ⁻³)	1,45x10 ¹⁰
Enerji bant aralığı	1,12
Elektron ilgisi, χ (eV)	4,05
Mobilite (cm ² /V.s) (Elektron/hole)	1500/450
Azınlık taşıyıcı ömrü (s)	2,5x10 ⁻³
Erime noktası (°C)	1415
Isıl iletkenlik (W/cm.K)	1.5

Çizelge 2. 2. Si kristalinin temel fiziksel özellikleri.

Günümüzde de yarıiletken sanayinde neredeyse kullanılan tek malzeme olan Si, bu tür uygulamalar için yüksek saflık derecesinde olması gerekmektedir. Yeryüzünde genellikle SiO₂ ve farklı oksit türlerinde kararlı bir şekilde bulunan Si bazı ayrıştırma ve saflaştırma işlemlerinden geçirilerek saf kristal hale getirilir.

3. DENEYSEL DETAYLAR

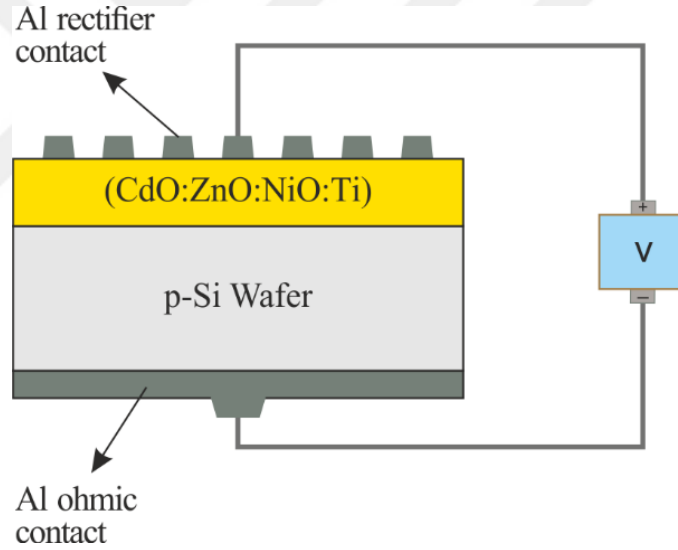
Bu proje kapsamında, Al/(ZnO: CdO: NiO: Ti)/p-Si Schottky bariyer diyotları Bor-katkılı (p-Si) alt-taşlar (wafer) üzerinde oluşturuldu. Bu Si alt-taşlar, Sigma-Aldrich firmasından satın alınarak temin edilmiş. Malzeme 1-4 Ω .cm özdirençli, (100) yönelimli, yaklaşık 300 μ m kalınlıklı ve 2 inch (=5,08 cm) çapa sahip olup ön-yüzeyi kimyasal olarak parlatılmıştır. Diyotların üretimine başlamadan önce, p-Si alt-taşlar ($H_2SO_4:H_2O_2:H_2O$)/(3:1:1) asit karışımında ve ultrasonik banyoda yeterince kimyasal olarak çalkalandıktan sonra, 18 M Ω .cm özdirençli de-iyonize su içinde 10 dakika süreyle durulandı. Arkasından, tekrar ultrasonik banyoda ($HCl:H_2O$)/(1:1) kimyasal asit çözeltisinde çalkalanıp de-iyonize suda durulandıktan sonra kuru azot gazı (N_2) ile kurulandı. Burada, amaç istenmeyen doğal bir arayüzey tabakanın oluşmasını engellemek ve kristal yüzeyindeki organik kirlilikleri temizlemektir. Kimyasal temizleme işleminin hemen ardından; p-Si altaş metal buharlaştırma sistemine alınarak arka yüzeyine yüksek saflıkta (%99.999) ve 150 nm kalınlığında Al yaklaşık 1 μ Torr basınç altında termal olarak buharlaştırılıp azot ortamında da 450 °C’ de 5 dakika süreyle tavlansak düşük dirençli veya iyi bir ohmik kontak sağlandı. Ohmik kontakten sonra hazırlanan (5:2:2:1) katkı oranlarına sahip (ZnO: CdO: NiO: Ti) solüsyon p-Si altaşın ön-yüzeyine 1500 rpm ile FYTRONIX 9000 spin coater sistemiyle kaplandı. Oluşturulan (ZnO: CdO: NiO: Ti) film kalınlığı 100 nm olarak belirlendi. Son adım olarak, yine yüksek saflıkta Al metal Schottky/doğrultucu kontaklar (150nm, 1mm çaplı, 7.85×10^{-3} cm² alanlı) termal olarak oluşturuldu. Hazırlanan yapıların ileri ve ters beslem I-V ölçümleri bir Keithley-2400 akım-voltaj kaynağı ile 5×10^{-4} Torr basınç altında gerçekleştirildi. I-V ölçümleri de bir yazılım/software programı ile kumanda ve kontrol edilerek gerçekleştirildi. Hem diyotların ve arayüzey tabakasının hazırlanması hem de fabrikasyon işlemleri ile ilgili daha detaylı bilgi Physica Scripta dergisinde proje kapsamında yayınlanan ilk makaleden bulunabilir [27].

Hazırlanan Al/(CdO: ZnO: NiO: Ti)/p-Si (MIS) Quaternary fonksiyonel Schottky tipi fotodiyotun deneysel ölçümlerinin gerçekleştirilmesinde kullanılan ölçüm ve kontrol cihazları Şekil 3.1. ’de, fotodiyotun şematik yapısı Şekil 3.2. ’de ve akım-voltaj-ışık şiddeti (I-V-P) ölçüm sistemi Şekil 3.3 ’te verilmiştir.

Hazırlanan bu fotodiyotun hem enerji-bant diyagramı hem de elektronik devresi ise sırasıyla Şekil 3.4. ve Şekil 3.5. 'te verilmiştir.



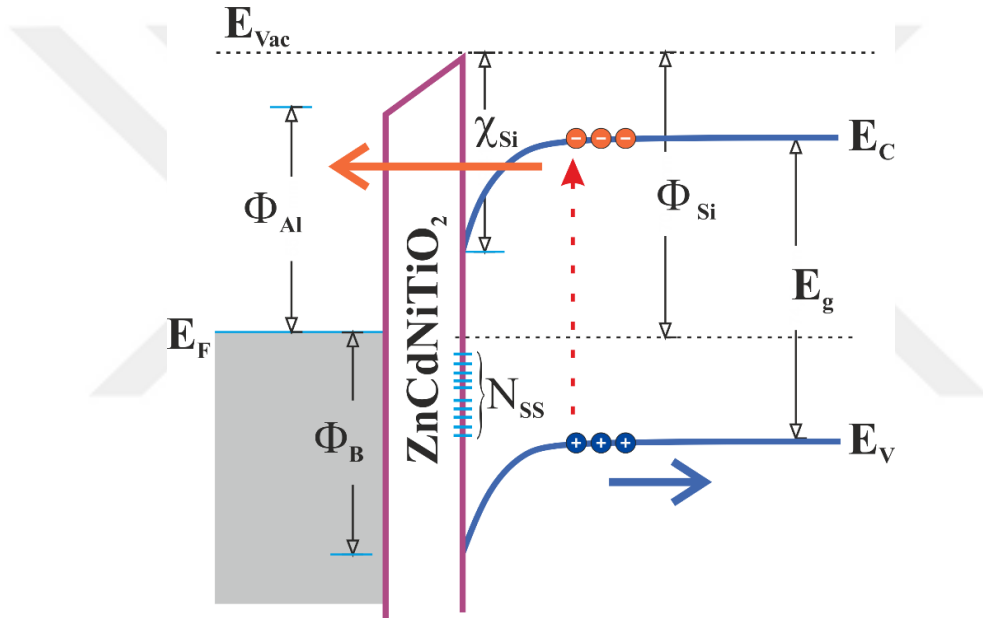
Şekil 3. 1. Hazırlanan Al/(ZnCdNiTiO₂)/p-Si Quaternary fonksiyonel Schottky tipi fotodiyotun deneysel ölçümlerin gerçekleştirilmesinde kullanılan ölçüm ve kontrol cihazları.



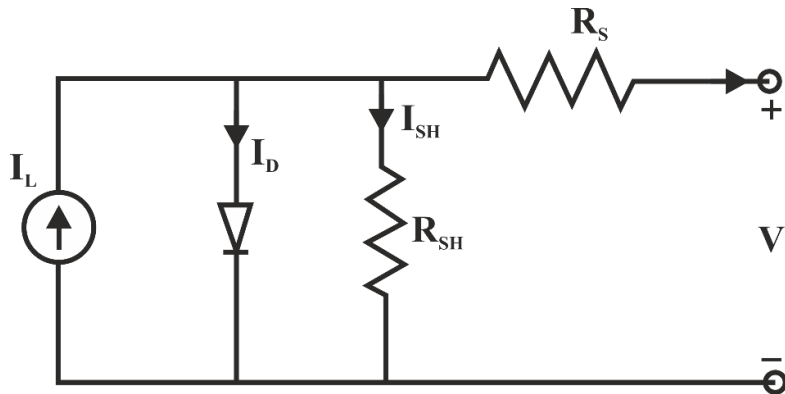
Şekil 3. 2. Hazırlanan Al/(ZnCdNiTiO₂)/p-Si Quaternary fonksiyonel Schottky tipi fotodiyotun şematik yapısı.



Şekil 3. 3. Hazırlanan Al/(ZnCdNiTiO₂)/p-Si/Al Quaternary fonksiyonel Schottky tipi fotodiyotun akım-voltaj-ışık şiddeti (I-V-P) ölçüm sistemi.



Şekil 3. 4. Hazırlanan Al/(ZnCdNiTiO₂)/p-Si Quaternary fonksiyonel Schottky tipi fotodiyotun enerji-bant diyagramı.



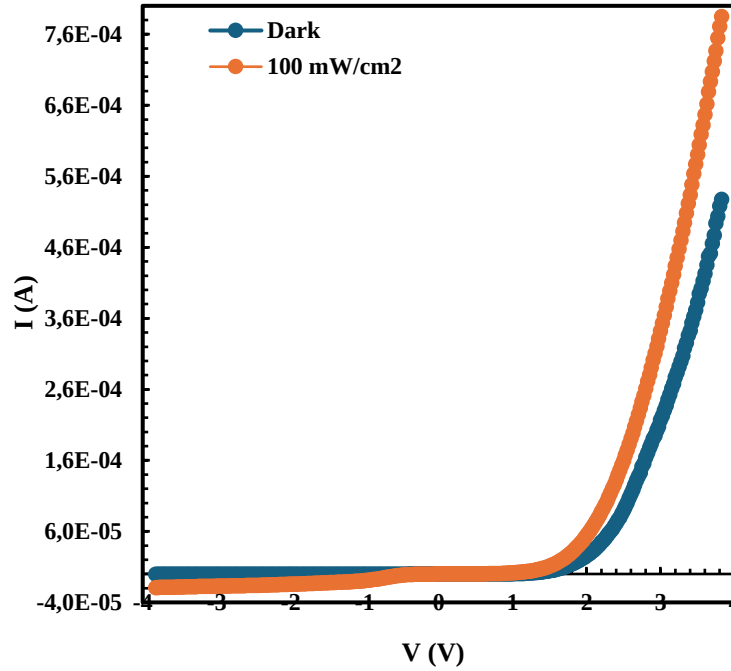
Şekil 3. 5. Hazırlanan Al/(ZnCdNiTiO₂)/p-Si Quaternary fonksiyonel Schottky tipi fotodiyotun elektronik devresi.



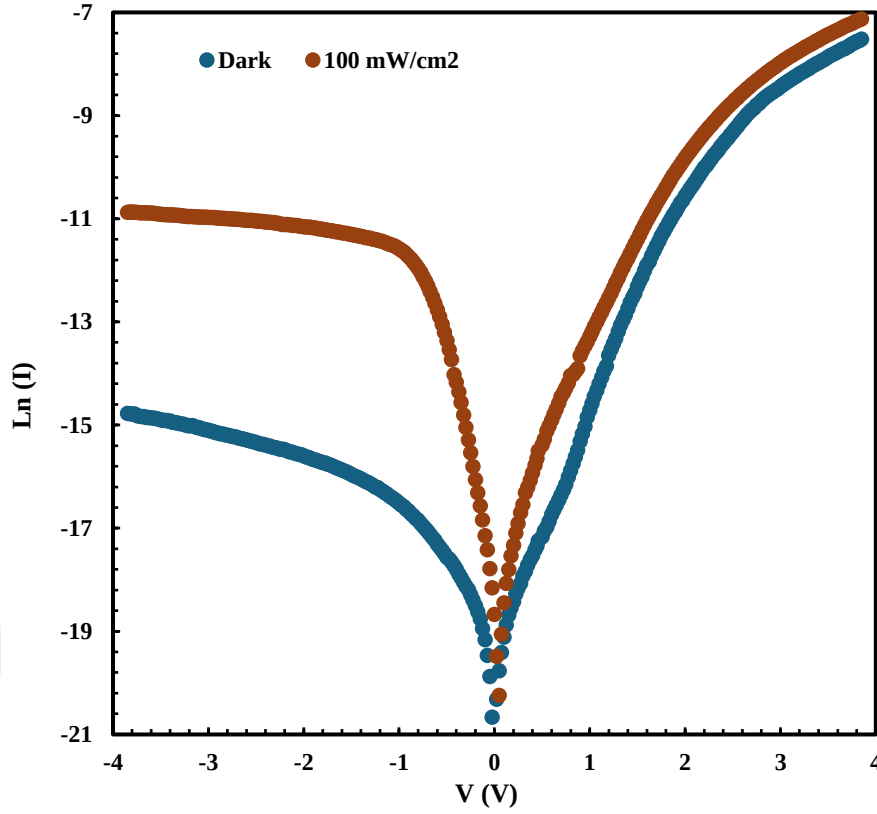
4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1 Karanlık ve Işık Altındaki Deneysel Akım-Voltaj Karakteristikleri

Hazırlanan Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si Quaternary fonksiyonel Schottky tipi fotodiyotların akım-voltaj (I-V) ölçümleri hem karanlık hem de 100 mW/cm² ışık şiddeti altında ileri ve ters beslem eğrileri hem metrik hem de yarı-logaritmik skalada ± 4 V voltaj aralığında Şekil 4.1. ve Şekil 4.2. 'de verildi. Hem ileri hem de ters beslem bölgesinde karanlıktaki akım değeri artan voltajla artmaktadır. Ancak ışık altında ise, ters beslemdeki akım, ileri beslem göre oldukça yüksektir. Çünkü, diyot ters beslendiğinde hem iç hem de iç elektrik alan aynı yönde olduğu için eklemdeki toplam elektrik alan iyice artar ($E+\epsilon$). Bu durumda, eklem bölgesine düşen fotonların oluşturduğu elektron-deşik (hole) çiftleri bu güçlü elektrik alan altında yeniden birleşip nötrleşmesi önlenerek onların $F=\pm q\sum E=\pm q(E+\epsilon)$ kuvveti etkisinde zıt yönlerde iletilerek devrede net bir fotoakım oluşur. İleri beslemde ise, iç ve dış elektrik alan zıt yönde oldukları için elektron-hol çiftlerinin yeniden birleşip nötrleşmesi artar ve dolayısıyla fotoakımda bir azalmaya yol açar.



Şekil 4. 1. Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyotun karanlık ve 100 mW/cm² ışık şiddeti altındaki metrik ölçekteki I-V ölçümleri



Şekil 4. 2. Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyotun karanlık ve 100 mW/cm² ışık şiddeti altındaki yarı logaritmik ölçekteki I-V ölçümleri.

Şekil 4.2' den görüldüğü gibi, yarı-logaritmik ileri beslem $\ln I_F$ - V_F grafikleri hem karanlık hem de aydınlatma şartları altında orta gerilim bölgelerinde net bir lineer bölgeye sahiptir. Yine, şekilden görüldüğü gibi, ters beslem bölgesinde yumuşak ya da net bir doyuma ulaşmaması; hayali kuvvet etkisinden dolayı Schottky engel yüksekliğindeki düşme/azalma, arayüzey durumlarına/tuzaklarına ve metal ile yarıiletken arasında doğal veya büyütülen ara yüzey tabakasının varlığına atfedilebilir. Ancak yüksek gerilim bölgesine gidildikçe hem R_s hem de (CdO:ZnO:NiO:Ti) arayüzey tabakanın etkisinden dolayı lineerlikten sapmaktadır [1-3, 24-28]. Arayüzey tabakalı bir MIS tipi diyotun hem idealite faktörünün 1' den büyük hem de R_s ihmal edilecek kadar küçük değilse, ileri beslemde ($V \geq 3kT/q$), I ile V arasındaki ilişki Eşitlik 4.1. ile verilir [1-3].

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV - IR_s}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{-q(V - IR_s)}{kT}\right)\right] \quad (4.1.)$$

Eşitlik 4.1' de; I_0 doyma akımı, IR_s terimi R_s üzerine düşen voltaj, T Kelvin cinsinden sıcaklık, k Boltzmann sabiti ve diğer nicelikler ise literatürde iyi bilinmektedir. Orta gerilim değerlerinde, IR_s terimi diyota uygulanan voltaj ile kıyaslandığında yeterince

küçük olup ihmal edilebilir. Burada, I_0 ters beslem doyma akımının açık ifadesi olup Eşitlik 4.2. 'de verildi.

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{B0}}{kT}\right) \quad (4.2.)$$

Bu durumda, Eşitlik 4.1. ifadesinde her iki tarafın logaritması alınıp düzenlendiğinde, Eşitlik 4.3. 'de verilen bir doğru denklemi elde edilir.

$$\ln(I) = \ln(I_0) + \frac{q}{nkT}V_D \quad (4.3.)$$

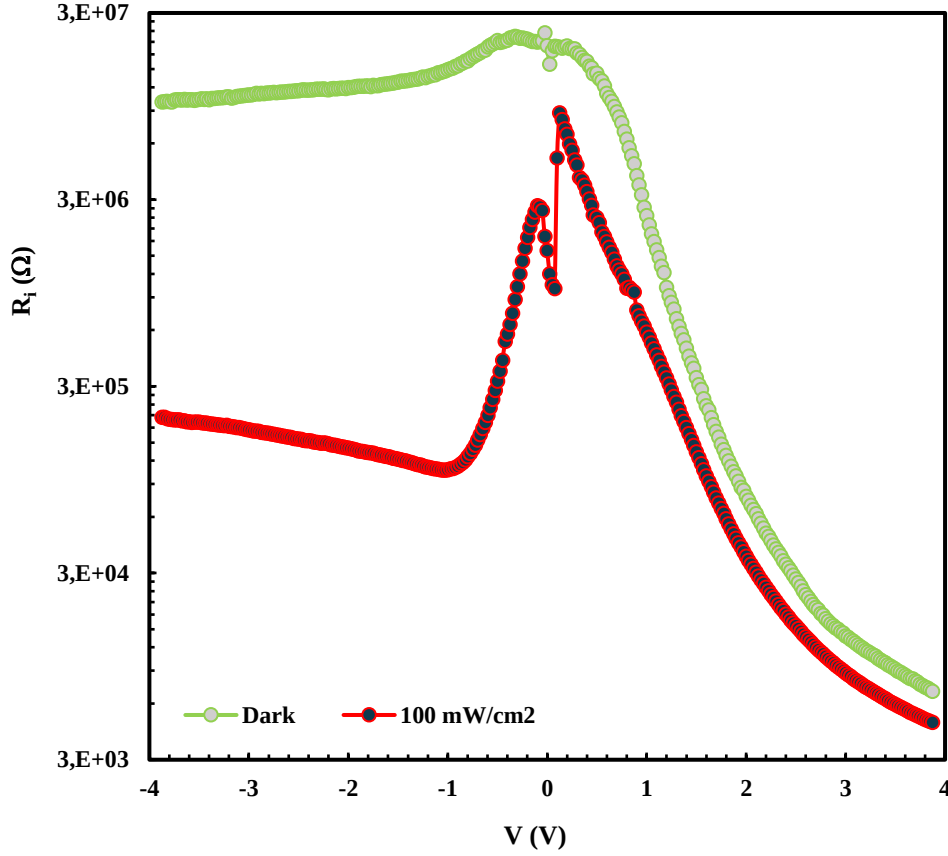
Hem karanlık hem de 100 mW.cm^{-2} ışık şiddeti altındaki $\ln(I)$ -V grafiğinin pozitif bölgedeki eğiminden ($\tan\theta=q/nkT$) ve 0 V' ta akım eksenine fit edilmesi ve Eşitlik 4.3. kullanılarak sırasıyla diyotun idealite faktörüyle (Bkz. Eşitlik 4.4.) ve $\ln(I_0)$ değerleri elde edildi.

$$n = \frac{q}{kT \tan\theta} \quad (4.4.)$$

Böylece, diyotun sıfır beslemdeki potansiyel engel yüksekliği (Φ_{B0}) değeri, elde edilen I_0 ve diyotun doğrultucu kontak alanı (A) değerleri kullanılarak ve Eşitlik 4.2. 'den de yararlanarak aşağıda verilen Eşitlik 4.5. 'ten hem karanlık hem de 100 mW/cm^2 ışık şiddeti için hesaplandı.

$$q\Phi_{B0} = kT \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (4.5.)$$

Genelde Schottky diyotlarda $\ln(I)$ -V grafiğinin, ileri beslem bölgesinde lineer bir doğru vermesi beklenir ancak uygulamada bu durum ileri pozitif voltajlarda ($V \geq 1 \text{ V}$),



Şekil 4. 3. Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyotun karanlık ve 100mW/cm² ışık şiddeti altında elde edilen R_i - V_i eğrileri.

$\ln(I)$ - V eğrisi seri direnç ve ara yüzey tabakasından dolayı önemli ölçüde lineerlikten sapar. Yarıiletken aygıtların gerçek seri ve kısa devre/şönt dirençleri (R_s , R_{sh}), sırasıyla mümkün olduğu kadar ileri ve ters gerilim değerlerine karşılık gelir ($R_i = V_i / I_i \pm V_i$). Dolayısıyla bu değerler basit Ohm Yasası kullanılarak voltaja bağlı elde edilen rezistans (R_i) değerlerinden elde edildi ve Şekil 4.3.' de verildi. Şekilden de görüldüğü, R_i - V eğrileri sırasıyla $\pm 4V$ için neredeyse sabit yani voltajdan bağımsızdır ve dolayısıyla bu değerler sırasıyla diyotun gerçek R_s ve R_{sh} değerlerine karşılık gelmektedir.

MS veya MIS tipi yarıiletken aygıtlar/diyotlar ileri beslendiğinde akımı iletir ancak ters beslendiğinde neredeyse hiç akım iletmemesi beklenir, ancak uygulamada durum oldukça farklıdır. İdeal diyotlarda, doğrultma oranı ($RR = I_F / I_R$ sabit bir $\pm V$ değerinde) 10^9 mertebesinde olur. Bu çalışmada ise hem karanlık hem de 100 mW/cm² ışık şiddeti için bu değer $\pm 4V$ ' da elde edildi ve Çizelge 4.1.' de sunulmuştur.

	I₀ (A)	n	Φ_{B0} (eV)	R_s(4V) (kW)	R_{sh} (-4V) (MW)	RR
Karanlıkta	4.643x10 ⁻⁹	9.611	0.730	6.50	10.00	1540
100 mW/cm²	2.330x10 ⁻⁸	8.787	0.690	4.44	0.207	46.99

Çizelge 4. 1. Karanlık ve 100mW/cm² ışık şiddeti altında elde edilen temel elektriksel parametreler.

Çizelge 4.1. 'den de görüldüğü gibi hem karanlık hem de 100mW/cm² ışık şiddeti altında elde edilen n değerleri ideal değeri olan 1' den oldukça fazladır. Eşitlik 4.6. 'dan da görüldüğü üzere, arayüzey durumları, arayüzey tabakasının kalınlığıyla doğru orantılı, ancak tabakanın dielektrik sabiti ve tüketim tabakasının genişliğiyle ters orantılıdır. Literatürde, bu durum genellikle arayüzey durumları ile arayüzey tabakanın varlığına ve metal ile yarıiletken arasında oluşan potansiyel engelin homojensizliği ile açıklanır [1-8]. Eşitlik 4.6. 'daki, δ ara yüzey tabakanın kalınlığı, W_D tüketim tabakanın genişliği, ε_s ve ε_i değerleri ise sırasıyla yarıiletken ve ara yüzey tabakanın dielektrik sabitleridir.

$$n(V) = (qV/kT) \ln(I/I_0) = 1 + \frac{d_i}{\epsilon_i} \left[\frac{\epsilon_s}{W_D} + qN_{ss}(V) \right] \quad (4.6.)$$

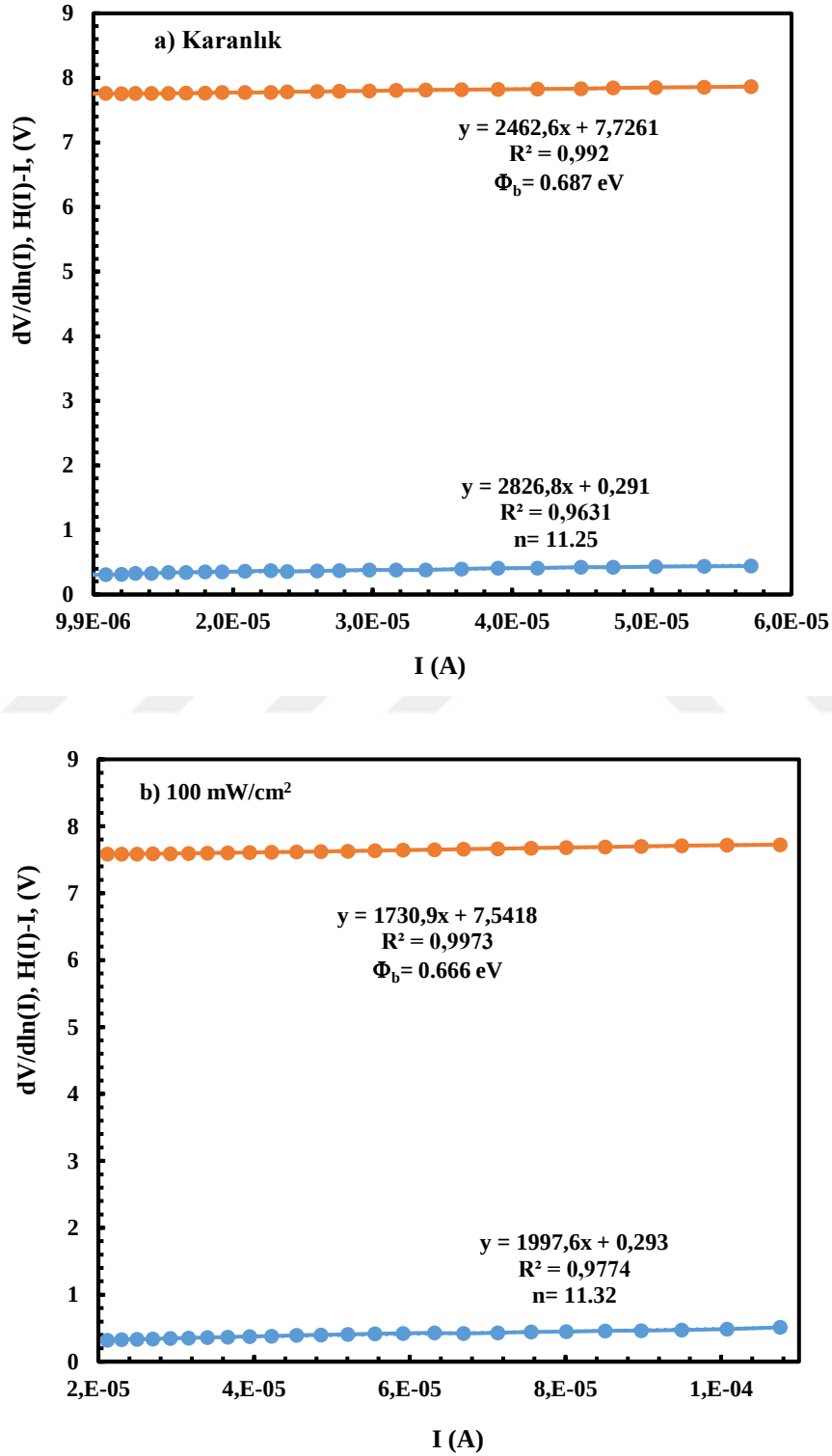
Temel diyot parametreleri olan; n, R_s ve Φ_B değerlerini hesaplamanın ikinci bir yolu ise Cheung & Cheung tarafından yeterince ileri pozitif voltajlar için (ln(I)-V eğrisinin lineerlikten sapmaya başladığı bölge) geliştirilen ve aşağıda verilen iki eşitliği ile verilir [38].

$$\frac{dV}{d \ln I} = IR_S + \left(\frac{nkT}{q} \right) \quad (4.6.a.)$$

$$H(I) = V - \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{1}{AA^*T^2} \right) = IR_S + n\Phi_B \quad (4.6.b.)$$

Eşitlik 4.6.a. ve Eşitlik 4.6.b. kullanılarak elde edilen dV/dln(I) - V ve H(I) - V grafikleri hem karanlık hem de 100 mW/cm² için elde edilerek, sırasıyla Şekil 4.4. (a., b.) 'de verildi. Şekil 4.4. (a, b) 'den de açıkça görülebileceği gibi, hem dV/dln(I)-V hem de H(I)-V grafikleri geniş bir voltaj ve akım aralığında karanlık ve ışık altında iyi bir lineer bölgeye sahiptir. Eşitlik 4.6.a. ve 4.6.b. 'den de görüldüğü gibi dln(I) - I ve H(I) - V grafiklerinin eğimi direk R_s değerini verirken kesişme noktaları ise sırasıyla nkT/q ve nΦ_B değerlerini vermektedir. Böylece Eşitlik 4.6.a. 'dan hesaplanan n değeri (= (q/kT)/eğim) Eşitlik 4.6.b. 'de yerine konularak elde edilen H(I) - I grafiğinin eğiminden ise Φ_B

(=kesişme noktası/n) değeri hesaplandı ve bunlar Çizelge-2. 'de verildi. Çizelgeden de görüldüğü gibi, elde edilen n , R_s ve Φ_B değerleri, TE teorisinden elde edilenler gibi aydınlatma şiddetine çok bağlıdır ancak aralarındaki bazı farklılıklar ise kullanılan hesaplama metodu ve onların voltaja bağlı olduğunu göstermektedir [25-29].



Şekil 4. 4. (a., b.)Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyotun karanlık ve 100mW.cm⁻² ışık şiddeti altında elde edilen $dV/d\ln(I) - V$ ve $H(I) - V$ grafikleri.

Hem R_s hem de Φ_B değerleri, Norde tarafında geliştirilen ve aşağıda verilen eşitliklerden de hesaplanabilir. Norde' ye göre, $\ln(I)$ -V eğrilerinin belirgin bir lineer bölgeye sahip olmadığı durumlarda, TE teorisinden faydalanılarak akım ile voltaj arasındaki ilişkiyle aşağıda verilen Eşitlik 4.7. kullanılabilir [2,3].

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \left[\ln \left(\frac{I(V)}{A A^* T^2} \right) \right] \quad (4.7.)$$

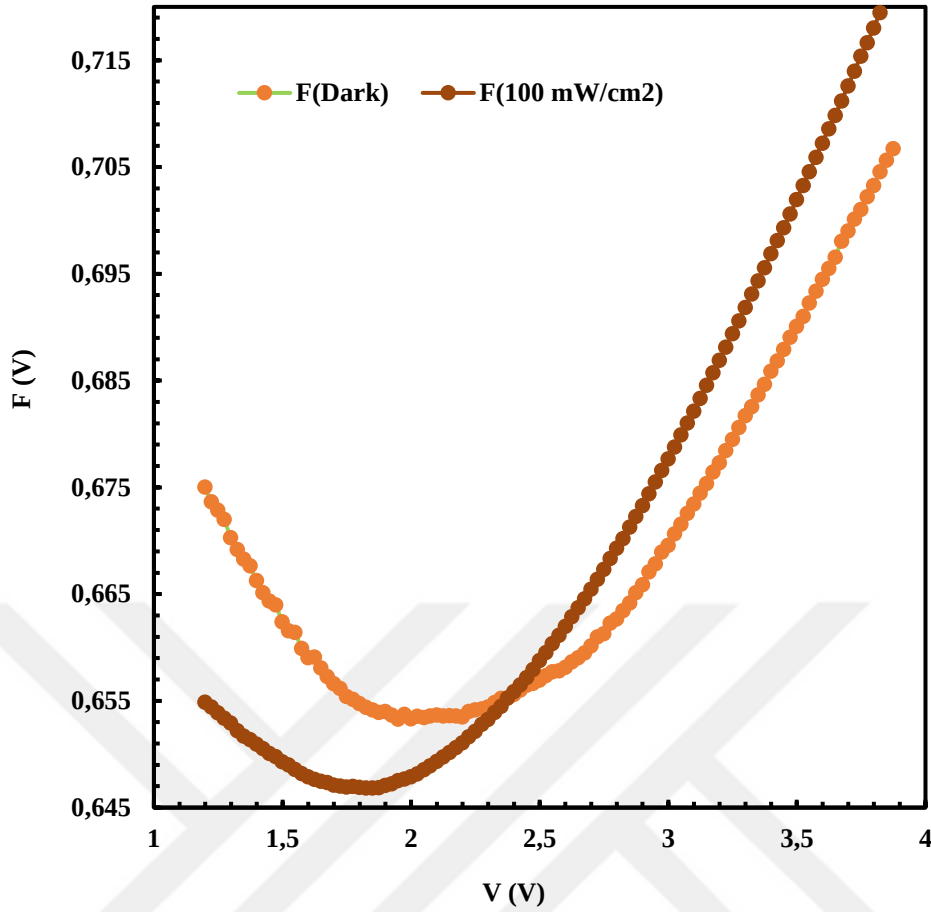
$$R_s = \frac{kT(\gamma-n)}{qI_0} \quad (4.8.a.)$$

$$\Phi_B = F_0 + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (4.8.b.)$$

Eşitlik 4.7. 'de verilen ve keyfi bir sabit olan γ değerinin, TE teorisinden elde edilen idealite faktörü değerinden büyük seçilmesi şarttır. Eşitlik 4.7. kullanılarak hem karanlık hem de ışık şiddeti altındaki $F(V)$ -V eğrileri elde edilerek Şekil 4.5. 'te verildi. Şekil 4.5. 'den de açıkça görüldüğü gibi, $F(V)$ -V grafikleri hem karanlık hem de ışık altında net bir minimum noktaya sahiptir. Hem bu minimum F_0 noktasına karşılık gelen değerler hem de buna karşılık gelen V_0 ve I_0 değerleri kullanılarak Eşitlik 4.8.a. ve 4.8.b. formüllerinden R_s ve Φ_B değerleri üçüncü bir yöntem olarak hesaplandı ve Cheung fonksiyonlarından elde edilenlerle birlikte Çizelge 4.2. 'de verildi. Hem Çizelge 4.1. hem de Çizelge 4.2. dikkate alındığında, farklı metotlardan elde edilen temel elektriksel parametrelerin voltaja bağılıklarından ve kullanılan hesaplama yöntemlerinden kaynaklanan bazı farklılıklar mevcuttur. Yani TE teorisi, Cheung ve Norde modelleri, I-V verilerinde farklı voltaj veya akım bölgelerine karşılık gelmektedir ve dolayısıyla bu beklenen bir sonuçtur.

Cheung Fonksiyonları $dV/d\ln(I)$ -I ve $H(I)$ -I					Norde Fonksiyonu	
	n	R_s (k Ω)	Φ_B (eV)	R_{sh} (k Ω)	Φ_B (eV)	R_s (k Ω)
Karanlıkta	11.25	2.827	0.687	2.462	0.653	2.679
100 mW/cm²	11.32	1.997	0.666	1.730	0.762	3.069

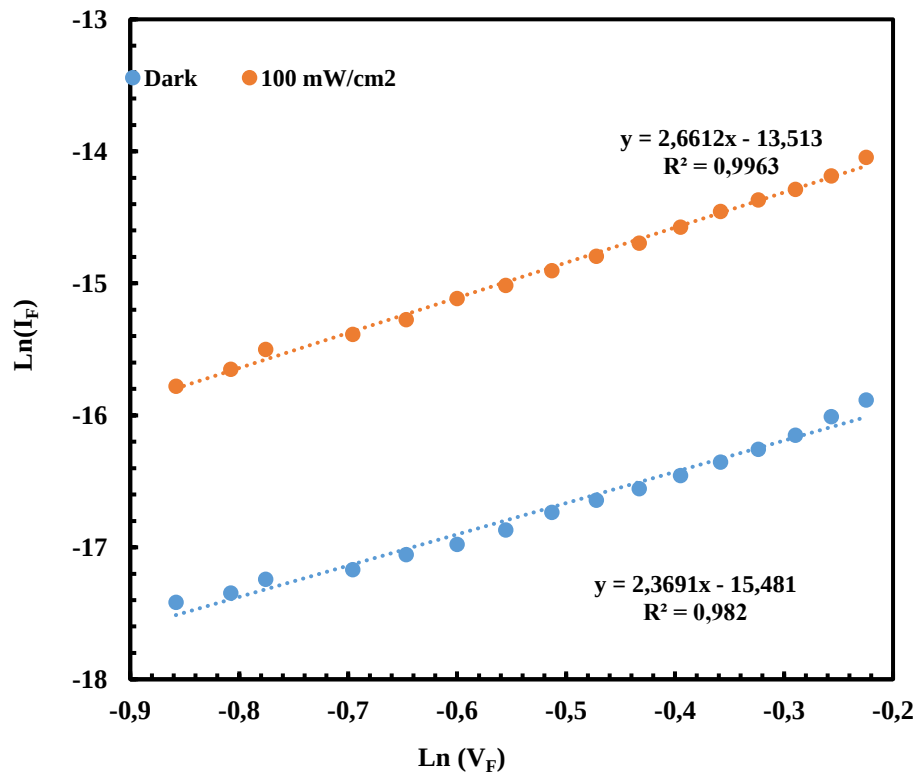
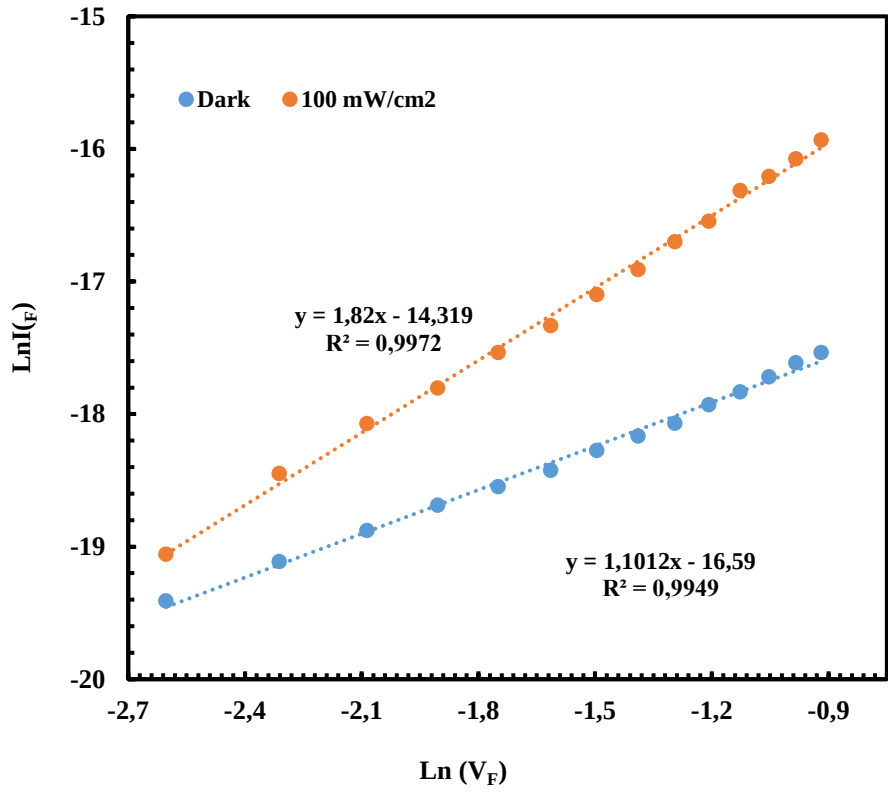
Çizelge 4. 2. Karanlık ve 100mW.cm⁻² ışık şiddeti altında elde edilen diğer elektriksel parametreler.

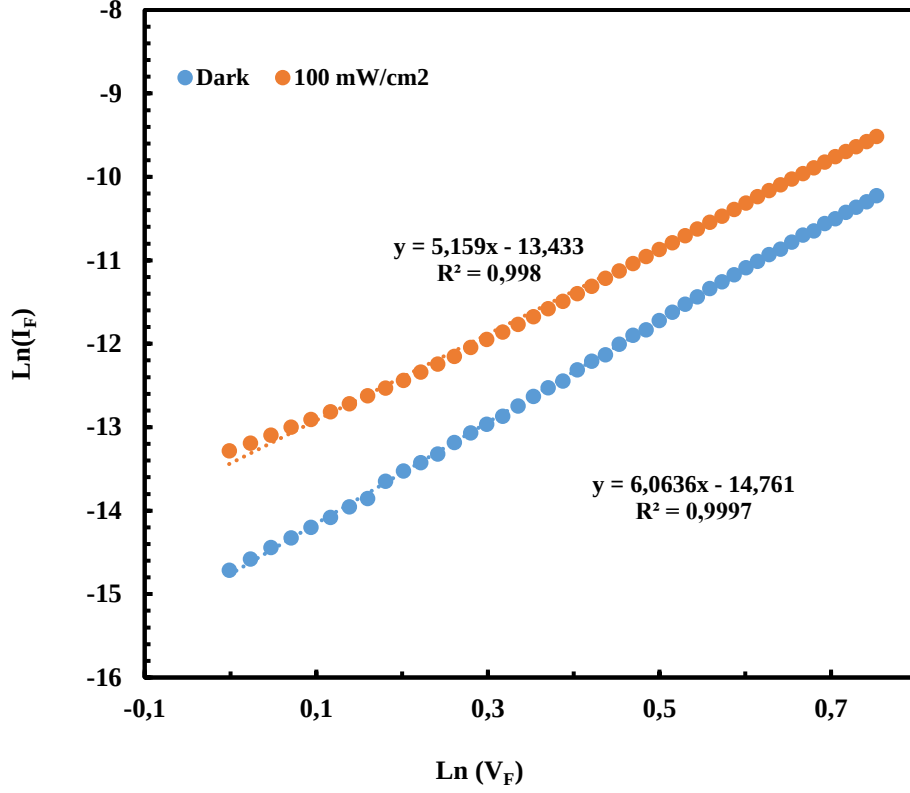


Şekil 4. 5. Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyotun karanlık ve 100mW/cm² ışık şiddeti altında elde edilen F(V)-V grafikleri.

Akım iletim mekanizmalarını belirlemek için çift-logaritmik I_F - V_F grafikleri de hem karanlık hem de 100mW.cm⁻² ışık şiddeti için elde edilerek Şekil 4.6' da verildi. Şekilden de görüldüğü gibi $\ln(I_F)$ - $\ln(V_F)$ grafiği hem karanlık hem de aydınlatma şiddeti altında farklı eğimlere sahip üç net lineer bölgeye sahiptir. Bu bölgeler, sırasıyla düşük, orta ve yüksek voltaj bölgelerine karşılık gelmektedir. $\ln(I_F)$ - $\ln(V_F)$ eğrilerinden de görüldüğü gibi, akım değeri $I \sim V^m$ şeklinde değişmektedir ve burada m değeri doğrunun eğimi olup grafikte gösterilmiştir. Şekil 4.6' dan görüldüğü gibi bu eğimler düşük, orta ve yüksek voltajlar için sırasıyla yaklaşık $1 < V < 2$, $2 < V < 3$ ve $3 < V < 6V$ arasında değişmektedir. Bu değerler bize üç bölge için akım iletiminde sırasıyla Ohmik, uzay-yükü sınırlı akım,

SCLC, (Space Charge Limited Current) ve tuzak-yükü sınırlı akım, TCLC, (Trap Charge Limited Current) modeline uyduğunu göstermektedir.





Şekil 4. 6. Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyotun karanlık ve 100mW/cm² ışık şiddeti altında elde edilen üç farklı voltaj bölgesi için ln(I_F)-ln(V_F) grafikleri.

İleri beslem I_F-V_F verileri kullanılarak, arayüzey durumlarının (N_{ss}) enerjiye bağlı (E_c-E_{ss}) dağılım profilleri yine hem karanlık hem de 100mW/cm² aydınlatma şiddeti için hem idealite faktörü hem de potansiyel engel yüksekliğinin voltaja bağlı değişimini dikkate alarak, Card ve Rhoderick tarafından geliştirilen ve aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak elde edilip Şekil 4.6' da verildi [2-7].

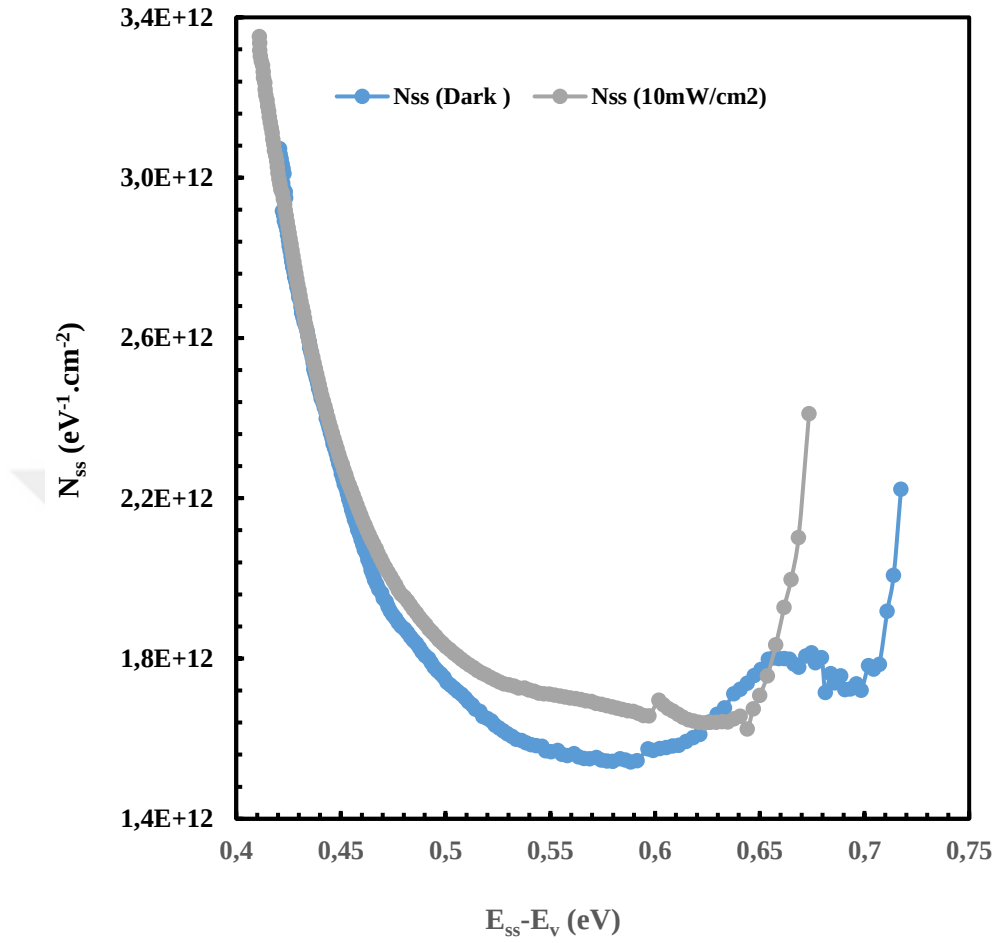
$$\Phi_e = \Phi_{B_0} + \alpha(V) = \Phi_{B_0} + \left(1 - \frac{1}{n(V)}\right)V \quad (4.9a)$$

$$E_{SS} - E_V = q(\Phi_e - V) \quad (4.9b)$$

$$N_{SS}(V) = \frac{1}{q} \left[\frac{\varepsilon_i}{d_i} (n(V) - 1) - \frac{\varepsilon_S}{w_D} \right] \quad (4.10)$$

Burada α değeri ölçülen engel yüksekliğinin voltaj katsayısıdır ve yarı iletken ile dengede N_{ss} etkilerini birleştiren bir parametredir. Şekil 4.7. 'den görüldüğü gibi, arayüzey durumları, yasak enerji aralığında U şeklinde bir dağılım göstermekte olup değerleri yaklaşık 1.3x10¹² eV⁻¹/cm² ile 3.4x10¹² eV⁻¹/cm² arasında değişmektedir. Işık şiddeti

altında onların hem değerlerinin hem de pozisyonlarının değişmesi, ışık şiddeti ve dış elektrik alan altında yeniden yapılanıp düzenlenmesine atfedildi [2-8].



Şekil 4. 7. Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyotun karanlık ve 100mW.cm⁻² ışık şiddeti altında elde edilen N_{ss} – (E_{ss}-E_v) dağılım profilleri.

4.2 Fotoelektrik Karakteristikleri

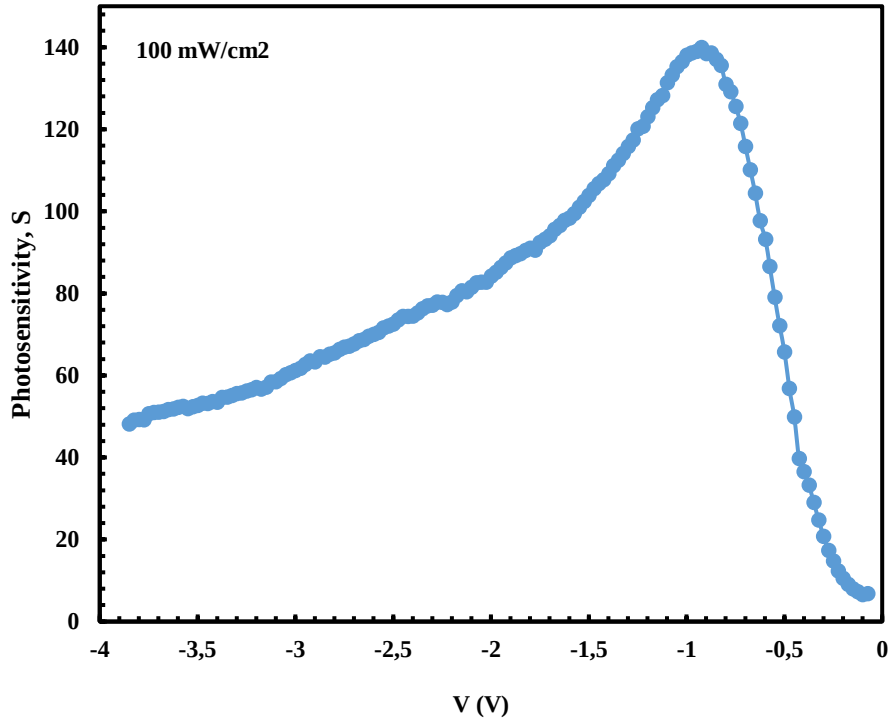
Hazırlanan Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si fotodiyotların karanlık ve 100mW.cm⁻² ışık şiddeti altındaki fotoelektrik karakteristikleri, ters beslem altındaki I_R-V_R verilerinden yararlanarak 100 mW/cm² için incelendi. Bu ters beslem altında hazırlanan fotodiyotun ışığa olan duyarlılığı (S: photo-sensitivity), tepkisi (R: photo-responsibility) ve spesifik alınganlık (D*: photo-dedektivity) değerleri, sırasıyla aşağıda verilen Eşitlik 4.11., Eşitlik 4.12. ve Eşitlik 4.13. 'ten elde edildi. Bu değerler ve voltaja bağlı değişim grafikleri ise sırasıyla Şekil 4.7., 4.8. ve 4.9. 'da verildi.

$$S = (I_{ph} - I_{karanlık})/I_{karanlık} \quad (4.11.)$$

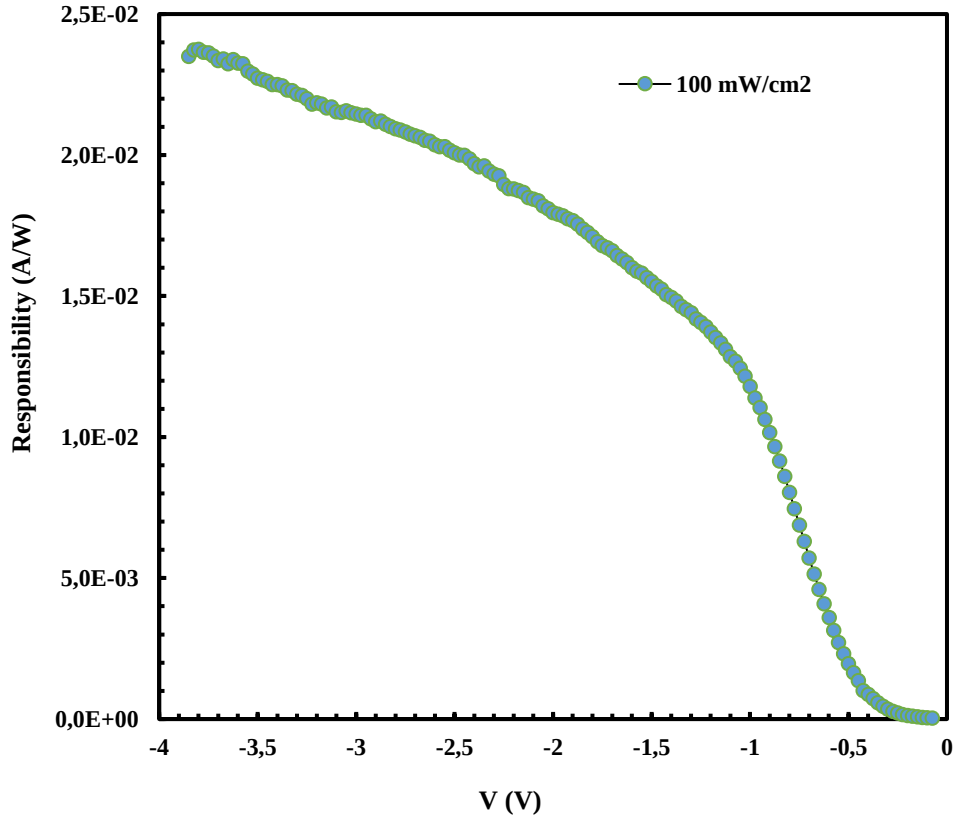
$$R = (I_{ph} - I_{karanlık})/P.A \quad (4.12.)$$

$$D^* = R(A / (2qI_{karanlık}))^{0.5} \quad (4.13.)$$

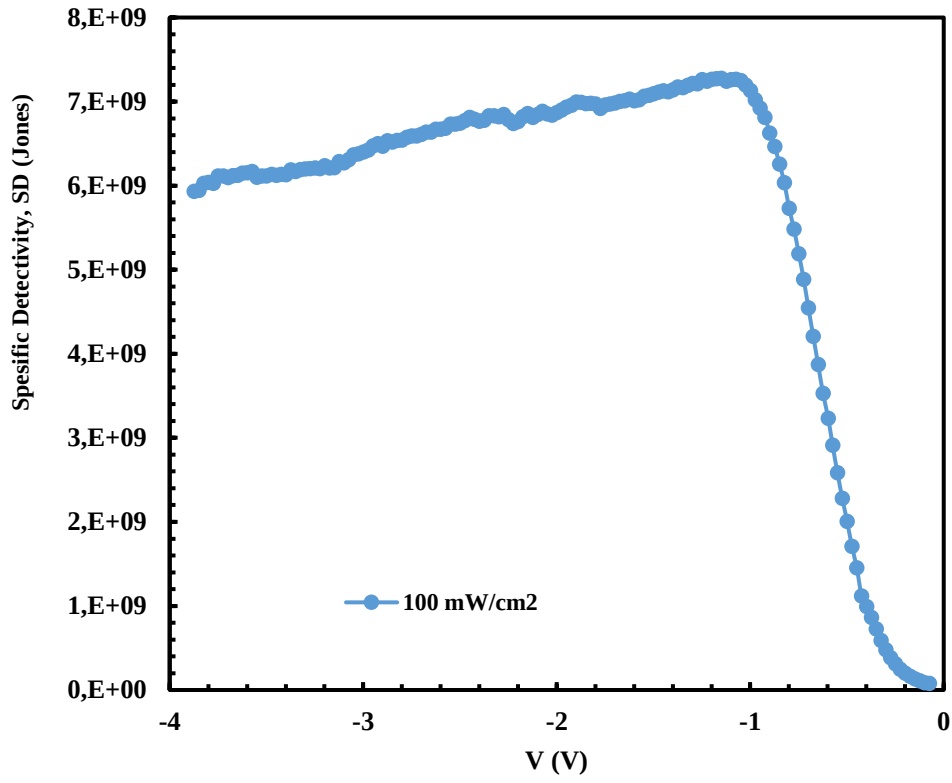
Burada, $I_{karanlık}$ ve I_{ph} nicelikleri sırasıyla karanlık ve farklı ışık şiddetleri altında ölçülen akım değerleri, P diyotun üzerine gönderilen ışık şiddeti ve A ise diyotun alanıdır. Şekil 4.8., 4.9. ve 4.10. 'dan da görüldüğü gibi S , R ve D^* değerleri uygulanan voltaja oldukça bağıllık göstermektedir. Burada; maksimum S , R ve D^* değerleri 100 mW/cm^2 için sırasıyla 140, 0.024 mW/cm^2 ve 7.2×10^9 Jones değerlerine ulaşmaktadır. Elde edilen bu değerler, hazırlanan $\text{Al}/(\text{CdO}:\text{ZnO}:\text{NiO}:\text{Ti})/\text{p-Si}$ diyotun ışığa oldukça duyarlı olduğu ve dolayısıyla fotodiyotlar, güneş pilleri, fotodedektör gibi uygulamalarda başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir [37-41].



Şekil 4. 8. $\text{Al}/(\text{CdO}:\text{ZnO}:\text{NiO}:\text{Ti})/\text{p-Si}$ diyotun 100 mW.cm^{-2} için S-V grafiği.



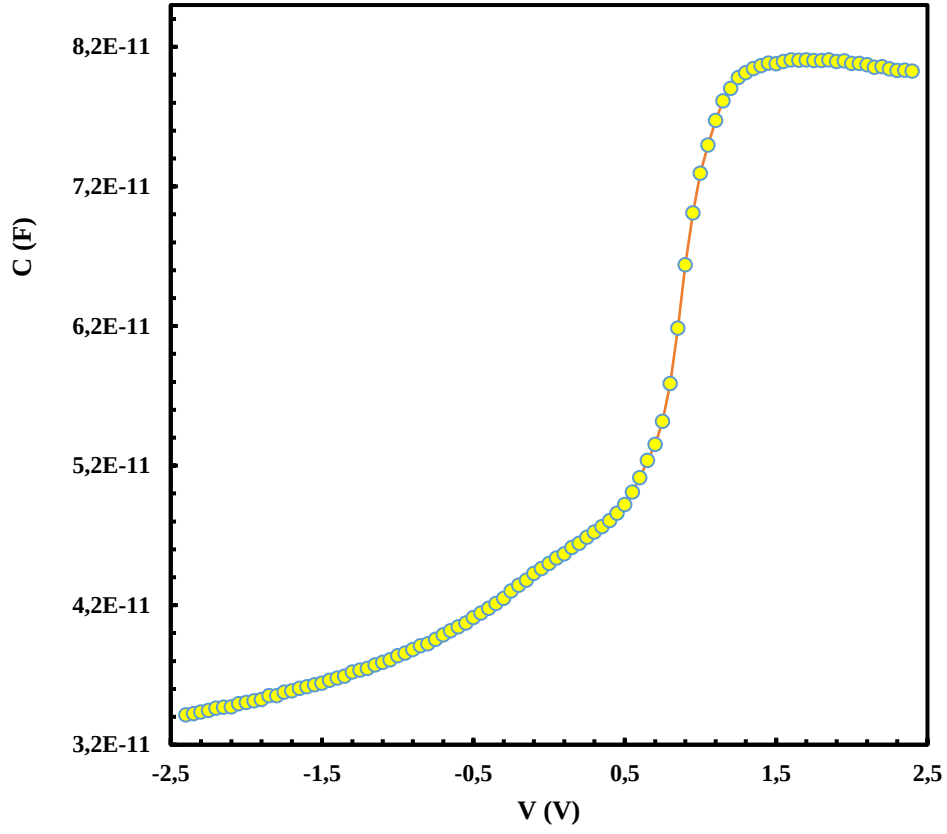
Şekil 4. 9. Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyotun 100mW.cm⁻² için R-V grafiği.



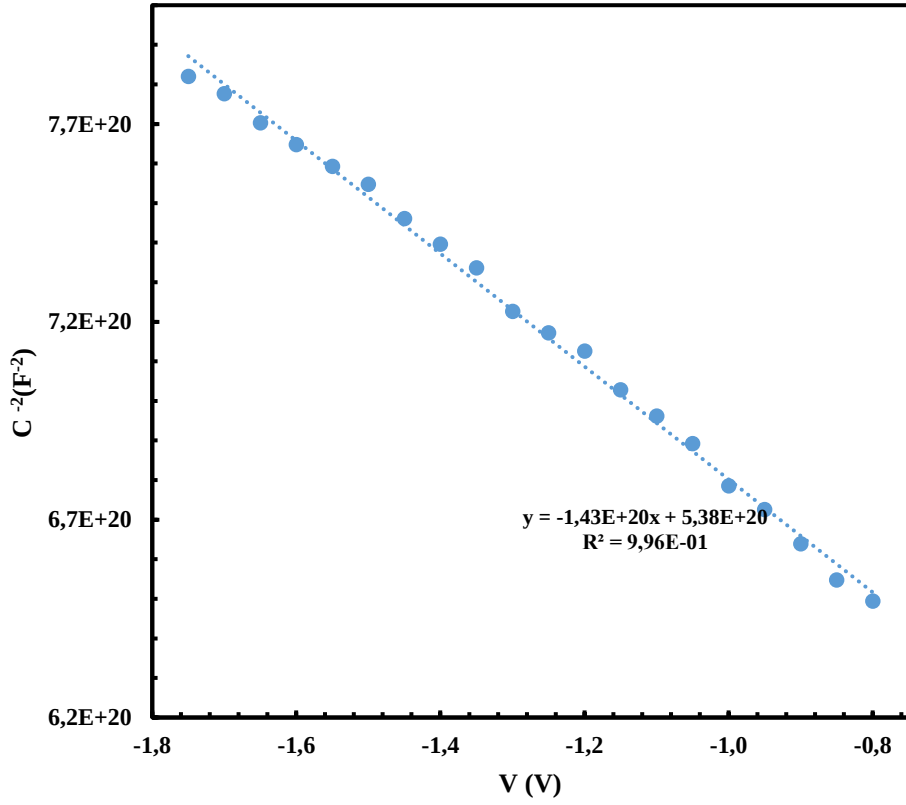
Şekil 4. 10. Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyotun 100mW.cm⁻² için D^{*}-V grafiği.

4.3 Sığa-Voltaj Karakteristikleri

Genelde, ileri beslem I-V ölçümlerinden elde edilen diyot parametreleri, ileri beslem C-V ölçümlerinden elde edilenlerden farklıdır. Çünkü bu yapılarda ters gerilim altında, yarıiletkenden metale geçen elektronların gördüğü engel, metalden yarıiletkene geçenlerin gördüğü engelden yaklaşık olarak Fermi-enerji (E_F) kadar büyüktür [1]. Bu nedenle hazırlanan bu fotodiyotların sadece karanlıktaki C-V ölçümleri HP-4192A LF empedans analizör yardımıyla 500 kHz de ve $\pm 2.5V$ arasında 50 mV' luk adımlarla ölçüldü ve Şekil 4.11' de verildi. Şekilden de görüldüğü gibi, C-V eğrileri yığılma/accumulation (+1,2V ile -2,5V), tükenim/depletion (-1,0V ile +1,2V) ve terslenim/inversion (-2,5V ile -1,0V) arasında üç farklı davranış sergilemektedir. Bu davranış bir metal/oksit/yarıiletken (MOS) kapasitöre benzerdir ve beklenen bir davranıştır. Çünkü, metal ile yarıiletken kontak edilir-edilmez, p-Si tarafında çoğunlukta olan deşikler metalin önyüzeyine geçmeye başlayınca C ($=Q/V$) değeri azalmaya başlar ve bu difüzyon sonunda p-Si yarıiletkenin ön yüzü negatif yüklenirken metalin ön yüzeyi de pozitif yüklenerek ilk durumuna göre terslenmiş olur.



Şekil 4. 11. Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyotun 500 kHz de ölçülen C-V grafiği.



Şekil 4.12. 1 Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyotun 500 kHz için ters beslem C^{-2} - V grafiği.

MIS tipi bir diyotun tüketim-bölgesi sığası (C) değeri aşağıdaki gibi tanımlanır [1-3]:

$$C = \frac{|\partial Q_{SC}|}{\partial V} = \sqrt{\frac{q \varepsilon_s \varepsilon_0 N_A}{2(V_d - V - \frac{kT}{q})}} \quad (4.14)$$

Burada; ε_s ve ε_0 sırasıyla yarıiletken ve boş uzayın dielektrik sabitleri, A Schottky kontağın alanı ve V_R diyot üzerine uygulanan ters beslem voltajı ve V_D ise C^{-2} -V grafiğinde, C^{-2} eksenini (y-ekseni) sıfır iken voltaj eksenini kestiği noktadan bulunur ($V_d = V_0 + kT/q$). Böylece, Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si/Al diyotun diğer bazı temel elektriksel parametreleri olan alıcı katkı atomlarının yoğunluğu (N_A), Fermi enerji (E_F), difüzyon potansiyeli ($V_D = V_0 + kT/q$), tüketim bölgesini genişliği (W_D), eklemde oluşan maksimum elektrik alan (E_m), ve potansiyel engel yüksekliği ($\Phi_B(C-V)$) değerleri de Şekil 4.12' de verilen ters beslem lineer C^{-2} -V eğrisinin kesim noktası ve eğiminden faydalanarak aşağıda verilen denklemler (Bkz. Eşitlik 4.15., 4.16., 4.17., 4.18. ve 4.19.) yardımıyla hesaplandı.

$$C^{-2} = \frac{2(V_R + V_0)}{q \varepsilon_s \varepsilon_0 A^2 N_D} \quad (4.15.)$$

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_C}{N_D} \right) \quad (4.16.)$$

$$W_D = \left(\frac{2 \varepsilon_s \varepsilon_0 V_D}{q N_D} \right)^{1/2} \quad (4.17.)$$

$$E_m = \left(\frac{2q N_D V_0}{\varepsilon_s \varepsilon_0} \right)^{1/2} \quad (4.18.)$$

$$\Delta \Phi_B = \left(\frac{2E_m}{4\pi \varepsilon_0} \right)^{1/2} \quad (4.19.)$$

Böylece, elde edile V_0 ve E_F değerleri kullanılarak metal ile yarıiletken arasında oluşan potansiyel engel yüksekliği aşağıdaki Eşitlik 4.20. 'den elde edildi.

$$\Phi_B = V_0 + \frac{kT}{q} + E_F \quad (4.20.)$$

Hazırlanan Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si/Al diyotun N_A , E_F , $V_D=V_0+kT/q$, W_D ve $(\Phi_B(C-V))$ değerleri $1/C^2-V$ grafiğinden 500 kHz için sırasıyla $6.94 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 0.231 eV, 0.79 eV, $3.62 \times 10^{-5} \text{ cm}$ ve 1.16 eV elde edildi. Ters beslem $1/C^2-V$ grafiğinden elde edilen $\Phi_B(C-V) = 1.16 \text{ eV}$ değeri, ileri beslem $\ln(I)-V$ grafiğinde elde edilen değerden fazladır ve bu durum kullanılan ölçümün ve hesaplama yönteminin doğasından kaynaklanmaktadır. Son zamanlarda da literatürde benzer çalışmalar yapılmış ve benzer özellikler elde edilmiştir [41-44].



5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, hazırlanan Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si fotodiyotların elektrik ve optoelektrik özellikleri; hem karanlık hem de 100 mW/cm^2 ışık şiddeti altında ve $\pm 4 \text{ V}$ aralığında deneysel I-V ve 500 kHz ' teki C-V ölçümleri kullanılarak incelendi. Fotodiyotun temel elektriksel parametreler olan; n , I_0 , Φ_{B0} , R_s , R_{sh} ve ($RR=I_F/I_R \pm 4 \text{ V}$ için) standart TE kullanılarak I-V verilerinden elde edildi. Yine bu temel parametrelerden; n , R_s ve Φ_B değerleri Cheung ve Norde fonksiyonlarından hesaplandı ve sonuçlar karşılaştırıldı. Diyotun performansını veya kalitesini önemli ölçüde etkileyen N_{ss} ve R_s değerleri sırasıyla Card-Rhoderick ve Ohm yasaları kullanılarak $N_{ss}-(E_{ss}-V)$ ve R_i-V dağılımları karanlık ve aydınlatma şiddeti için elde edildi. Bir fotodiyotun ışığa duyarlılığını belirleyen optik parametrelerden; S , R ve D^* değerleri voltaja bağlı olarak 100 mW/cm^2 ışık şiddeti için sırasıyla 140 , $0,024 \text{ mW/cm}^2$ ve $7,2 \times 10^9$ Jones olarak elde edildi. Bu hesaplanan deneysel değerler, hazırlanan Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si diyotun ışığa oldukça duyarlı olduğunu ve dolayısıyla fotodiyotlar, güneş pilleri, fotodedektör gibi uygulamalarda başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir.

$\ln(I_F)-\ln(V_F)$ grafiğinin hem karanlık hem ışık şiddeti altında eğimleri farklı olan üç lineer bölgesi olduğu gözlemlendi ve I-V ilişkisinin $I \sim V^m$ şeklinde olduğu görüldü. Bu doğruların eğimlerinden, düşük, orta ve yüksek voltaj bölgelerinde sırasıyla Ohmik, uzay-yükü ile sınırlı akım (SCLC), ve tuzak-yükü ile sınırlı akım (TCLC) modeline uyduğu belirlendi. Hazırlanan Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si fotodiyotun; N_A , E_F , $V_D=V_0+kT/q$, W_D ve $\Phi_B(C-V)$ değerleri $C^{-2}-V$ grafiğinden 500 kHz için sırasıyla $6.94 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $0,231 \text{ eV}$, $0,79 \text{ eV}$, $3,62 \times 10^{-5} \text{ cm}$ ve $1,16 \text{ eV}$ elde edildi. Ters beslem $C^{-2}-V$ grafiğinden elde edilen $\Phi_B(C-V)=1,16 \text{ eV}$ değeri, ileri beslem $\ln(I)-V$ grafiğinden elde edilenden fazladır ve bu durum kullanılan ölçümün ve hesaplama yönteminin doğasından kaynaklanmaktadır.

Bu ve benzeri konularda ileride yapılacak çalışmalar için başlıca önerimiz, elektriksel ölçümlerin daha geniş bir aydınlatma şiddeti, frekans, sıcaklık ve voltaj aralığında gerçekleştirilerek, onların muhtemel iletim mekanizmaları, potansiyel engelin biçimi hakkında daha güvenilir ve doğru sonuçlar elde etmektir. Çünkü tek veya dar bir aralıktaki

elektriksel ve fotoelektrik ölçümler bize bu konularda yeterince doğru ve güvenilir sonuçlar vermeyebilir.



KAYNAKLAR

- [1]. **Sze, S. M.** (2007). Physics of Semiconductor Devices. 3rd ed. New Jersey: John Wiley & Sons
- [2]. **Tung, R. (2001).** Recent advances in Schottky barrier concepts. *Mater. Sci. Eng.*, R Volume 35, Issues 1–3, Pages 1-138.
- [3]. **B. L. Sharma.** (1984). Metal-semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications., . *Plenum Press New York*.
- [4]. **H.C. Card, E. R.** (1971). Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 4 1589-1601.
- [5]. **Al-Ahmadi, N.A** (2020). Metal oxide semiconductor-based Schottky diodes: a review of recent advances. *Materials Research Express*, 7 032001.
- [6]. **Tung, R.** (2014). The physics and chemistry of the Schottky barrier height. . *Applied Physics Reviews*, 13 011304.
- [7]. **Zeyrek, S.** (2015). The Effect of Interface States and Series Resistance on Current-Voltage Characteristics in (MIS) Schottky Diodes, *AKÜ FEMÜBİD 15, 021101 (1-9)*
- [8]. **W. Mönch, J. V.** (1999). Barrier heights of real Schottky contacts explained by metal-induced gap states and lateral inhomogeneities. *Sci. Technol.* B 17 1867.
- [9]. **A.G. Al-Sehemi, A. K.-G.** (2022). Photodiode performance and infrared light sensing capabilities of quaternary Cu₂ZnSnS₄ chalcogenide. *Surfaces and Interfaces*, 29 101802.
- [10]. **M.K. Hudait, K. V.** (2001). Electrical transport characteristics of Au/n-GaAs Schottky diodes on n-Ge at low temperatures. *Solid-State Electronics* 45 133.
- [11]. **İ Taşcıoğlu, G. P.-G.-K.** (2023). Examination on the current conduction mechanisms of Au/n-Si diodes with ZnO-PVP and ZnO/Ag₂WO₄-PVP inter facial layers, . *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 107 536-5.
- [12]. **S. Demirezen, Ş. Altındal, I. Uslu,** (2013). Two diodes model and illumination effect on the forward and reverse bias I-V and C-V characteristics of Au/PVA (Bi-doped)/n-Si photodiode at room temperature, *Current Applied Physics*, 13 53-59.

- [13]. **J.P. Sullivan, R. T.** (1991). Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers: A numerical study. *J. Appl. Phys.* 70 7403.
- [14]. **H. Uslu, Ş. A.** (2011). The illumination intensity and applied bias voltage on dielectric properties of au/polyvinyl alcohol (Co, Zn-doped)/n-Si Schottky barrier diodes. *Journal of Applied Polymer Science*;120(1):322-8.
- [15]. **B. Kınacı, T. A.** (2012). Electrical characterization of Au/ZnO/TiO₂/n-Si and (Ni/Au)/ZnO/TiO₂/n-Si Schottky diodes by using current-voltage measurements. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, Volume 14, pages 959-963.
- [16]. **Radaf, I. M.** (2022). Current Transport and Capacitance–Voltage Characteristics of the Novel Al/n Si/CuGaSnS₄/Au, . *Heterojunction Silicon* 14 9103–9110.
- [17]. **Radaf, I. E.** (2023). Detailed analysis of the electrical and photovoltaic characteristics of Al/Cu₂ZnGeSe₄/n-Si/Ag Heterojunction,. *Indian J Phys* Volume 97(13):pages 3827–3833.
- [18]. **C. Pei, Y. W.** (2020). Gaussian Thermionic Emission Model for Analysis of Au/MoS₂ Schottky-Barrier Devices, . *Phys Rev Appl.* 14, 54027.
- [19]. **I. Jyothi, V. J.-J.** (2014). Modified electrical characteristics of Pt/n-type Ge Schottky diode with a pyronine-B interlayer. *Superlattices and Microstructures*, Volume 75, Pages 806-817. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2014.09.016>.]
- [20]. **M. Gökçen, T. T.** (2012). Electrical and photocurrent characteristics of Au/PVA (Co-doped)/n-Si. *Materials Science and Engineering: B*, Volume 177, Issue 5, 25, Pages 416-420.
- [21]. **H.G. Çetinkaya,** (2022). Vertical CdTe:PVP/p-Si-Based Temperature Sensor by Using Aluminum Anode Schottky Contact. *IEEE Sensors Journal*, 22, 22391-22397.
- [22]. **A. Tataroğlu, Ş. Altındal, Y. Azizian-Kalandaragh.** (2020). Comparison of electrical properties of MS and MPS type diode in respect of (In₂O₃-PVP) interlayer. *Physica B: Condensed Matter*, 576, 411733.
- [23]. **F.Ş. Kaya, S. D.** (2021). Effect of illumination on the electrical characteristics of Au/n-GaP/Al and Au/Chlorophyll-a/n-GaP/Al structures. *Materials Science and Engineering B*, 265, 114980.
- [24]. **H. Elamen, Y. B.** (2020). The possible current-conduction mechanism in the Au/(CoSO₄-PVP)/n-Si junctions. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31, 18640-18648.
- [25]. **A.B. Ulsan, A. T.-K.** (2021). Photoresponse properties of Au/(CoFe₂O₄-PVP)/n-Si/Au (MPS) diode. *Journal Of Materials Science-Materials İn Electronics*, 32, 15732-15739.

- [26]. Çiçek, O. T. (2016). I., “Evaluation of electrical and photovoltaic behaviours as comparative of Au/n-GaAs (MS) diodes with and without pure and graphene (Gr)-doped polyvinyl alcohol (PVA) interfacial layer under dark and illuminated conditions. *Composites Part B: Engineering*, 98: 260-268.
- [27]. S. Altındal Yerişkin, A. D. (2024). Quaternary functional semiconductor devices. *Physica Scripta*, 99, 075958.
- [28]. S. Altındal-Yerişkin, M. B. (2017). The effects of (graphene doped-PVA) interlayer on the determinative electrical parameters of the Au/n-Si (MS) structures at room temperature, . *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 28, 14040–14048.
- [29]. S. Demirezen, Z. S. (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.
- [30]. Reddy, V. (2014). Electrical properties of Au/polyvinylidene fluoride/n-InP Schottky diode with polymer interlayer. *Thin Solid Films*. 556, 300–306. doi:10.1016/j.tsf.2014.01.036.
- [31]. Song, Y. P. (1986). On the difference in apparent barrier height as obtained from capacitance-voltage and current-voltage-temperature measurements on Al/p-InP Schottky barriers. *Solid State Electronics*, 29 86): 633-638.
- [32]. Ş. Altındal, Ö. S.-K. (2019). A comparison of electrical parameters of Au/n-Si and Au/(CoSO₄–PVP)/n-Si structures (SBDs) to determine the effect of (CoSO₄–PVP) organic interlayer at room temperature”. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30: 9273-9280.
- [33]. A. Yeşildağ, M. E. (2021). Optical and Electrical Properties of Pyrene–Imine Organic Interface Layer Based on p-Si,. *Journal of Electronic Materials*, 50, 6448-6458.
- [34]. I. Jyothi, V. J.-J. (2014). Modified electrical characteristics of Pt/n-type Ge Schottky diode with a pyronine-B interlayer. *Superlattices and Microstructures*, Volume 75, Pages 806-817. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2014.09.016>.]
- [35]. V. Rajogopal Reddy, V. M. (2014). Electrical Properties and Current Transport Mechanisms of the Au/n-GaN Schottky Structure with Solution-Processed High-k BaTiO₃ Interlayer, . *Journal of Electronic Materials*, 43.
- [36]. Ameen, S. A. (2014). Metal Oxide Semiconductors and their Nanocomposites Application Towards Photovoltaic and Photocatalytic. *Advanced Energy Materials* (Vol. 9781118686294, pp. 105–166). .
- [37]. S. Alptekin, Ş. A. (2020). Electrical characteristics of Au/PVP/n-Si structures using admittance measurements between 1 and 500 kHz. . *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(16), 13337–13343.

- [38]. **Cheung, S. K.** (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49(2), 85–87.
- [39]. **Ganj, T. R.-K.-G.** (2023)). The effect of (CeO₂: PVC) thin interfacial film on the electrical features in Au/n-Si Schottky barrier diodes (SBDs) by using current–voltage measurements. *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, 34(8).
- [40]. **Lapa, H. E.** (2021). The response of high barrier Schottky diodes to light illumination. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(4), 4448–4456. .
- [41]. **A.G. Al-Sehemi, A. K.-G.** (2022). Photodiode performance and infrared light sensing capabilities of quaternary Cu₂ZnSnS₄ chalcogenide. *Surfaces and Interfaces*, 29 101802.
- [42]. **I.M El Radaf,** (2023). *Detailed analysis of the electrical and photovoltaic characteristics of Al/Cu₂ZnGeSe₄/n-Si/Ag*. Heterojunction, Indian J Phys 97(13):3827–3833.
- [43]. **S. Altındal Yerişkin, A. D.** (2024). Quaternary functional semiconductor devices. *Physica Scripta*, 99, 075958.
- [44]. **Ç.Ş. Güçlü, E. E.-K.** (2023). A comparison of electrical characteristics of the Au/n-Si Schottky diodes with (ZnCdS:GO(1:1) and (ZnCdS:GO(1:0.5) doped PVP interlayer using current–voltage (I–V) and impedance–voltage (Z–V) measurements. , *J Mater Sci: Mater Electron* 34, 1909.
- [45]. **Abbas, A.** (2017). Electrical and Optical Studies on CdO." *Semiconductor Science and Technology* .
- [46]. **Balachandran, U. A.** (1982). "Thermodynamic and electrical properties of nickel oxide. *Journal of Solid State Chemistry* 42.3: 276-282.
- [47]. **Bär, M. e.** (2004). Physical properties of ZnO thin films: Crystallinity, conductivity, and surface morphology. *Journal of Applied Physics* 96.8 4788-4793.].
- [48]. **Batra, V.** (2021). Surface Roughness Effects on Optoelectronics. *IEEE Transactions on Electron Devices*.
- [49]. **Boyer, R. W.** (1994). Materials Properties Handbook: Titanium Alloys. *ASM International*.
- [50]. **Donachie, M. J.** (2000). Titanium: A Technical Guide. *ASM International*.
- [51]. **Ellmer, K. E.** (2008). Transparent Conductive Zinc Oxide: Basics and Applications in Thin Film Solar Cells. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*.
- [52]. **Fan, D.** (2009). Catalyst-free growth and crystal structures of CdO nanowires and nanotubes. *Journal of Crystal Growth* 311 () 2300–2304.
- [53]. **Feng, Q. E.** (2004). "Mechanical properties and potential applications of nickel oxide ceramics." . *Ceramics International* 30.3: 409-415.].

- [54]. **Froes, F. H.** (2015). *Titanium: Physical Metallurgy, Processing, and Applications*. ASM International.
- [55]. **Green, M. A.** (2008). *Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion*. Springer.
- [56]. **Grønvold, F. A.** (1990). "Thermophysical properties of nickel oxide.". *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions* 86.9 (9): 1413-1418.].
- [57]. **Guo, Y. e.** (2018). "NiO-based thin film materials: Preparation and applications in energy devices.". *Advanced Energy Materials* 8.17 1800085.
- [58]. **Gurrappa, I. &** (2008). "Oxidation and hot corrosion behavior of titanium alloys." . *Materials Science and Engineering: A*, 476(1-2), 74-82.
- [59]. **Hong, G. Y.** (2004). "Structural and thermal stability of NiO thin films for various applications.". *Thin Solid Films* 469-470: 310-315.].
- [60]. **Huda, M. N.** (2005). "Band structure and optical properties of nickel oxide: A density functional theory study." . *Physical Review B* 72.19: 195103.] .
- [61]. **Hull, R.** (1999). *Properties of Crystalline Silicon*. NSPEC, IET.
- [62]. **İ Taşcıoğlu, G. P.-G.-K.** (2023). Examination on the current conduction mechanisms of Au/n-Si diodes with ZnO-PVP and ZnO/Ag₂WO₄-PVP inter facial layers, . *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 107 536-5.
- [63]. **Jagadish, C. A.** (2006). *Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures: Processing, Properties, and Applications*. Elsevier.
- [64]. **Janotti, A. A.** (2009). Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor. *Reports on Progress in Physics* 72.12: 126501.
- [65]. **Kelly, A. &** (2012). *Crystallography and Crystal Defects*. . John Wiley & Sons.
- [66]. **Khattak, G. D.** (2000). "Dielectric properties of nickel oxide ceramics.". *Materials Science and Engineering: B* 68.1: 56-60.
- [67]. **Kittel, C.** (2005). *Introduction to Solid State Physics*. . Wiley.
- [68]. **Klingshirn, C.** (2007). ZnO: From basics towards applications. *Physica Status Solidi (b)* 244.9 (9): 3027-3073.].
- [69]. **Kumar, A.** (2020). Optical Properties of CdO Thin Films. *Journal of Materials Chemistry* .
- [70]. **Kwok, S. M.** (2007). *Physics of Semiconductor Devices* 3rd ed. New Jersey. John Wiley & Sons.
- [71]. **Lewis, B. G.** (2000). "Applications and processing of transparent conducting oxides." . *MRS Bulletin* 25.8: 22-27.].
- [72]. **Leyens, C. &** (2003). *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*. Springer.

- [73]. **Look, D. C.** (2001). Recent advances in ZnO materials and devices. *Materials Science and Engineering: B* 80.1-3 (): 383-387.]. .
- [74]. **Lutjering, G. &** (2007). Titanium. *Springer Science & Business Media*.
- [75]. **Meyer, B. K.** (2004). "Electronic and optical properties of nickel oxide." . *Physica Status Solidi (b)* 241.10: 2310-2315.].
- [76]. **Morkoç, H. a.** (2009). Zinc Oxide: Fundamentals, Materials and Device Technology. *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*.
- [77]. **Niinomi, M.** (1998). Mechanical properties of biomedical titanium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 243(1-2), 231-236.
- [78]. **Ohtomo, A. e.** (2004). ZnO as a functional oxide. *Annual Review of Materials Research* 34, 11-17.
- [79]. **Öztürk, Z. E.** (2018). CdO Thin Films: Optical and Electrical Properties. *Materials Science Forum*.
- [80]. **Pearton, S. J.** (2005). ZnO materials for electronic and optoelectronic device applications. *Progress in Materials Science* 50.3 (): 293-340.]. .
- [81]. **Polmear, I. J.** (2017). Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals. . *Butterworth-Heinemann*.
- [82]. **Reynolds, D. C.** (1999). "Valence-band ordering in ZnO". *Physical Review B* 60.4 (): 2340.].
- [83]. **Smithells, C.** (1992). Metals Reference Book. *Elsevier*. .
- [84]. **Werner, M. &** (2007). Properties of Transparent Conducting Oxides. *Physical Review B*.
- [85]. **Yang, H. &** (2019). Interface Engineering in Optoelectronic Devices. *Nano Energy*.
- [86]. **Yii Yat Chan,, Zi Cheng Tey, & , Hui-Qiong Wang.** (2024). Interfacial electronic state between hexagonal ZnO and cubic NiO,. *Royal Society of Chemistry* 14, 17238-14244.
- [87]. **Zhang, X. E.** (2016). Thermal Stability of CdO-Based Devices. *Thin Solid Films*.
- [88]. **Zhang, Y. E.** (2005). Corrosion resistance of Ti and its alloys. *Corrosion Science*, 47(6), 1367-1382.].

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler		
Adı Soyadı		
Doğum Yeri		
Doğum Tarihi		
Uyruğu		
Telefon		
E-Posta Adresi		
Web Adresi		

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	
Fakülte	
Bölümü	
Mezuniyet Yılı	

Yüksek Lisans	
Üniversite	
Enstitü Adı	
Anabilim Dalı	
Programı	

Doktora	
Üniversite	
Enstitü Adı	
Anabilim Dalı	
Program Adı	

Makale ve Bildiriler
Karakuş, E. & Koç, M., M. (2023). Temel İnce Film Üretim Tekniklerine Bir Bakış, <i>Kırklareli University Journal of Engineering and Science</i> 9-1 (2023) 213-236
Karakuş, E., Koç, M., M. & Coşkun, B. (2024). Basics of Thermal and Mechanical Characterization Techniques, <i>Journal of Materials and Electronic Devices</i> 6 (2020) 1-4
Karakuş, E., Güçlü Ç. Ş., Koç, M., M. & Coşkun, B. (2024). Photoelectric and Diode Characteristics of Al(CdO:ZnO:NiO:Ti)p-Si/Al Schottky Diodes, <i>Journal of Materials and Electronic Devices</i> 5 (2024) 22-28
Karakuş, E., Güçlü Ç. Ş., Koç, M., M. & Coşkun, B. (2024). Current–Voltage Characteristics of Al/(CdO:ZnO:NiO:Ti)/p-Si/Al Quaternary Functional Schottky Diodes, <i>Journal of Materials and Electronic Devices</i> 4 (2024) 36-45