T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

N-ZnO/p-Si HETEROEKLEM DİYOT YAPILARININ ÜRETİLMESİ VE ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNİN AYDINLIK VE KARANLIK ORTAMLAR İÇİN ZnO İNCE FİLM KALINLIĞINA BAĞLI OLARAK BELİRLENMESİ

Bahri GEZGİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalını

Ocak-2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Bahri GEZGİN tarafından hazırlanan "ZnO İnce Film Kalınlığa Bağlı Olarak Üretilecek n-ZnO/p-Si Heteroekem Diyot Yapılarının Aydınlık ve Karanlık Ortamdaki Elektriksel Karakterizasyonlarının Belirlenmesi" adlı tez çalışması 11/01/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Başkan Prof. Dr. Bedrettin MERCİMEK	……..
Danışman Dr.Öğr. Üyesi Yasemin GÜNDOĞDU	……..
Üye Prof. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ	……..

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Sait GEZGİN
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından 20201010 nolu proje ile desteklenmiştir.

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

N-ZnO/p-Si HETEROEKLEM DİYOT YAPILARININ ÜRETİLMESİ VE ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNİN AYDINLIK VE KARANLIK ORTAMLAR İÇİN ZnO İNCE FİLM KALINLIĞINA BAĞLI OLARAK BELİRLENMESİ

Bahri GEZGİN

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Yasemin GÜNDOĞDU

2021, 72 Sayfa

Jüri
Dr. Öğr. Üyesi Yasemin GÜNDOĞDU
Prof. Dr. Bedrettin MERCİMEK
Prof. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, Puls Laser Depozisyon tekniği kullanarak oda sıcaklığındaki soda lime cam ve p-Silicon wafer alt tabakalar üzerine laser puls sayısına bağlı olarak faklı kalınlıkta ZnO ince filmler üretilmiştir. Düşük sıcaklıkta alt tabaka üzerine büyütülen ZnO ince filmler polikristal yapıdadırlar. Laser pulse sayısı artarken ZnO ince filmlerin tanecik boyutu ve kalınlığı artmış ve band aralıkları azalmıştır. n-tipi ZnO ince filmler ile Ag/n-ZnO/p-Si/Au ve Ag/n-ZnO/p-Si/Al heteroeklem diyot yapıları üretilmiştir. Bu diyotların karanlık ve aydınlık ortamda J-V karakteristikleri elde edilmiştir. Karanlık ortam için, geleneksel J-V, Cheung-Cheung ve Norde metotları kullanarak diyotların ideality faktörleri, bariyer yükseklikleri, seri dirençleri hesaplanmış ve bu değerlerdeki yükseliş ve azalışlar birbirleri ile uyumlu bulunmuştur. En düşük kalınlıktaki ZnO ince film ile üretilmiş Ag/n-ZnO/p-Si/Au heteroeklem diyotun ideality faktörü, seri direnci ve bariyer yüksekliği diğer diyotlara kıyasla daha düşüktür. ZnO ince filmin kalınlığı artarken diyotların bu parametrelerinde düşüş kaydedilmiştir. Ek olarak, düşük kalınlıktaki ZnO ince film için, Ag/n-ZnO/p-Si/Al diyotun ideality faktörü düşük, seri direnci ve bariyer yüksekliği yüksek olup film kalınlığı arttırıldığında bu değerler ters orantılı değişiklik göstermiştir.

Düşük kalınlıktaki ZnO ince filme dayalı heteroeklem diyotlar, aydınlık ortamda zayıf fotovoltaik özellik gösterirken, ZnO ince film kalınlığı artarken diyotların foto akımı ve güç dönüşüm verimi yükselmiştir. Ancak, ZnO/Si heteroeklem diyotların ışık altındaki fotovoltaik performansları kısmen zayıf olup, bu durum ZnO ve Si yarıiletkenler arasındaki kafes uyumsuzluğu, arayüzey durumları, kontak dirençleri, Si yarıiletken üzerinde biriken oksit tabaka gibi bazı faktörlere dayandırılmıştır.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında ZnO/Si heteroeklem diyotları oluşturan ZnO ince filmlerin kristal, morfolojik ve optik özellikleri incelenmiş ve diyotların aydınlık ve karanlık ortamdaki elektriksel parametreler hesaplanmış ve birbirleri ile karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: ZnO, İnce film, Heteroeklem diyot, PLD, Si, Fotovoltaik

ABSTRACT

MS THESIS

PRODUCTION OF N-ZnO / p-Si HETEROJUNCTION DIODE STRUCTURES AND DETERMINATION OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS DEPENDING ON THE THICKNESS OF THE ZnO THIN FILM UNDER THE ILLUMINATION AND DARK ENVIRONMENTS

Bahri GEZGİN

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN PHYSIC

Asisst. Prof. Dr. Yasemin GÜNDOĞDU

2021, 72 Pages

Jury
Asisst Prof. Dr. Yasemin GÜNDOĞDU
Prof. Dr. Bedrettin MERCİMEK
Prof. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ

In this master's thesis, ZnO thin films with different thicknesses were produced on the soda lime glass and p-Silicon wafer substrates at room temperature, using Puls Laser Deposition technique, depending on the number of laser pulses. ZnO thin films grown on the substrate at low temperature have a polycrystalline structure. While the number of laser pulses increased, the particle size and thickness of ZnO thin films increased and their band gaps decreased. Ag/n-ZnO/p-Si /Au and Ag/n-ZnO/p-Si/Al heterojunction diode structures were produced with n type ZnO thin films. J-V characteristics of these diodes in the dark and under the illumination condition were obtained. To the dark environment, using the conventional J-V, Cheung-Cheung and Norde methods, the ideality factors, barrier heights and series resistances of the n-ZnO/p-S heterojunction idiodes were calculated and the increases and decreases in these values were found compatible with each other. The idealness factor, series resistance and barrier height of Ag/n-ZnO/p-Si/Au hetero-junction diode produced with the lowest thickness ZnO thin film is lower compared to other diodes. While the thickness of ZnO thin film increased, these parameters of the diodes decreased. In addition, to the low thickness ZnO thin film, the ideality factor of the Ag/n-ZnO/p-Si/Al diode is low, the series resistance and the barrier height are high, and these values changed inversely when the film thickness was increased.

Hetero-junction diodes based on low-thickness ZnO thin film show poor photovoltaic properties in illumination condition, while the photo current and power conversion efficiency of diodes increased as ZnO thin film thickness increased. However, the photovoltaic performances of ZnO/Si hetero-junction diodes under light are partially weak, which is based on some factors such as lattice mismatch between ZnO and Si semiconductors, interface states, contact resistances, oxide layer accumulated on Si semiconductor.

As a result, in this thesis, the crystal, morphological and optical properties of ZnO thin films forming ZnO/Si hetero-junction diodes are examined and the electrical parameters of the diodes in light and dark condition are calculated and interpreted in comparison.

Keywords: ZnO, thin film, hetero-junction diode, PLD, Si, photovoltaic

ÖNSÖZ

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi, tecrübe ve deneyimleri ile yol gösteren tükenmeyen enerjisiyle bize enerji veren, lisansüstü öğrenim hayatımın tüm zorlu aşamalarında yardımcı olan, tecrübeleriyle beni aydınlatan ve desteğini hiç eksik etmeyen, kendisini tanımaktan büyük onur duyduğum saygıdeğer hocam Prof.Dr.Hamdi Şükür KILIÇ'a teşekkür ediyorum.

Tez çalışmamın her aşamasın da bana yardımcı olan ve desteklerini esirgemeyen danışmanlığıyla yol gösteren Dr. Öğr. Üyesi Yasemin GÜNDOĞDU hocama teşekkür ediyorum.

Yüksek lisans eğitimim sırasında desteği, sabrı ve yardımlarını esirgemeyen, manevi desteğini her zaman üzerimde hissettiğim değerli hayat arkadaşım Dr.Serap YİĞİT GEZGİN'e teşekkür ediyorum.

Sabırla bizimle birlikte ders çalışmasını öğrenen ve yanımızdan, kalbimizden ayırmadığımız, çalışmalarımıza engel olmak bir yana, laboratuvarda uyumayı askeri bir görev edinmiş olan ve çalışmalarımız süresince gece gündüz demeden laboratuvara mahkum olup derslerini laboratuvarda çalışarak, yemeğini laboratuvarda yiyerek ve uyku ihtiyacını laboratuvarda gidererek çalışmalarımıza eşsiz katkı sağlayan, Selçuk Üniversitesinin bilimsel puanını yukarılara çekmek adına kendisini derslerine adayan ve Selçuk Üniversitesinin akademik seviyesine bilimsel katkı yaptığında Prof.Dr.Hamdi Şükür KILIÇ hocasını Fenerbahçeli yapacak çalışmaların altyapısını şimdiden laboratuvarda hayata geçirmeye alışmak kaydıyla özverili bir şekilde çalışan sevgili oğlum Hamza Berk GEZGİN'e teşekkür ediyorum.

Bahri GEZGİN
KONYA-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **ix**

1. GİRİŞ **1**

1.1. TEZİN ÖNEMİ ve AMACI 4

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **6**

2.1. p-n Heteroeklem 6
2.1.1. Yarıiletkenler 6
2.1.2. p-n Heteroeklemin Enerji Bant Diagramı 7
2.1.3. p-n heteroeklemin fotovoltaik özelliği 9
2.1.4. p-n heteroeklemin I-V Karakteristiği 11
2.2. ZnO Yariletken 13
2.3. ZnO ince filmin Puls Laser Deposizasyon sistemi ile Üretimi 14
2.3.1. Puls Laser Depozisyon Tekniği 15

3. MATERYAL VE YÖNTEM **19**

3.1. Pulse Laser Depozisyon Sistemi 19
3.2. Fiziksel Buharlaştırma Depozisyon (PVD) Tekniği 21
3.3. İnce Filmlerin Analiz Teknikleri 22
3.3.1. Atomik Kuvvet Mikroskopi (AFM) 22
3.3.2. X-Işını Kırınım Metodu 23
3.3.3. Profilometre Cihazı 25
3.3.4. UV-Vis spektroskopi 25

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA **26**

4.1. ZnO İnce Film Kalınlığının Ag/Zno/Si/Au Heteroeklem Diyotların Elektriksel Özellikleri Üzerindeki Etkisi 26
4.1.1. Deney Aşaması 26
4.1.2. Tartışma ve Sonuçlar 27
4.1.2.1. XRD Analizi 27
4.1.2.2. Morfolojik Analiz 29
4.1.2.3. Optik Analiz 29
4.1.2.4. Ag/n-ZnO/p-Si/Au Heteroeklem Diyotların Karanlık Ortamdaki Elektriksel Özellikleri 31
4.1.2.5. Ag/n-ZnO/p-Si/Au heteroeklem diyotların aydınlık ortamdaki fotovoltaik özellikleri 37

4.2. ZnO ince film kalınlığının Ag/ZnO/Si/Al heteroeklem diyotların elektriksel özellikleri üzerindeki etkisi 39
4.2.1. Deney Aşaması 39
4.2.2. Tartışma ve Sonuçlar 40
4.2.2.1. XRD Analizi 40
4.2.2.2. Morfolojik Analiz 41
4.2.2.3. Optik Analiz 41
4.2.2.4. Ag/n-ZnO/p-Si/Al Heteroeklem Diyotların Karanlık Ortamdaki Elektriksel Özellikleri 42
4.2.2.5. Ag/n-ZnO/p-Si/Al Heteroeklem Diyotların Aydınlık Ortamdaki Fotovoltaik Özellikleri 45

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 47

5.1 Sonuçlar 47
5.2 Öneriler 48

EKLER 54

ÖZGEÇMİŞ 55

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Å	Armstrong
Ag	Gümüş
Al	Alüminyum
Au	Altın
C	Santigrat
CdO	Kadmiyum Oksit
D	Tanecik Boyutu
dk	Dakika
FF	Doldurma Faktörü
E_v	Valans Bandı
E_c	İletim Bandı
E_g	Yarıiletkenin Bant Aralığı
E_f	Foton Enerjisi
h	Plank Sabiti
HCl	Hidroklorür
H2O5	Hidrojen Peroksit
In2O3	İndiyum Oksit
I_F	İleri Bias Akım
I_L	Foto Akım
I_M	Maksimum Akım
I_o	Doymuş Akım
I_{sc}	Kısa Devre Akımı
J_{sc}	Kısa Devre Akım Yoğunluğu
K	Boltzman Sabiti
L_e	Elektronların Difusyon Uzunluğu
L_h	Deşiklerin Difusyon Uzunluğu
Mo	Molibden
n	İdeality Faktörü
NaCl	Sodyum Klorür
Nd:YAG	Neodymium-Doped Yttrium Aluminum Garnet;

q	Elektron Yükü
O	Oksijen
P_M	Maksimum Güç
rpm	Revolutions Per Minute
R_s	Seri Direnç
Si	Silikon
SnO_2	Kalay Oksit
T	Sıcaklık
V_M	Maksimum Voltaj
V_{built}	Yerleşik Potansiyel
V_{oc}	Açık Devre Voltajı
V_T	Termal Voltaj
W	Deplasyon Genişliği
Zn	Çinko
ZnO	Çinko Oksit
µm	Mikrometre
β	Kırınım Pikinin Maksimum Yarı Genişliği
ν	Frekans
λ	Dalgaboyu
θ	Bragg Kırınım Açısı
α	Soğurma Katsayısı
e^-	Elektron
h^+	Deşik
η	Güç Dönüşüm Verimi
Φ_M	Metal İş Fonksiyonu
Φ_S	Yarıiletken İş Fonksiyonu

Kısaltmalar

AFM	Atomik Kuvvet Mikroskopu
Ar-Ge	Araştırma Ve Geliştirme
AM	Air Mass
amu	Atomik Kütle Birimi
cm	Santimetre
eV	Elektron Volt
Hz	Hertz
I	Akım
IR	Kızıl Ötes,
J	Joule
K	Kelvin
LED	Işık Yayan Diyot
m	Metre
M	Mega
mbar	Milibar
mJ	Mili Joule
mm	Milimetre
mW	Mili Watt
NIR	Yakın Kızıl Ötesi
Ns	Nano Saniye
Nm	Nanometre
PLD	Pulse Laser Deposizasyon
PV	Fotovoltaik
PVD	Fiziksel Buhar Deposizasyon
RT	Oda Sıcaklığı
SLG	Soda Lime Cam
SCR	Serbest Uzay Yük Bölgesi
UV	Ultraviyole
UV-Vis	Ultraviyole Visible
TCO	Şeffaf İletken Oksit
V	Voltaj

V_{MB}	Maksimum Valans Bandı
W	Watt
XRD	X-Işını Toz Kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1. Bir yarıiletkenin enerji band diyagramı 6
Şekil 2.2. p-n eklemin şematik oluşum görüntüsü 7
Şekil 2.3. a)p tipi ve n tipi, b) p-n heteroeklemin enerji bandları ile c) heteroekleme +V ve –V uygulanması durumunda enerji band aralığının değişimi..... 8
Şekil 2. 4.p-n heteroeklemin band diagramı..... 8
Şekil 2 .5.Heteroeklem diyotun I-V karakteristiği..... 9
Şekil 2. 6.Işık altında, p-n heteroeklem içerisinde foton soğurulması 10
Şekil 2. 7.Işık altında p-n heteroeklemin band diagramı 10
Şekil 2. 8.p-n heteroeklemde foto uyarımlı yük taşıyıcıların hareketi..... 11
Şekil 2 9. Maksimum güç karesini gösteren p-n heteroeklem için I-V eğrisi 12
Şekil 2. 10. ZnO kristal yapısı (wurtzite yapı)..... 14
Şekil 2. 11.PLD çemberinin şematik görüntüsü..... 15
Şekil 2. 12. Laser -hedef etkileşimi ve malzeme ablasyonu..... 16
Şekil 2. 13.Alt tabaka üzerine deposit edilmiş parçacıkların ince film olarak büyüme süreci 17

Şekil 3. 1. Laboratuvarımızda mevcut bulunan PLD sisteminin a) ön ve b) yukarıdan görüntüsü 19
Şekil 3. 2. a) ns- Continuum Surelite III ve b) Minilite Nd:YAG laserler 20
Şekil 3. 3. ZnO ince filmin tavlanmasında kullanılan ve laboratuvarımızda mevcut quarts tüp fırının a) dış ve b) iç görüntüsü..... 21
Şekil 3. 4. İnce film ve diyotların saklandığı vakum odası..... 21
Şekil 3. 5. a) PVD sisteminin şematik görüntüsü ve b) Laboratuvardaki fotoğrafı 22
Şekil 3. 6. AFM sisteminin blok diyagramı 23
Şekil 3. 7. Bragg kırınımı..... 24
Şekil 3. 8. Profileomtrenin şematik görüntüsü..... 25

Şekil 4. 1. Oksijen gaz basıncı içerisinde ablate edilmiş ZnO plasmasının a) fotoğrafı ve b) şematik görüntüsü (Gezgin ve ark., 2017)..... 26
Şekil 4. 2. n-ZnO/p-Si heteroeklem diyotun şematik görüntüsü 27
Şekil 4. 3. ZnO1, ZnO2, ZnO3 ve ZnO3-tav ince filmlerin XRD Spektrası 28
Şekil 4. 4. ZnO1, ZnO2 ve ZnO3 ince filmlerin 10µm × 10 µm alanındaki AFM görüntüsü..... 29
Şekil 4. 5. ZnO1, ZnO2 ve ZnO3 ince filmlerin a) soğurma spektrumları ve b) Tauc grafikleri..... 30
Şekil 4. 6. ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A diyotların karanlık ortamdaki logaritmik J-V karakterizasyonu 31
Şekil 4. 7. Karanlık ortamda ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A diyotlarının seri dirençlerini uygulanan voltaja bağlı grafiği..... 33
Şekil 4. 8. ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A diyotların a) dV/d(lnJ)-J ve b) H(J)-J karakteristikleri 35
Şekil 4. 9. ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A diyotların F(V)-V karakteristikleri 36
Şekil 4. 10. ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A diyotların ışık altındaki J-V karakteristiği 37
Şekil 4. 11. Ag/n-ZnO/p-Si/Al heteroeklem diyotun şematik görüntüsü 39
Şekil 4. 12. ZnO4 ve ZnO5 ince filmlerin XRD spektrası 40
Şekil 4. 13. a) ZnO4 ve b) ZnO5 ince filmlerin 10µm×10µm alandaki AFM görüntüleri..... 41

Şekil 4. 14. ZnO4 ve ZnO5 ince filmlerin a) soğurma spektrumu ve b) Tauc grafiği 42
Şekil 4. 15. ZnO-4A ve ZnO-5A diyot yapılarının karanlık ortamdaki logaritmik J-V karakteristiği 42
Şekil 4. 16. Karanlık ortamda ZnO-4A ve ZnO-5A heteroeklemlerin seri direncinin uygulanan voltaja bağlı grafiği 43
Şekil 4. 17. ZnO-4A ve ZnO-5A heteroeklem diyotların F(V)-V karakteristiği 44
Şekil 4. 18. ZnO-4A ve ZnO-5A heteroeklem diyotların ışık altındaki J-V karakteristiği 45

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 3. 1. ns- Continuum-Surelite III Nd:YAG lazerin çalışma parametreleri.... 20
Tablo 3. 2. ns- Minilite Nd:YAG lazerin çalışma parametreleri 20

Tablo 4. 1. Karanlık Ortamda ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A diyotların elektriksel parametreleri..... 35
Tablo 4. 2. Işık altındaki ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A diyotların fotovoltaik parametreleri..... 38
Tablo 4. 3. Karanlık ortamda ZnO-4A ve ZnO-5A diyotlarının elektriksel parametreleri..... 44
Tablo 4. 4. Işık altındaki ZnO-4A ve ZnO-5A heteroeklem diyotların fotovoltaik parametreleri..... 45

DENKLEMLER DİZİNİ

Formül	Kesim	Sayfa
$I_F = I_o\left(e^{eV/nkT} - 1\right)$	2.1	10
$I = I_L - I_F = I_{sc} - I_o\left(e^{eV/nkT} - 1\right)$	2.2	10
$V_{oc} = V_t ln\left(I + \frac{I_L}{I_o}\right)$	2.3	11
$P = V.I$	2.4	11
$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}}$	2.5	12
$n\lambda = 2dSin\theta$	3.1	23
$D = 0.94\lambda/\beta cos\theta$	4.1	27
$(\alpha hv)^2 = A\left(hv - E_g\right)^{1/2}$	4.2	29
$I = I_0[exp(qV/nkT) - 1]$	4.3	31
$n = \frac{q}{kT}\frac{dV}{d(lnI)}$	4.4	31
$\Phi_b = \frac{kT}{q} ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_o}\right)$	4.5	32
$\frac{dV}{d(lnI)} = IR_s + n\left(\frac{kT}{q}\right)$	4.6	33
$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q}\right) ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right)$	4.7	33
$H(I) = IR_s + n\Phi_b$	4.8	33
$F(V,\gamma) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} ln\left(\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right)$	4.9	35

$$\Phi_b = F(V_o) + \frac{V_o}{\gamma} - \frac{kT}{q}$$ 4.10 35

$$R_s = \frac{\gamma - n}{I_{min}} \frac{kT}{q}$$ 4.11 35

1. GİRİŞ

Günümüzde modern yaşam, büyük ölçüde yarı iletken tabanlı elektronik teknolojilere dayanmaktadır. İnce film yarı iletken endüstrisi, birçok modern elektronik ve fotonik aygıta dayalı, gelişmekte olan bir alandır. Yarıiletkenler, 1833 yılında, Micheal Faraday tarafından metal davranışa karşılık sıcaklıkla direnci azalan malzemeler olarak keşfedilmiştir. Yarı iletkenler; metal ve yalıtkan arasında elektrik iletkenliğe sahip malzemelerdir. Silikon (Si) ve Germanyum (Ge) gibi temel yarı iletkenler; diyotlarda, transistörlerde, doğrultuculardа, güneş hücrelerinde, ışık yayan diyotlarda (LED), foto-diyotlarda ve entegre devrelerde sıkça kullanılmaktadır. Bunun yanında, ikili yarı iletkenler, ışık emisyonu ya da soğurulmasını gerektiren yüksek hızlı cihazlarda kullanılmaktadır. Yarı iletken diyotlar, ilk olarak 1874 yılında Karl Ferdinand Braun tarafından ifade edilmiştir ve o dönemde bu cihaza "doğrultucu" adı verilmiştir(Chala, 2017; Hussain, 2017).

Bir diyot, akımın bir yönde akmasına izin veren ve ters yönde bloke edebilen bir cihazdır. Yarı iletken bir diyot p tipi malzemenin anodu ile n tipi malzemenin katodundan oluşmaktadır. Akım anottan katoda akar ve bu bir diyotun temel işlevi bu yük akışına dayanmaktadır. Günümüzde, doğrultucu olarak kullanılan LED, Foto diyot, Schottky diyot, Tünel diyot gibi birçok diyot türleri bulunmaktadır. Yarıiletkene dayalı olarak üretilen diyotlar genel olarak p-n heteroeklem yapıda oluşmaktadır. Heteroeklem kavramı, iki farklı yarı iletken katmanının bir araya getirildiği ve sonuç olarak aralarında bir p-n arayüzey oluşturulduğu anlamına gelmektedir. Heteroeklemler, biri kristalin diğeri polikristalin veya amorf gibi farklı özelliklere sahip iki yarı iletkenlerin bir araya gelmesi ile oluşturulmaktadır (Tekcan, 2015; Hussain, 2017).

Günümüzde, şeffaf oksit yarıiletkenler ile birçok heterokelem diyot yapıları üretilmektedir. Şeffaf iletken oksitler (TCO), düz panel ekranlarda ve güneş pillerinde şeffaf elektrotlar, binalardaki pencereler için şeffaf ve ısı yansıtıcı malzeme, güneş kolektörleri ve lambalar dahil olmak üzere geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Optoelektronik cihazların kullanımı için, TCO ince film, görünür spektrumda yüksek elektriksel iletkenlik ve yüksek optik geçirgenlik sergilemektedir. TCO üretimi ilk defa 1907 yılında Baedeker tarafından sıçratılmış kadmiyumun termal oksitlenmesi sonucunda Kadmiyum Oksit (CdO) ince filmin büyütülmesi ile gerçekleştirilmiştir. O zamandan bu yana, TCO filmleri birçok optoelektronik cihazın önemli bir parçası olarak kullanılmaktadır. Ayrıca günümüze kadar, İndiyum Oksit (In_2O_3), Kalay Oksit

(SnO_2), Çinko Oksit (ZnO) ve CdO gibi çok sayıda n tipi TCO materyali ve bunların katkılı oksitleri incelenmiştir (Fereshteh Saniee, 2010; Flemban, 2017).

TCO materyali, iletim bandında nispeten yüksek konsantrasyonda serbest elektron bulunduran geniş bant aralıklı bir yarı iletkendir. Bu elektron yoğunluğu ya malzemedeki kusurlara ya da dışsal katkı maddelerine dayalı olarak, sığ donör seviyesi olarak rol alan safsızlık seviyelerinden kaynaklanmaktadır. Yüksek taşıyıcı konsantrasyonu, spektrumun hem görünür hem de IR bölgelerinde elektromanyetik radyasyonların soğurulmasına neden olur. Yarıiletkende direncin azalması, taşıyıcı konsantrasyonunda veya hareketlilikteki artışı içermektedir. Taşıyıcı konsantrasyonundaki artış, görünür bölgedeki soğurumu arttırırken, hareketteki artış optik özellikler üzerinde olumsuz bir etki meydana getirmez (Ajimsha, 2008).

TCO malzemelere arasında ZnO, görünür bölgede yüksek şeffaflık, yüksek elektriksel iletkenlik, büyük eksiton bağlanma enerjisi, büyük bant aralığı, düşük maliyet ve doğa dostu olması yönü ile dikkat çekici n tipi bir yarıiletkendir(Al-Hardan ve ark., 2014; Sharma ve Periasamy, 2014). ZnO, bu ayırt edici özelliklerinden dolayı, p-n heteroeklem diyot, güneş hücresi, düz panel görüntüleyici, ince film transistör, ışık yayan cihazlar ve gaz sensörleri gibi uygulama alanlarında kullanım için çok ideal bir adaydır. Yüksek deşik konsantrasyonunda ve hareketliliğinde yüksek nitelikte p-tipi ZnO yarıiletken üretimindeki zorluklar nedeniyle, ZnO yarıiletkene dayalı homoeklem cihaz üretimi oldukça güçtür (Jing-Jing ve ark., 2010; Sharma ve ark., 2016). Dolayısıyla, p-Si, p-SiC (Silikon Karpit), p-GaN (Galyum Nitrit) gibi birçok p tipi yarıiletkenler ve n-ZnO yarıileken ile p-n heteroeklem cihazlar üretilebilmektedir(Faraz ve ark., 2020). Bu noktada, p-Si yarıiletken ile üretilen n-ZnO/p-Si heteroeklem cihazı, ZnO ince filmin yüksek eksitonik bağlanma enerjisi, Si alt tabaka ile ZnO malzemelerin düşük maliyetleri, geniş alan üretim, düşük işlem sıcaklığı, basit işlem adımları gibi özelliklerinden dolayı birçok mikro-elektronik uygulama alanları için çok cazip ve avantajlı yapılardır (Zhang ve ark., 2008; Mansour ve Yakuphanoglu, 2012; Bedia ve ark., 2014; Soylu ve Savas, 2015; Chen ve ark., 2017).

ZnO ince film, sol-gel, magnetron sıçratma, sprey piroliz, moleküler ışın epitaksi ve puls laser depozisyon (PLD) gibi birçok teknik ile depozit edilebilmektedir (Soylu ve Savas, 2015). PLD sistemi mekaniksel olarak çok basit ve kullanışlı bir sistem olup, ZnO ince film üretimi için oldukça avantajlı bir kaplama tekniğidir. PLD sisteminin deney öncesi ve sonrasında kolaylıkla ayarlanabilir, laser dalga boyu, laser akısı, hedef-alt tabaka arası uzaklık, arka plan gaz basıncı, alt tabaka sıcaklığı gibi parametreleri ile

pürüzsüz, homojen, epitaksiyel ve düşük alt tabaka sıcaklığında ideal kristal yapıda ZnO ince film üretilebilmektedir (Ajimsha, 2008; Flemban, 2017; Gezgin ve ark., 2017; Gezgin ve Kılıç, 2019).

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, PLD tekniği ile laser puls sayısına bağlı olarak oda sıcaklığındaki p-Si wafer üzerine farklı kalınlıklarda ZnO ince filmler büyütülmüştür. ZnO ince filmlerin morfolojik, kristal ve optik özellikleri, Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), X-Işını Kırınımı (XRD) ve UV-vis (Ultraviyole visible) soğurma spektroskopisi ile analiz edilmiştir. Üretilen Ag/n-ZnO/p-Si/Au ve Ag/n-ZnO/p-Si/Al heteroeklem diyot yapılarının karanlık ve aydınlık ortam J-V karakteristikleri elde edilmiştir. Geleneksel J-V grafiği, Cheung-Cheung metodu, Norde metotları kullanılarak diyotların karanlık ortamdaki ideality faktörleri (n), seri direnci (R_s) ve bariyer yüksekliği (Φ_B) hesaplanmış ve birbirleri ile karşılaştırılmalı olarak yorumları yapılmıştır. 80 MW/cm^2 gücündeki AM (hava kütlesi) güneş radyasyonu altında, diyotların kısa devre akımı (J_{sc}), açık devre voltajı (V_{oc}), doldurma faktörü (FF) ve güç dönüşüm verimi (η) parametreleri hesaplanmış ve diyotların fotovoltaik özellikleri detaylı olarak incelenmiş ve yorumlanmıştır.

1.1. TEZİN ÖNEMİ ve AMACI

Bu yüksek lisans tezinin amacı aşağıda maddeler halinde ifade edilmektedir:

i- PLD tekniği ile 18000, 36000, 54000, 72000 ve 90000 laser puls sayısına bağlı olarak ZnO ince filmler büyütmek ve bu ince filmlerin optik, morfolojik ve kristal yapılarını analiz etmek,

ii- Laser puls sayısının, ZnO ince filmlerin kristal, optik ve morfolojisi üzerindeki etkisini incelemek,

iii- PLD tekniği kullanarak 18000, 36000 ve 54000 laser puls sayısına bağlı olarak büyütülmüş ZnO ince filmler ile Ag/n-ZnO/p-Si/Au heteroeklem diyot yapıları üretmek ve karanlık ortam için geleneksel J-V grafiği, Cheung-Cheung ve Norde metotları kullanarak diyotların elektriksel özelliklerini analiz etmek,

iv- ZnO ince film kalınlığının, karanlık ve aydınlık ortam için Ag/n-ZnO/p-Si/Au heteroeklem diyotların elektriksel ve fotovoltaik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek,

v- PLD tekniği kullanarak 72000 ve 90000 laser puls sayısına bağlı olarak büyütülmüş ZnO ince filmler ile Ag/n-ZnO/p-Si/Al heteroeklem diyotlarını üretmek ve karanlık ortam için geleneksel J-V grafiği ve Norde metodu ile elektriksel özelliklerini analiz etmek,

vi- ZnO ince film kalınlığının Ag/n-ZnO/p-Si/Al heteroeklem diyotların fotovoltaik özellikleri üzerindeki etkisini incelemektir.

Tezin Önemi:

Tez çalışmasının önemi aşağıda maddeler halinde açıklanmaktadır:

i- n-ZnO/p-Si heteroeklemleri üretmek için, ZnO ince filmler PLD ile oda sıcaklığındaki alt tabaka üzerine büyütülmüş olup heteroeklemlerin üretiminde hiçbir ısıl işlem uygulanmamıştır. Düşük alt tabaka sıcaklığında büyütülen ZnO ince filmler kristal yapıya sahiptir ve bu kristalin karakteristik, diyotların doğrultma davranışı ve fotovoltaik özellik sergilemesine sebep olmuştur. Ayrıca, diyot üretiminde ısıl işlemin uygulanmaması, enerji, zaman ve maliyet açısından kazanç sağlamıştır. ZnO malzemesi, doğa dostu ve yeryüzünde bol bulunan elementlerden oluşmaktadır. Bu faktörler, günümüz mikro-elektronik cihazların

üretimi için en çok aranan özellikler olup, tez kapsamında üretilen ZnO/Si heteroeklem cihazlar bu koşulları yerine getirmektedir.

ii- ZnO ince filmlerin kalınlıklarının, Ag/n-ZnO/p-Si/Au ve Ag/n-ZnO/p-Si/Al heteroeklem diyotların (karanlık ortam) elektriksel özellikleri üzerindeki etkisi ortaya konmuştur. Özellikle ZnO ince filmlerin kristal ve morfolojik yapısının, diyotların doğrultma davranışına ve elektriksel parametrelerine olan etkileri incelenerek, düşük ince film kalınlığında zayıf kristal yapıdan dolayı diyotlar zayıf elektriksel özellik gösterirken, film kalınlığı arttırıldığında (kristal yapı gelişerek) diyotların doğrultma davranışlarının geliştirilmiş olduğu ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

iii- n-ZnO/p-Si diyotların elektriksel parametreler, geleneksel J-V grafiği, Cheung-Cheung ve Norde metotları ile hesaplanmış ve bu parametreler birbirleri ile kısmen uyumlu bulunmuştur.

iv- ZnO ince film kalınlığının, n-ZnO/p-Si heteroeklem diyotların fotovoltaik özelliği üzerindeki etkisi incelenmiş olup, diyotların düşük kalınlıkta fakir kristal yapıdan dolayı düşük foto akım ve güç dönüşüm verimi gösterirken, kalınlık artışı ile kristal yapı geliştiği için fotovoltaik özelliğinin geliştiği gösterilmiştir.

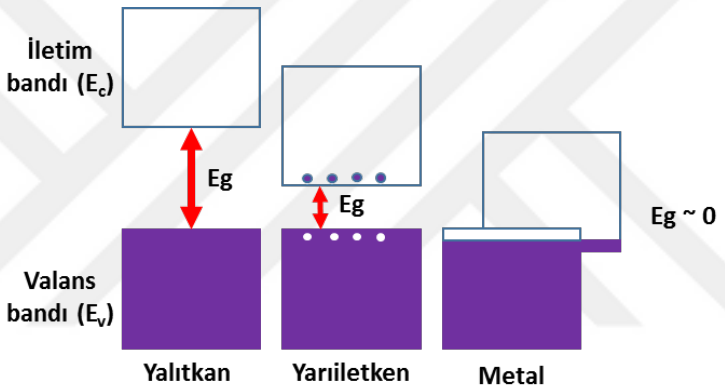
v- Ag/n-ZnO/p-Si/Au heteroeklem diyot, Ag/n-ZnO/p-Si/Al diyotuna kıyasla daha yüksek foto akım ve güç dönüşüm verimi göstermiştir. Böylece, Au arka kontağının, Al kontağına kıyasla daha ohmik davranış sergileyebileceği ve kontak bölgelerinde daha fazla yük toplanabileceği ortaya konmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. p-n Heteroeklem

2.1.1. Yarıiletkenler

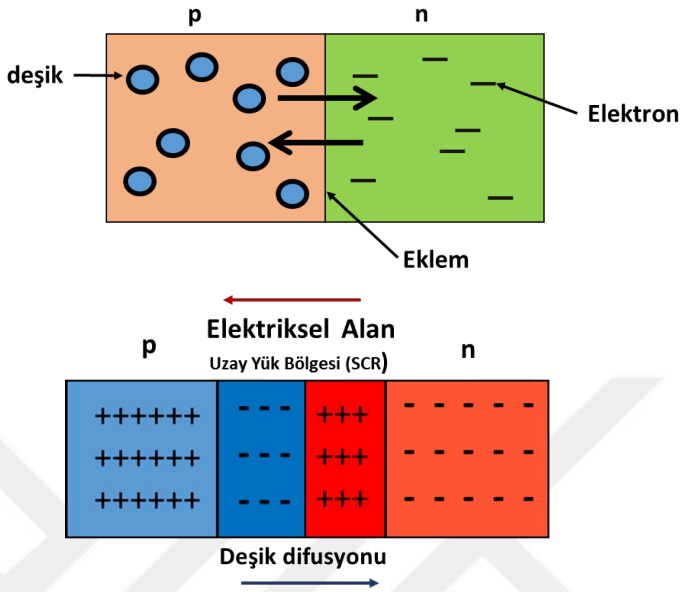
Heteroeklem diyotlar, farklı bant aralığına sahip n ve p tipi yarıiletkenlerin bir araya gelmesi ile oluşmaktadır. Yarı iletkenler, iletkenliği bir metal ile bir yalıtkan arasında bulunan malzemelerdir. Şekil 2.1. de gösterilen bant diyagramına göre, bir yarıiletkenin değerlik bandı ile iletim bandı arasındaki enerji aralığı (Eg) >1 eV'dan büyük olup, yalıtkanlardaki (Eg~10 eV) gibi> 9 eV dan büyük olmamakla birlikte iletkenlerdeki (Eg~0 eV) gibi birbirleri ile örtüşmemektedir.



Şekil 2. 1. Bir yarıiletkenin enerji bant diyagramı

Bir p-n heteroeklem, n tipi yarıiletken ile p tipi yarıiletkenin temas ettiği noktada oluşmaktadır. P-tipi yarıiletken yüksek deşik konsantrasyonuna, n-tipi yarıiletken yüksek elektron konsantrasyonuna sahiptir. P-tipi yarı iletken ve n-tipi bir yarı iletken, yük taşıyıcıların akışına izin verecek şekilde birbirleriyle temas ettirildiğinde bir p-n birleşimi oluşur. Yarıiletkenlerin teması halinde, elektronlar ve deşikler, konsantrasyon gradyanları nedeniyle karşı sınıra doğru difüz ederler ve sırasıyla geride pozitif ve negatif iyonları bırakırlar. Yüklerin bu difüzyonu, difüzyon akımı olarak adlandırılır. Pozitif ve negatif iyonlar, difüzyon akışı son buluncaya kadar elektron ve deşiklerin sürüklenmesine yol açan bir elektrik alanı oluştururlar. Sonunda, p-n bileşimi, yükü nötr olan ancak yerleşik bir elektrik alanına sahip sabit bir durum koşuluna ulaşır. Böylece p-tipi yarıiletkenin n-tipi yarıiletken sınırında negatif yükler birikirken, arka tarafta pozitif yükler toplanır. Şekil 2.2. de görüldüğü gibi, deplasyon bölgesinde oluşan elektriksel alan pozitif yükleri arka kısımda tutucu yönde rol oynar. n-tipi yarıiletkenin

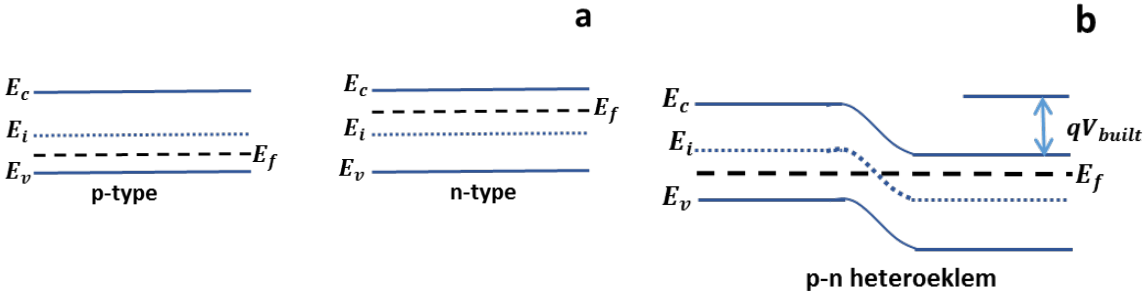
p-tipi yarıiletken sınırında pozitif yükler, arka kısımda ise negatif yükler birikir. Sonuç olarak, diyotun doğrultma davranışını gerçekleştirecek yönde, deplasyon bölgesinde bir diğer adı ile uzay yük bölgesinde (SCR) yük toplanması ve potansiyel kurulumu (V_{built}) sağlanmaktadır (Chawla, 2011; Li, 2016).

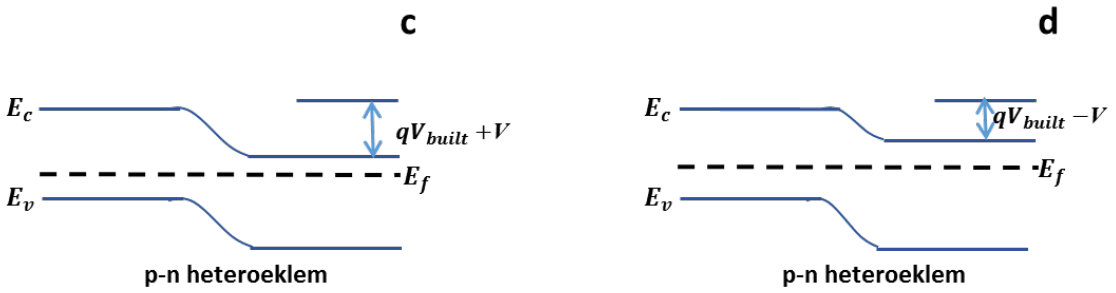


Şekil 2.2. p-n eklemin şematik oluşum görüntüsü

2.1.2. p-n Heteroeklemin Enerji Bant Diyagramı

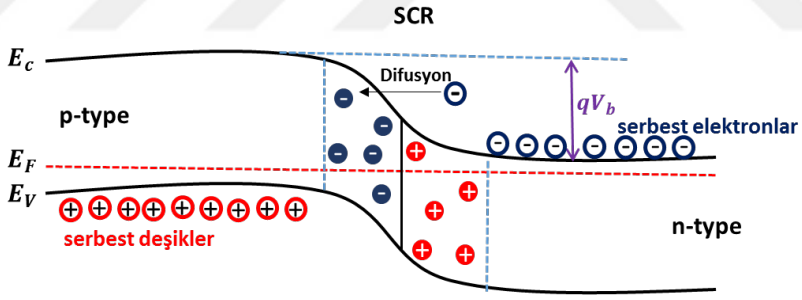
p-n heteroeklemi oluşturan p-tipi yarıiletkenin Fermi seviyesi valans bandına yakınken, n-tipi yarıiletkenlerde iletim bandının altında yer almaktadır (Şekil 2.3a). İki yarıiletken birbirlerine temas edip kendi aralarında yük geçişi sonunda fermi seviyeleri aynı konumda kararlı hale gelir. Bu, p-n eklemine karşılık olarak bandın bükülmesine neden olur (Şekil 2.3). Fermi seviyesi, p tipi yarıiletkenin valans bandına ve n-tipi yarıiletkenin iletim bandına yakın olarak konumlanmaktadır. P-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerin iletim bantları arasındaki fark kadar potansiyel kurulum (V_{built}) oluşur (Şekil 2.3b).





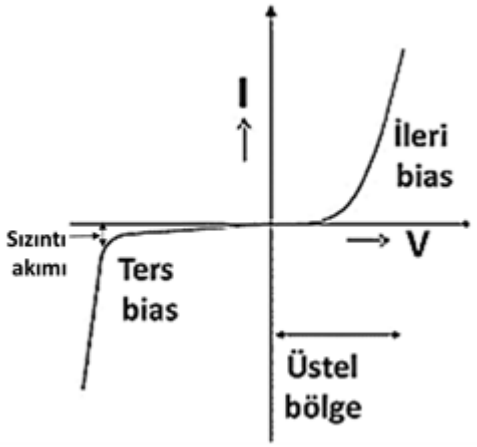
Şekil 2.3. a) p tipi ve n tipi, b) p-n heteroeklemin enerji bandları ile c) heteroekleme +V ve –V uygulanması durumunda enerji band aralığının değişimi

p-n heteroekleme –V voltaj uygulandığında (ters bias), deplasyon bölgesi genişler, iki yarı iletken arasındaki potansiyel fark artar (V_{built} +V) (Şekil 2.3c) ve her iki yönlü yük geçişi engellenir. Heteroekleme +V voltaj (ileri bias) uygulandığı takdirde, deplasyon bölgesi daralır, deplasyon bölgesindeki potansiyel, uygulanan V voltaj kadar azalarak (V_{built}-V) (Şekil 2.3d) n tipi yarıiletkenden p tipi yarıiletkene elektron geçişi gerçekleşir (difüzyon akımı) (Şekil 2.4) ve ileri akım meydana gelir. Uygulanan Voltaj arttıkça, ileri akımda da giderek artış gerçekleşir. Böylece, diyot bir doğrultma davranışı sergileme eğilimine girer (Altamura, 2014).



Şekil 2. 4.p-n heteroeklemin band diagramı

Şekil 2.5 de, heteroeklem diyota (-V, +V) voltaj uygulanması durumunda elde edilen I-V karakteristiği gösterilmektedir. –V uygulanan ters bias bölgesinde, akımı geçişi minimum değerde iken, +V nin uygulanması durumunda deplasyon bölgesindeki yerleşik potansiyel azalacağı için ileri bias bölgesinde ileri yönlü bir akım artışı oluşmaktadır. Ters bias bölgesinde eğri ile voltaj ekseni arasındaki minimum aralık sızıntı akımına karşılık gelmektedir ve bu akım bozuk ara yüzey durumlarından kaynaklı istenmeyen yük geçişlerine dayandırılır. İleri bias bölgesinde ise, uygulanan voltaj arttıkça akım katlanarak artmakta ve doğrultma oranı yükselmektedir.



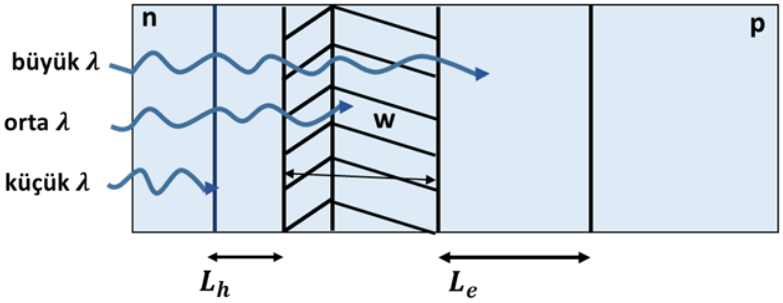
Şekil 2 .5. Heteroeklem diyotun I-V karakteristiği

2.1.3. p-n Heteroeklemin Fotovoltaik Özelliği

p-n heteroeklem cihaz üzerine ışığın düşmesi durumunda, ışık n tipi yarıiletken üzerinden soğurulmadan geçerek p tipi yarıiletken içerisine giriş yapar. Gelen ışık, p tipi yarıiletken bölgesinin tükenme bölgesi içinde soğrulur ve bu bölgelerde elektron-deşik çiftleri oluşturulur. Elektrik alanının varlığı nedeniyle, foto uyarımlı elektron-deşik çiftleri birbirlerinden hemen ayrılırlar. Elektronlar nötr n bölgesinde hareket ederek negatif yük fazlalığı oluştururken ve deşikler nötr p bölgesine hareket ederek pozitif yükü arttırırlar. Bu, cihazın terminallerine bir açık devre voltajı oluşturur. Böylece, p bölgesi n bölgesine göre pozitif yüklüdür.

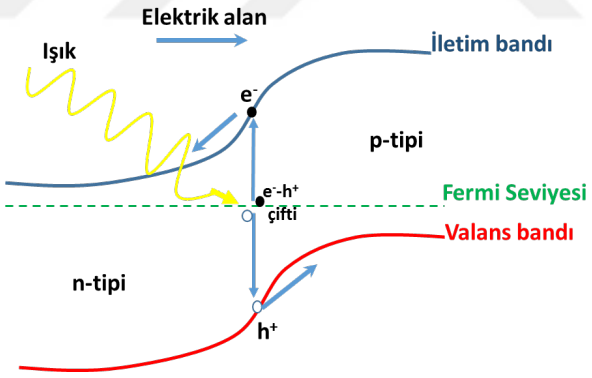
Büyük dalga boylarına sahip fotonlar n tipi yarıiletken içerisinden geçerek p bölgesine ulaşırlar. Soğurucu yarıiletken içerisinden foto uyarım yolu ile üretilen her bir eksiton çiftin elektronu ortalama rekombinasyon süresine sahiptir ve yarıiletken içerisinde difüzyon uzunluğu (L_e) üzerinden yayılır. Böylece, ortalamanın altındaki bir mesafede bulunan elektronlar nispeten daha kolay yayılırlar ve elektrik alanının etkisi altında **n** bölgesine aktarılırlar. Sonuç olarak, sadece difüzyon uzunluğundan daha az bir mesafedeki taşıyıcılar akım sağlar ve fotovoltaik etki oluşumuna katkı sağlarlar. Bu işlemle, alanın etkisi altında n bölgesine hareket eden elektron bu bölgeye ek bir negatif yük ekler. Buna uygun olarak, p bölgesinde kalan delik buraya pozitif bir yük ekler. Tükenme bölgesinin difüzyon uzunluğundan (L_e) daha büyük bir mesafede bulunan çiftler rekombinasyon nedeniyle kaybedilir. Aynı durum, kısa dalgaboylu fotonlar için **n** bölgesin içinde geçerlidir. Böylece, tükenme bölgesinden difüzyon uzunluğundan (L_h) daha az bir mesafede buluna deşikler aynı şekilde ***p*** bölgesine hareket eder. Bu nedenle, fotovoltaik etkiye katkıda bulunan elektron deliği çiftlerinin uyarılmasının L_h+W+L_e

genişlikli bir bölgede meydana geldiği söylenebilir. Bu işlem Şekil 2.6 da gösterilmektedir (Corpus Mendoza, 2017).



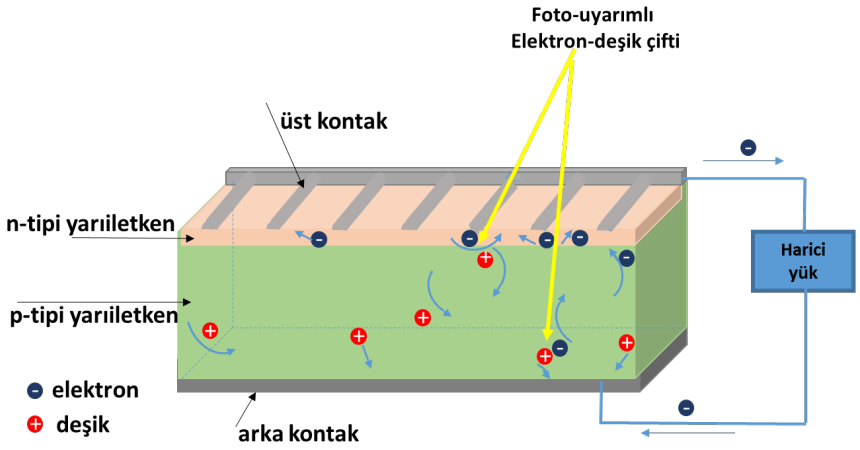
Şekil 2. 6.Işık altında, p-n heteroeklem içerisinde foton soğurulması

p-n heteroeklemin üzerine ışık geldiğinde p tipi yarıiletkenin valans bandındaki elektronlar uyarılarak iletim bandına geçiş yaparlar ve geride deşik bırakırlar ve p tipi yarıiletkenin içerisinde deşik yüklerin sayısını arttırırlar. P tipi yarıiletkenin iletim bandındaki elektronlar n tipi yarıiletkenin iletim bandına geçiş yaparak n tipi yarıiletken içerisindeki elektron sayısında artış sağlanır (Şekil 2.7). Böylece, p-n heteroekelem içerisinde foto uyarımdan kaynaklı bir yük akışı yani foto akım oluşur.



Şekil 2. 7.Işık altında p-n heteroeklemin band diagramı

p-n heteroeklem bir ışık tarafından aydınlatıldığında, yarı iletkenin enerji bant aralığına eşit veya daha fazla enerjiye sahip olan fotonlar, bağlı elektronlar tarafından soğurulurlar ve iç elektriksel alan nedeniyle hemen ayrılan bir elektron-deşik çiftinin oluşumuna neden olurlar. Cihazın terminallerine kısa devre uygulandığında, n bölgesinin ekstra elektronları, p bölgesindeki ek deşiklere karşı koymak için Şekil 2.8 de gösterildiği gibi harici devreden geçerler. Bu uyarılmış taşıyıcı akışından kaynaklanan akıma, foto-akım I_L denir (burada L, ışık anlamına gelir).



Şekil 2. 8.p-n heteroeklemde foto uyarımlı yük taşıyıcıların hareketi

Aydınlatma altındaki ideal bir p-n eklemde, kısa devre akımı (I_{sc}) üretilen foto akıma eşittir, çünkü yük direnci *R* sıfırdır, bu da voltajın sıfır olmasına neden olur. Devreye bir yük direnci bağlanırsa, foto-akım p–n eklemin ileri biasında bir V voltajının oluşturulmasına neden olur (Corpus Mendoza, 2017).

2.1.4. p-n Heteroeklemin I-V Karakteristiği

Bir heteroeklemin ileri bias voltajından dolayı, foto akıma karşı bir ileri bias akım (I_F) oluşmaktadır. I_F akımı aşağıdaki denklem (2.1) ile ifade edilmektedir.

$$I_F = I_o\left(e^{eV/nkT} - 1\right) \tag{2.1}$$

Burada I_o ters doyum akımı, n idealite faktörüdür ve ideal bir diyot için 1 ile 2 arasında değer alır. Ortaya çıkan net p-n eklem akımı I,

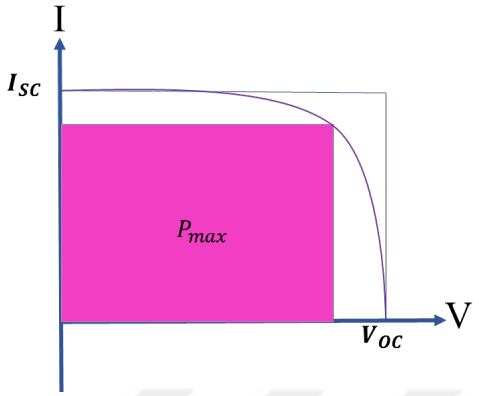
$$I = I_L - I_F = I_{sc} - I_o\left(e^{eV/nkT} - 1\right) \tag{2.2}$$

Denklem (2.2) ile ifade edilir. Bir p-n heteroeklem cihaz üzerindeki akımın sıfır olduğu yerde sahip olduğu voltaj açık devre voltajı (V_{oc}) olarak ifade edilir. V_{oc},

$$V_{oc} = V_t ln\left(I + \frac{I_L}{I_o}\right) \tag{2.3}$$

Denklem (2.3) olarak tanımlanır. Burada V_t termal voltajdır.

Işık altındaki bir heteroeklemin çıkış akımı ve çıkış gerilimi arasındaki grafiğe I-V eğrisi denilmektedir ve mevcut ışınlama ve sıcaklık koşullarında enerji dönüşüm kapasitesini açıklar. Tipik bir güneş pilinin temsili I-V eğrisi Şekil 2.9'da gösterilmektedir.



Şekil 2 9. Maksimum güç karesini gösteren p-n heteroeklem için I-V eğrisi

I-V eğrisinin aralığı, voltajın sıfır olduğu olası maksimum akımdan sıfır akıma ve akımın sıfır olduğu olası maksimum voltajdan sıfır voltaja kadar değişir. Yani aralık, sıfır volttaki I_{sc} değerinden sıfır akımdaki V_{oc} değeri kadardır. Bir p-n heteroeklem tarafından üretilen çıkış gücü,

$$P = V.I \tag{2.4}$$

Denklem (2.4) ile verilir.

Maksimum çıkış gücü noktası P_M, maksimum akım I_M ve maksimum voltaj V_M' a karşılık gelen noktalarından kaynaklanır ve dikdörtgenin alanına eşittir. Doldurma faktörü FF, p-n heteroeklemin PV özelliğinin ideal dikdörtgen şekle ne kadar yakın olduğunun bir göstergesidir. I-V eğrisi bu şekle yakın olup, dolgu faktörünün değeri 1'e yakındır. Ancak p–n eklemin özellikleri bunu imkânsız kılmaktadır; doldurma faktörü için normal değer, cihazın malzemesine ve yapısına bağlı olarak 0.70 ile 0.85 arasında değişir. Doldurma faktörü, maksimum çıkış gücünün, açık devre voltajı ile kısa devre akımının çarpımına oranıdır ve denklem (2.5) ile ifade edilir.

$$FF = \frac{I_{max}.V_{max}}{I_{sc}.V_{oc}} \tag{2.5}$$

Bir PV hücresinin davranışını ve çalışmasını değerlendirmek için en temel parametreler, doldurma faktörü, kısa devre akımı ve açık devre voltajıdır. Bu

parametreler, hücrenin verimini belirlemektedir. Bir heteroeklemin ışık altında gösterdiği verim hücrenin maksimum gücünün giriş gücüne oranıdır:

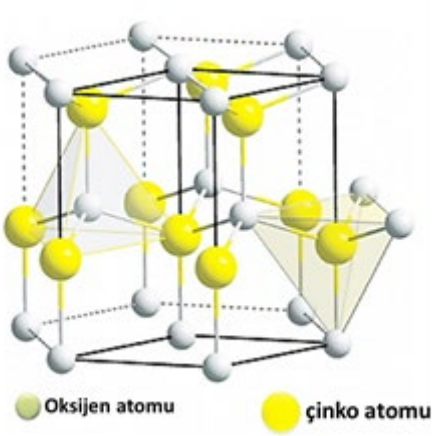
$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \tag{2.6}$$

Burada P_{in} giriş gücü, gelen ışığın gücü ile hücrenin aktif alanının çarpımıdır. Bir heteroeklemin verimliliği, gelen ışığın gücü ve spektrumundaki değişikliklere duyarlıdır. Ek olarak, hücrenin aktif alanı ile ters orantılı olarak verimde değişiklik gözlemlenmektedir (Altamura, 2014; Ingebrigtsen, 2014).

2.2. ZnO Yariletken

Yüksek güç ve yüksek sıcaklıkta çalışan optoelektronik cihazlara olan talebin artmasıyla birlikte, geniş bant aralıklı yarı iletken malzemeler son yıllarda araştırmacılardan ve endüstriden büyük ilgi görmüştür. Bu malzemeler, UV/görünür bölgede ışık emisyonu/soğurulumu, geniş aralıkta foton iletimi, büyük bir piezoelektrik etki, yüksek arıza voltajları ve düşük elektronik gürültü gibi ek avantajlara sahiptir. ZnO, doping veya alaşım ile 3-4 eV arasında ayarlanabilen geniş bant aralığına sahip bir bileşik yarı iletkendir. II-VI gruba ait olan, ZnO malzemesi, düşük işlem maliyeti, doğada bol bulunan toksik olmayan elementlerden oluşması, radyasyona karşı dayanıklılığı, düşük maliyet, yüksek mekanik ve termal kararlılık bakımından ideal özelliklere sahiptir. ZnO'nun nispeten küçük kırılma endeksi, oda sıcaklığında kT'den çok daha büyük eksiton bağlanma enerjisine (60 meV) sebep olur, ve bu durum verimli lüminesans ve fotovoltaik özelliklerinin oluşmasına yol açar (Fereshteh Saniee, 2010; Hussain, 2017).

ZnO; NaCl rocksalt, çinko blende ve wurtzite gibi farklı kristal yapılarına sahiptir. Çinko atomu, bir tetrahedron yapının köşelerinde bulunan dört oksijen atomuyla çevrilidir ve bunun tersi de geçerlidir. ZnO kristalinde, Zn_2 + ve O_2 düzlemleri dönüşümlü olarak c ekseni ([0001] yönü) boyunca oluşturulur. Çinko-blende ZnO yapısı sadece kübik alttabakalar üzerinde büyümeyle stabilize edilirken, rocksalt yapısı nispeten yüksek basınçlarda elde edilebilir. Wurtzite kristal yapısı, ZnO ince filmlerinde ve nano yapılarında en sık gözlenen fazı temsil etmektedir. ZnO wurtzite kristal yapısının şematik bir resmi Şekil 2.10 da gösterilmektedir (Flemban, 2017).



Şekil 2. 10. ZnO kristal yapısı (wurtzite yapı)

Tetrahedral düzene sahip wurtzite yapısı, a=3.25 Å ve c=5.21 Å kafes parametreleriyle ZnO'nun en kararlı şeklidir. Bu, karmaşık optik ve elektronik cihazlar için kullanışlı hetero-yapıların üretilmesine olanak sağlamaktadır. ZnO wurtzite yapısının c/a oranı 1.603 olup, oldukça kararlı yapılar için ideal orana (1.633) çok yakındır.

ZnO yarıiletken, yüksek elektriksel iletkenliğe, yüksek elektron konsantrasyonuna ve hareketliliğine sahiptir. Görünür bölgede yüksek foton iletimine, UV ve kızılötesi bölgesinde foton soğurma sahip olup ~3.3 eV'luk geniş bir bant aralığında bir yarıiletkendir. Yüksek elektron konsantrasyonuna sahip olması, özellikle kızılötesi bölgesinde foton soğurma özelliği göstermesine sebep olmaktadır. Görünür bölgede yüksek oranda foton iletimi ve geniş bant aralığı ile p-n heteroeklem cihazların fotovoltaik uygulamaları için çok avantajlı bir n-tipi yarıiletkendir.

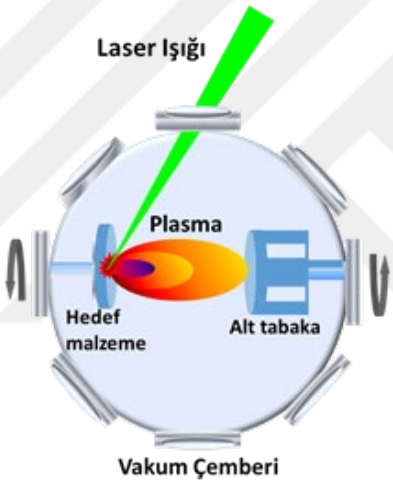
2.3. ZnO İnce Filmin Puls Laser Deposizasyon Sistemi ile Üretimi

ZnO ince film, sol-gel, magnetron sıçratma, spray piroliz, moleküler ışın epitaksi ve puls lazer depozisyon gibi ince film kaplama teknikleri ile üretilebilmektedir(Soylu ve Savas, 2015). Bu teknikler arasında, PLD tekniği ZnO ince filmin üretiminde oldukça avantajlı olup bu tez çalışmasında n-ZnO/p-Si heteroeklem diyot yapısının üretmek için p-Si waferın üzerine ZnO ince filminin büyütülmesinde kullanılmıştır.

2.3.1. Puls Laser Depozisyon Tekniği

PLD tekniği, orta vakum veya ultra yüksek vakum koşullarında hedef materyalin alttabakaya stokiyometrik aktarımı ile yüksek saflıkta epitaksiyel ince film üretimi gerçekleştiren basit ve uygun maliyetli bir fiziksel buhar biriktirme tekniğidir. Mekaniksel olarak, içerisine hedef ve alt tabaka tutucularının yerleştirildiği vakum çemberi ile dışarıya konumlandırılmış laser sisteminden oluşmakta olup oldukça basit bir kuruluma sahiptir. PLD, özellikle çok bileşenli malzemelerin saf fazda büyümesi için tercih edilen bir biriktirme yöntemidir.

PLD tekniği, Nd:YAG laser (355 nm ya da 266 nm dalgaboylu), KrF excimer (248 nm dalgaboylu), ArF excimer laser (193 nm) gibi UV nanosaniye (ns) pulslu laser kaynağı içermektedir (Ajimsha, 2008).

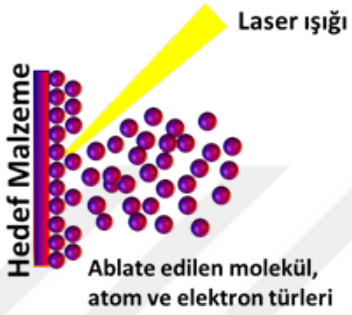


Şekil 2. 11.PLD çemberinin şematik görüntüsü

PLD sisteminde vakum çemberinin içerisine hedef ve alt tabaka tutucuları yerleştirilmiş olup hedef malzemenin laser demetinden zarar görmemesi ve ince filmin homojen ve pürüzsüz kaplanması için bu tutucular belirli devirlerde döndürülmektedir (Şekil 2.11). Alt tabaka sıcaklığı RT ile 1000^{o}C arasında ayarlanabilmektedir. Depozisyon sırasında temiz ortamın oluşması ve ince film içerisinde kirlilikten kaynaklı kusurların oluşmaması için vakum çemberi ultra basınca kadar boşaltılmaktadır. ZnO, SnO_2, CdO gibi şeffaf iletken oksit yarıiletken üretmek için, vakum çemberi içerisine oksijen gaz girişi yapılabilmektedir. Laser kaynağından çıkan pulslu laser demeti ayna ve lensler yardımı ile hedef malzemenin üzerine odaklandırılır. Laser demeti ile hedef malzemenin iyonları, elektronları, nötral atomları ~5000K sıcaklıkta ablate edilirler ve

plasma bulutu ile alt tabaka üzerine depozit edilir. PLD ile ince film oluşum süreci dört aşamada incelenir:

1- Laser radyasyonu ile hedef etkileşimi
2- Ablate edilmiş malzemelerin dinamikleri
3- Ablate edilmiş malzemelerin alt tabaka üzerine ablasyonu
4- Alt tabaka üzerinde çekirdeklenme ve ince filmin büyümesi

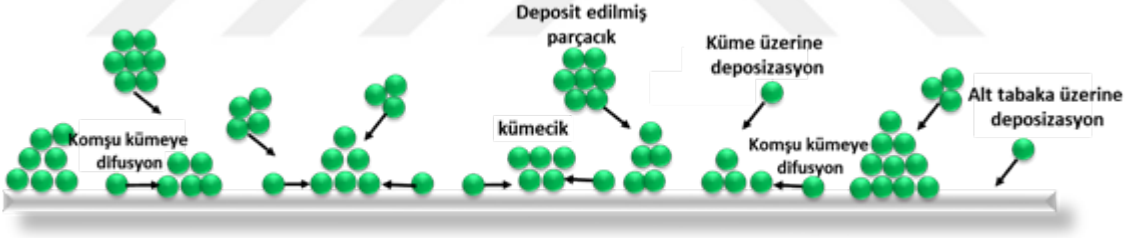


Şekil 2. 12. Laser -hedef etkileşimi ve malzeme ablasyonu

PLD' deki her aşama kaliteli epitaksiyal, kristalin, stokiyometrik ve düzgün ince film oluşumu için kritik öneme sahiptir.

İlk aşamada, lazer ışını hedefin yüzeyine odaklanır. Yeterince yüksek akı yoğunluklarında ve kısa puls süresinde, hedefteki tüm elementler hızla buharlaşma sıcaklıklarına kadar ısıtılır. Malzemeler hedef yüzeyden ayrılır ve hedef bileşenin stokiyometrik transferi gerçekleştirilir. Anlık ablasyon oranı, büyük ölçüde hedef üzerine düşen laserin akısına (J/cm^2 değerinde) bağlıdır. Ablasyon mekanizmaları, çarpışma, termal ve elektronik uyarma, pul pul dökülme ve hidrodinamik gibi birçok karmaşık fiziksel fenomeni içerir. İkinci aşamada, yayılan malzemeler gaz dinamiği yasalarına göre alt tabakaya doğru hareket etme eğilimindedir. Yüksek kinetik enerjiye sahip ablate edilmiş atomlar (Şekil 2.12) birbirleri ya da çevredeki gaz atomları ile çarpışma yaparak enerjilerinde azalma ve kendi aralarında reaksiyon meydana gelir. Bu durum büyüyecek ince filmin niteliğinin, daha plazma içerisinde belirlendiği anlamını taşımaktadır. Üçüncü aşama, ince filmin kalitesini belirlemek için önemlidir. Hedef malzemeden çıkartılan yüksek enerjili türler, alt tabaka yüzeyine çarpar ve alt tabakada çeşitli tipte hasarlara neden olabilir. Bu enerjik türler bazı yüzey atomlarını püskürtür ve gelen atomlar ile püskürtülen atomlar arasında bir çarpışma bölgesi oluşur. Film, termal bir bölge oluştuktan sonra büyür. Bölge, parçacıkların yoğunlaşması için bir kaynak

görevi görür. Yoğunlama oranı, püskürtmeyle çıkan partikül oranından daha yüksek olduğunda, termal denge durumuna hızlı bir şekilde ulaşılabilir ve alt tabaka yüzeyinde film büyür. Adatomların enerjisini arttırmanın etkisi, alt tabaka sıcaklığının artması ile film büyümesi üzerinde benzer bir etkiye sahiptir. PLD için tipik güç yoğunluğu, makul büyüme oranı (>1Å/atış) için yaklaşık 50 $MWcm^{-2}$ dir. Plazma başlangıçta vakumda veya havada lazer hedef etkileşimi sırasında oluşur ve daha sonra açık bir laser - plazma etkileşimi meydana gelir. Plazma içerisinde iyonlar, 100-1000 eV enerjiye kadar hızlanmaktadır. Kristal filmlerin çekirdeklenmesi ve büyümesi; yoğunlaşmış malzemenin, yoğunluğunun, enerjisinin, iyonlaşma derecesinin yanı sıra alttabakanın sıcaklığı ve fizikokimyasal özellikleri gibi birçok faktöre bağlıdır. Çekirdeklenme sürecinde, çekirdeğin kritik boyutu, birikme hızı ve alt tabaka sıcaklığına gibi itici kuvvete bağlıdır. Küçük süper doygunluğun bir özelliği olan büyük çekirdeklenmede, alt tabaka üzerinde filmin izole edilmiş adaları oluşur ve bunlar daha sonra birlikte büyür ve birleşirler. Süper doygunluk artarken, kritik çekirdek, yüksekliği atomik çapa ulaşana ve şekli iki boyutlu bir katman olana kadar küçülür. Büyük aşırı doygunluk için, tam olarak kaplanmamış yabancı alt tabakalar için tabaka-tabaka çekirdeklenme meydana gelecektir (Ajimsha, 2008; Fereshteh Saniee, 2010; Flemban, 2017).



Şekil 2. 13. Alt tabaka üzerine deposit edilmiş parçacıkların ince film olarak büyüme süreci

Kristalin film büyümesi, adatomun (buhar atomları) yüzey hareketliliğine bağlıdır. Normal olarak, adatom; yeni oluşturulmuş film içinde sabit bir konuma yapışmadan önce birkaç atomik mesafe boyunca difüz eder (Şekil 2.13). Alt tabakanın yüzey sıcaklığı, adatomun yüzey difüzyon yeteneğini belirler. Yüksek sıcaklığı, hızlı ve kusursuz kristal büyümeye olanak sağlarken, düşük sıcaklık veya büyük aşırı doygunluk kristal büyümesi; enerjik parçacıkların çarpmasıyla boğulmuş olabilir, bu da düzensiz veya hatta amorf yapılara neden olabilir.

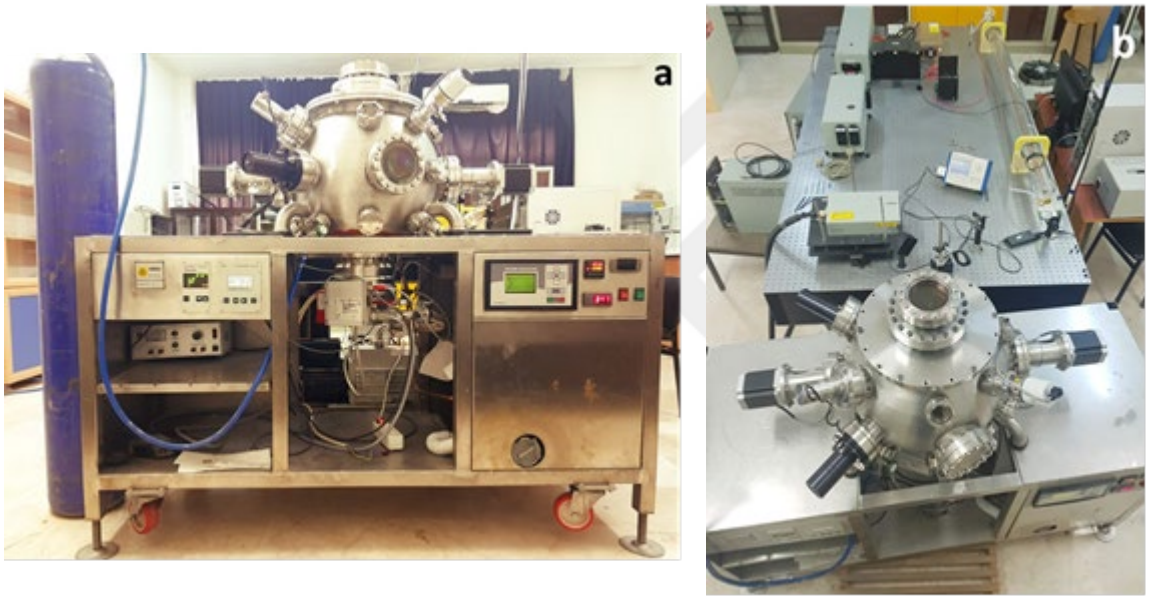
PLD işleminde, kısa laser puls süresi (~10ns) ve böylece küçük zamansal yayılımdan dolayı, depoz,syon oranı (~10 nm/s) muazzam olabilmektedir. Sonuç olarak, katman katman çekirdeklenme meydana gelir ve ultra ince, pürüzsüz bir film

üretilebilir. Ek olarak, enerjik ablasyon türlerinin hızlı depozisyonu, alt tabak yüzey sıcaklığının yükseltilmesine yardımcı olur. Böylece, PLD tekniği ile düşük alt tabaka sıcaklığında kristalin ince filmler kolaylıkla büyüyebilmektedir (Ajimsha, 2008).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Pulse Laser Depozisyon Sistemi

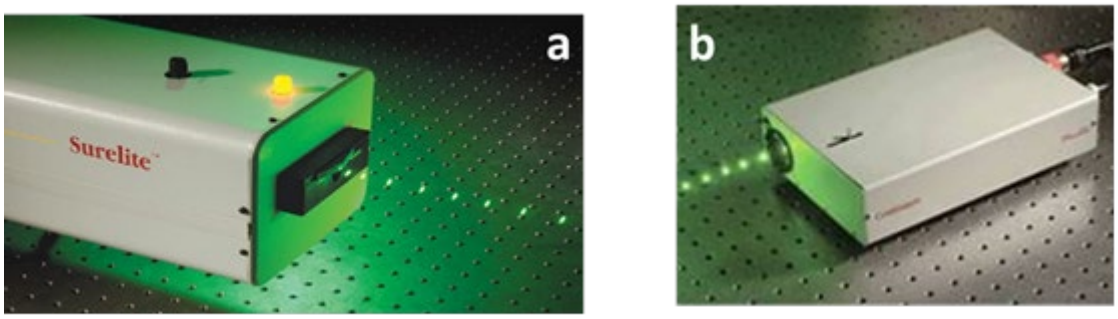
Bu tez çalışmasında n-ZnO/p-Si heteroeklem diyot yapıları şekilde gösterilen PLD tekniği ile üretilmiştir. PLD sistemi, Prof. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ hocamız tarafından KONYA Sanayisinde yaptırılmış vakum çemberi ile optik masa üzerine konumlandırılmış nanosaniye (ns) minilite ve surelite Nd:YAG laser sistemlerinden oluşmaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3. 1. Laboratuvarımızda mevcut bulunan PLD sisteminin a) ön ve b) yukarıdan görüntüsü

Vakum çemberi içerisine yerleştirilmiş hedef tutucuya metal, yarıiletken, yalıtkan gibi sputtering targetlar; alt tabaka tutucuya ise Soda Lime Cam (SLG), Si wafer gibi numuneler yerleştirilmektedir. Hedef ve alt tabaka tutucuları, hedef malzemenin yüksek enerjideki laser demetinden zarar görmemesi ve ince filmin homojen ve pürüzsüz kaplanması için 970 ve 960 rpm hızlarında döndürülmektedir. Hedef-alt tabaka arası uzaklık 2,5-10 cm arasında değiştirilebilmektedir. Vakum çemberi rotary pompa ile ilk aşamada 4.8×10^{-4} mbar'a daha sonra turbo pompa ile ~5.2×10^{-7} mbar'a kadar boşaltılmaktadır. Deney sürecinde alt tabaka sıcaklığı *Optris 3MH1-CF3* model infrared termometre cihazı ile sürekli olarak ölçülmektedir. Vakum çemberinin gaz girişinden oksijen, nitrojen ve argon gazlarının vakum çemberi içerisine

girişi gerçekleştirilir. Vakum çemberi, ihtiyaç duyulması durumunda farklı bir mekâna taşınması amacı ile portatif bir masa üzerine yerleştirilmiştir.



Şekil 3. 2. a) ns- Continuum Surelite III ve b) Minilite Nd:YAG laserler

Tablo 3. 1. ns- Continuum-Surelite III Nd:YAG lazerin çalışma parametreleri

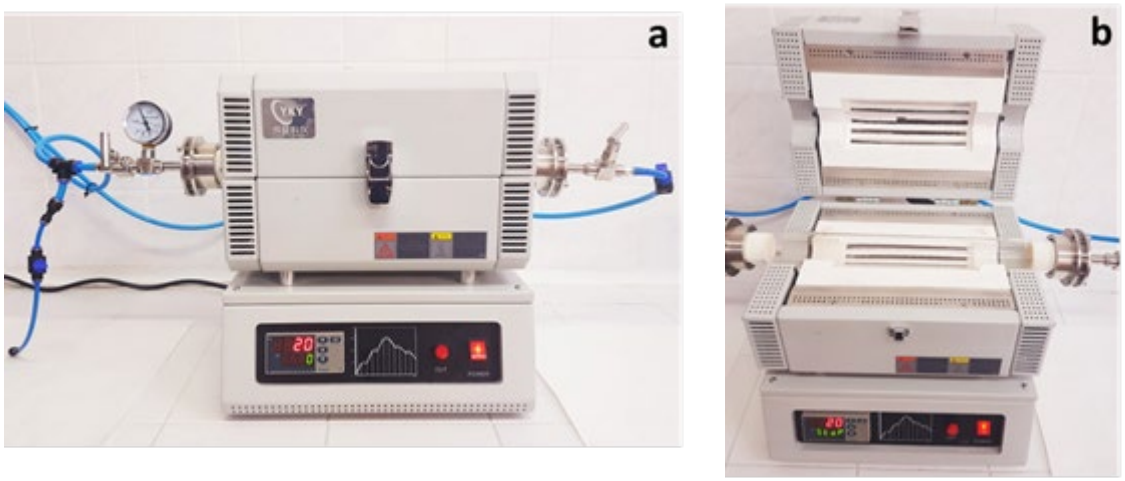
Dalgaboyu	Tekrarlama Oranı	Puls genişliği	Güç (Max.)
1064 nm (1.Harmonik)	10 Hz	5 ns	850 mJ
532 nm (2.Harmonik)	10 Hz	5 ns	≈ 500 mJ
355 nm (3. Harmonik)	10 Hz	5 ns	≈ 300 mJ

Tablo 3. 2. ns- Minilite Nd:YAG lazerin çalışma parametreleri

Dalgaboyu	Tekrarlama Oranı	Puls genişliği	Güç (Max.)
1064 nm (1.Harmonik)	1-15 Hz değiştirilebilir	5 ns	50 mJ
532 nm (2.Harmonik)	1-15 Hz değiştirilebilir	5 ns	20 mJ
355 nm (3. Harmonik)	1-15 Hz değiştirilebilir	5 ns	10 mJ
266 nm (4. Harmonik)	1-15 Hz değiştirilebilir	5 ns	4 mJ

Laboratuvarımızdaki PLD sistemi, Şekil 3.2 de gösterilen ns-Nd:YAG Surelite ve minilite laser sistemlerine sahip olup, mevcut deneyler minilite laserin kullanımı ile gerçekleştirilmektedir. Laserlerin çalışma parametreleri Tablo 3.1 ve 3.2 de verilmektedir.

ZnO ince filmin tavlanması için Şekil 3.3. de gösterilen kuartz tüp fırın kullanılmıştır. Kuartz tüp fırının sıcaklığı, <=10^{o}C/dk'lık ısınma oranı ile maksimum 1100^{o}C ye yükselmekte ve <0.2 bar'lık düşük basınçlarda tavlama işlemi gerçekleştirebilmektedir. Kuartz tüp içerişine, 200 ml/dk. sınırındaki akış hızı ile gaz girişi yapılabilmektedir.



Şekil 3. 3. ZnO ince filmin tavlanmasında kullanılan ve laboratuvarımızda mevcut kuartz tüp fırının a) dış ve b) iç görüntüsü



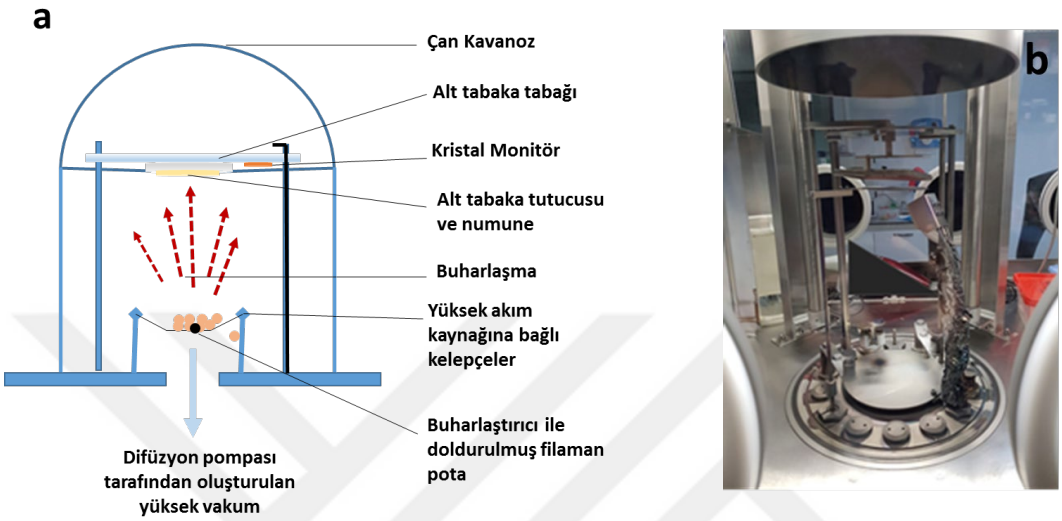
Şekil 3. 4. İnce film ve diyotların saklandığı vakum odası

PLD tekniği ile üretilen ZnO ince filmlerin ve Ag/n-ZnO/p-Si/Au ve Ag/n-ZnO/p-Si/Al heteroeklem diyotların havadaki nem, toz ve kirlilikten etkilenmemeleri için Şekil 3.4 de gösterilen Vakum odası içerisinde saklanmıştır. Vakum odası, maksimum 1×10^{-4} torr basınca kadar boşaltılabilmektedir ve 0.15 Mp lık maksimum pozitif basınca sahiptir. Ayrıca, ihtiyaç duyulduğu takdirde, vakum odası içerisine gaz girişi yapılabilmektedir.

3.2. Fiziksel Buharlaştırma Depozisyon (PVD) Tekniği

PVD tekniği, vakum çemberi içerisine yerleştirilmiş numune pota ile alt tabakadan oluşmaktadır. Numune potasına kaplanılması istenen Ag, Al gibi metal malzemeler, alt tabakaya ise kaplanacak SLG, Si wafer malzemeleri yerleştirilmektedir. Numune potası sıcaklığa dayanıklı, Tungsten (W) ve Molibden (Mo) gibi metallerden

üretilmektedir. Deney öncesinde vakum çemberi ~1×10^{-6} mbar basınca kadar boşaltılabilmektedir. Deney sürecinde elektrik rezistansı ısıtılarak, numune potasına akım uygulanır ve pota içerisindeki malzemenin buharlaştırılması ile alt tabaka üzerine geçişi gerçekleşir ve alt tabaka üzerinde yoğunlaşarak ince film halinde kaplanması sağlanır (Savale, 2016).



Şekil 3. 5. a) PVD sisteminin şematik görüntüsü ve b) Laboratuvardaki fotoğrafı

Bu yüksek lisans tez çalışmasında üretilen Ag/ZnO/Si/Al heteroeklem diyot yapılarındaki, Ag ve Al metal kontaklar şekil 3.5b de gösterilen PVD tekniği (Selçuk Üniversitesi Ar-Ge bünyesinde) ile ~60 nm kalınlığında kaplanmışlardır.

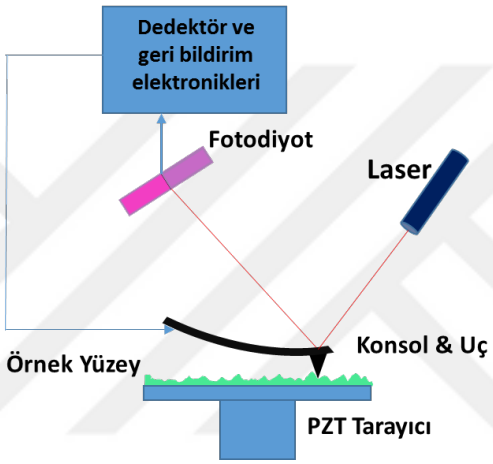
3.3. İnce Filmlerin Analiz Teknikleri

n-ZnO/p-Si heteroeklemleri üretmek için, büyütülen ZnO ince filmlerin morfolojik, kristal ve optik özellikleri AFM, XRD, UV-vis spektroskopi ile analiz edilmiş ve ince filmlerin kalınlıkları ile profilometre cihazı ile ölçülmüştür.

3.3.1. Atomik Kuvvet Mikroskopi (AFM)

AFM, optik kırınım sınırından 1000 kat daha iyi olan ve nanometre kesitinde çok yüksek çözünürlüğe sahip olan tarayıcı prob mikroskop türüdür. İncelenecek yüzeyden alınacak bilgi, mekanik bir probla yardımı ile hissedilerek toplanır yüzey görünüşü hakkında görüntü elde edilir. AFM'nin blok diyagramını Şekil 3.6 da

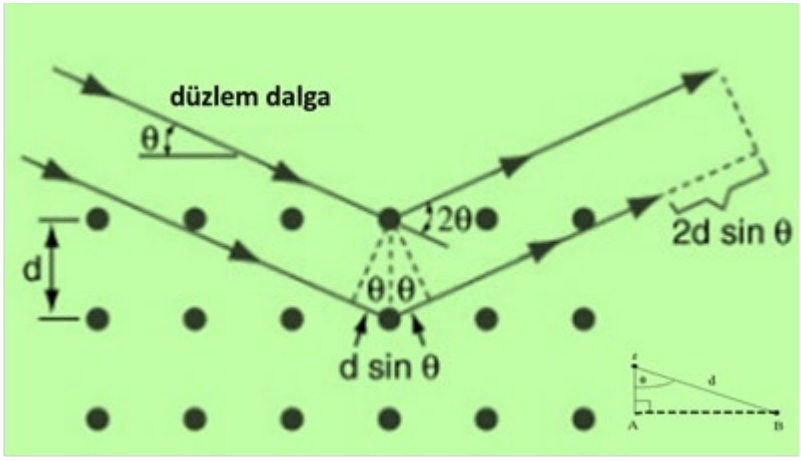
göstermektedir. AFM, ucunda keskin bir uç (prob) bulunan ve örnek yüzeyini taramak için kullanılan mikro ölçekli bir konsoldan oluşur. Konsol tipik olarak silikon veya silikon nitrürden yapılır. Ölçüm sırasında, ince bir seramik veya yarı iletken uç, bir fonograf iğnesiyle aynı şekilde bir örnek yüzeyi üzerinden tarar. Uç bir örnek yüzeyinin yakınına getirildiğinde, uç ve örnekler arasındaki Van der Waals kuvvetleri konsolun sapmasına yol açar. Sapmanın büyüklüğü bir lazerle yakalanır. Numune yüzeyindeki lazer sapmasının uç pozisyonuna karşı bir grafiği, yüzeyin topografisini oluşturan tepelerin ve vadilerin çözünürlüğünü sağlar. AFM ucu numuneye (temas modu) veya ucu yüzey boyunca bantla (kılavuz modu) dokunarak çalışabilmektedir(Yang, 2010).



Şekil 3. 6. AFM sisteminin blok diyagramı

3.3.2. X-Işını Kırınım Metodu

X-ışını kırınımı, toz ve katı numunelerde bulunan bileşiğin "fazları" olarak bilinen çeşitli kristalli formların tanımlanması ve nicel olarak belirlenmesi için çok yönlü, tahribatsız bir analitik yöntemdir.



Şekil 3. 7. Bragg kırınımı

Kırılma, dalgaboyu ile aynı olan tekrar mesafeli düzgün yapının dalgalar ile etkileşime girmesi sonucu meydana gelir. Örneğin, ışık, ışığın dalga boyu civarındaki birkaç bin angstrom düzeninde aralıklı çizgi hatlarına sahip olan bir ızgara tarafından kırılabilir. X-ışınlarının, kristalin katılarda tipik atomlar arası mesafelerle aynı olan birkaç angstrom düzeninde dalga boylarına sahip olduğu görülür. Bu, X-ışınlarının, tanımı gereği, kristal olan ve düzenli olarak tekrar eden atomik yapılara sahip olan minerallerden kırılabileceği anlamına gelir. Belirli geometrik gereksinimler karşılandığında, kristalimsi bir katıdan dağılmış X-ışınları, yapısal olarak müdahale ederek kırılmış bir ışın üretebilir. W. L. Bragg tarafından çeşitli faktörler arasında öngörülebilir bir ilişki olduğunu öne sürülmüştür:

1-Bir mineralin benzer atom düzlemleri arasındaki mesafe (atomlar arası boşluk) d-aralığı olarak adlandırılır ve angström boyutunda ölçülür.

2-Kırınım açısı teta açısı olarak adlandırılır ve derece cinsinden ölçülür. Difraktometre teta açısının iki katı bir açıyı ölçer ve bu açı '2θ' olarak adlandırılır.

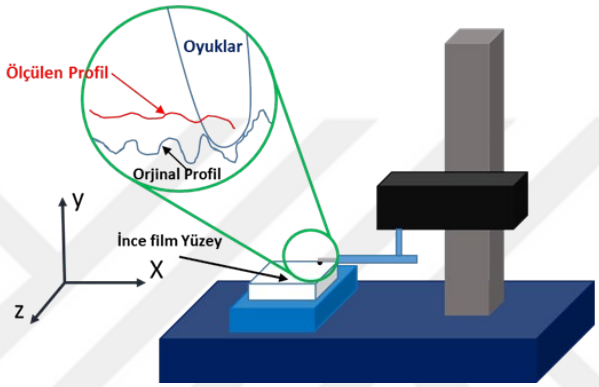
Bragg ın kırınım yasası aşağıda ifade edilen denklem ile ifade edilir.

$$n\lambda = 2dSin\theta \tag{3.1}$$

Burada, λ; X-ışını dalgaboyu, d; düzlemler arası uzaklık, θ, kırınım açısı ve n: 0,1,2,3,…. dir. Bragg'ın kırınım yasası yardımı ile, analiz edilen malzemenin kristal yönelimi tespit edilebilmektedir (Behera, 2009).

3.3.3. Profilometre Cihazı

Profilometre, bir malzemenin yüzey pürüzlülüğünü yani yüzeyin profilini ölçmek için kullanılan bir ölçüm cihazıdır. Malzemenin yüzeyi, profilometrenin probu ile temas ederken, yüzey analizi yapan bir fonografa benzemektedir (Şekil 3.8). Ölçüm esnasında, Elmas uçlu prob, bir numune ile temas halinde dikey olarak hareket ettirilir ve daha sonra belirli bir mesafe ve belirtilen temas kuvveti için numune boyunca yanlamasına hareket ettirilir. Bir profilometre, konumun bir fonksiyonu olarak dikey prob ucu yer değiştirmesindeki küçük yüzey değişimlerini ölçebilmektedir.



Şekil 3. 8. Profilometrenin şematik görüntüsü

Tipik bir profilometre, yüksekliği 10 nanometreden 1 milimetreye kadar değişen küçük dikey özellikleri ölçebilir. Elmas kaleminin yükseklik konumu, depolanan, analiz edilen ve görüntülenen dijital bir sinyale dönüştürülen bir analog sinyal üretir. Elmas prob ucu yarıçapı 20 nm ile 50 µm arasında değişir ve yatay çözünürlük tarama hızı ve veri sinyali örnekleme hızı ile kontrol edilir (MAHENDRAN).

3.3.4. UV-Vis spektroskopi

Ultraviyole-görünür (UV-vis) spektrofotometre, elektromanyetik spektrumun ultraviyole (UV) ve görünür (vis) bölgelerindeki bileşiklerin optik özelliklerini analiz eden bir araçtır. Kızılötesi spektroskopiden farklı olarak (titreşim hareketlerine bakar), ultraviyole-görünür spektroskopi elektronik geçişlere bakar ve bileşiklerin dalga boyunu, maksimum foton soğurması ya da iletimini belirlememizi sağlamaktadır (Arora, 2016).

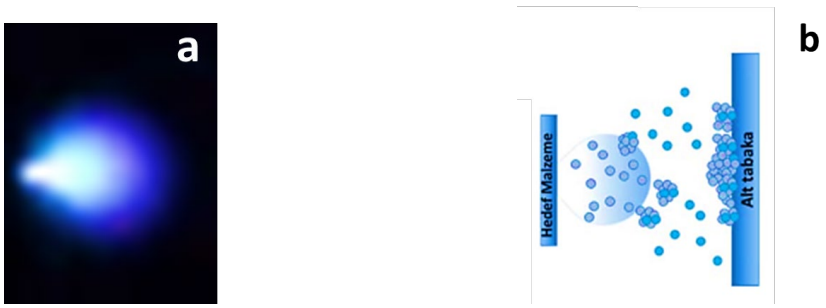
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında PLD tekniği ile p-Si wafer üzerine ZnO ince filmler kaplanmış ve laser puls sayısı ve oksijen gaz basıncına bağlı olarak Ag/n-ZnO/p-Si/Au ve Ag/ZnO/p-Si/Al heteroeklem diyotlar üretilmiştir. n-ZnO/p-Si heteroeklem diyotların karanlık ve aydınlık ortamda elektriksel ve fotovoltaik özellikleri incelenmiş ve karşılaştırılmalı olarak yorumlanmıştır.

4.1. ZnO İnce Film Kalınlığının Ag/Zno/Si/Au Heteroeklem Diyotların Elektriksel Özellikleri Üzerindeki Etkisi

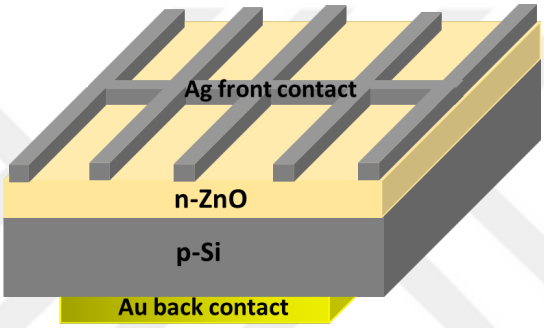
4.1.1. Deney Aşaması

ZnO ince filmler, PLD tekniği ile oda sıcaklığındaki p-Si wafer ve SLG alt tabakalar üzerine, 1064 nm dalgaboyunda, 10 Hz tekrarlama oranında ve 5 ns puls genişliğinde pulslu laser demeti kullanarak depozit edilmişlerdir. p-Si wafer, 500 µm kalınlığında, 1 Ω.cm direncinde ve (111) yöneliminde bir yarıiletkendir. Deney öncesinde, Si wafer ve SLG alt tabakaların temizliğinde izlenen prosedür: Si wafer ve SLG numunelere köpüklü sabunla yıkanmıştır. Si wafer, üzerindeki oksit tabakanın giderilmesi için HCl:H2O5: arıtılmış su (1:1:10) çözeltisi içerisinde 10 dk bekletilmiştir ve daha sonra, 5 dk sadece arıtılmış su içerisine daldırılmıştır. SLG numuneler ise, sırasıyla aseton ve izopropil alkol içerisinde 10 ar dakika ultrasonik cihaz ile yıkanmış ve daha sonra nitrojen gazı ile kurulanmıştır.



Şekil 4. 1. Oksijen gaz basıncı içerisinde ablate edilmiş ZnO plasmasının a) fotoğrafı ve b) şematik görüntüsü (Gezgin ve ark., 2017)

Deney öncesinde, vakum çemberi ~8×10^{-6} mbar basınca kadar pompalanmıştır. Hedef-alt tabaka arası uzaklık 5 cm ye ayarlanmıştır. Vakum çemberi içerisine 1.3×10^{-1} mbar basıncında oksijen gaz girişi gerçekleştirilmiştir. Laser akısı 2.2 J/cm^2 değerine ayarlanmıştır. ZnO sputtering target (%99.99 saflıkta) puls laser demeti ile ablate edilmiş ve ZnO1, ZnO2 ve ZnO3 ince filmleri sırasıyla 18000, 36000, 54000 laser puls sayısına bağlı olarak oda sıcaklığında p-Si wafer ve SLG üzerine büyütülmüşlerdir. Ayrıca, 54000 laser puls sayısı ile üretilmiş ZnO3 ince film 300^{o}C sıcaklıkta tavlanmıştır. Ag/n-ZnO/p-Si/Au heteroeklem diyot yapısını oluşturmak için (Şekil 4.2) Altın(Au) ve Gümüş (Ag) kontaklar p-Si waferın arkasına ve n-ZnO ince filmin üzerine PLD tekniği kullanarak 100 nm kalınlığında depozit edilmişlerdir.



Şekil 4. 2. n-ZnO/p-Si heteroeklem diyotun şematik görüntüsü

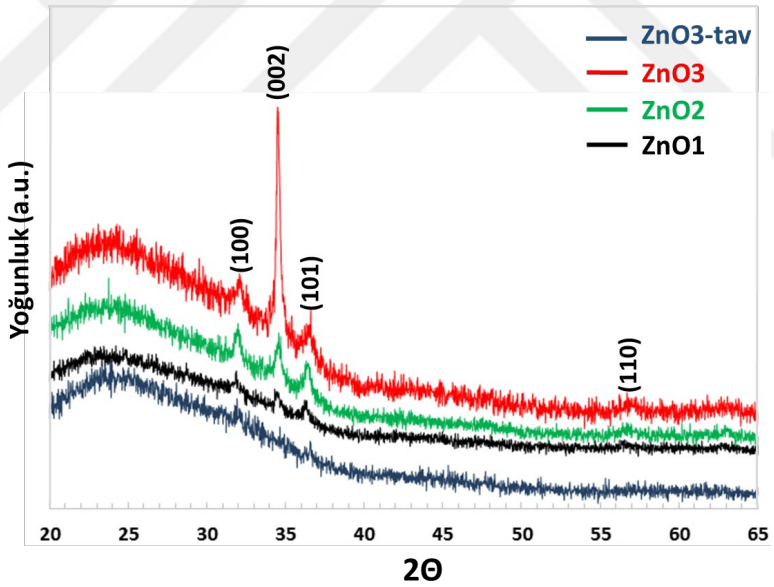
Laser puls sayısına bağlı olarak üretilen ZnO ince filmlerin kristal, morfolojik ve optik özellikleri sırasıyla XRD, AFM, UV-vis spektroskopi ile analiz edilmiş ve film kalınlıkları profilometre cihazı ile ölçülmüştür. n-ZnO/p-Si heteroeklem diyotların karanlık ortamdaki J-V eğrisi elde edilmiş ve ideality faktörü (n), bariyer yüksekliği (Φ_B) ve seri direnç (R_s) parametreleri hesaplanmıştır.

4.1.2. Tartışma ve Sonuçlar

4.1.2.1. XRD Analizi

18000, 36000 ve 54000 laser puls sayısı ile depozit edilmiş ZnO1, ZnO2 ve ZnO3 ince filmlerin kalınlıkları 41 nm, 70 nm ve 197 nm dir. Şekil 4.3'de verilen XRD spektrumuna göre, laser puls sayısı artarken ZnO ince filmlerin kristal yapıları gelişmiştir (Gezgin ve ark., 2019). Burada önemli nokta, oda sıcaklığındaki alt tabaka üzerine büyütülmüş ve hiçbir ısıl işlem uygulanmamış ZnO ince filmlerin kristal formda

oluşmuş olmasıdır. Bu durum kısaca ifade edilecek olursa, ablate edilmiş ZnO atomları yüksek enerjiye sahip oldukları için, alt tabaka üzerine geldiklerinde termal enerjilerinden dolayı birbirlerine doğru hızlı bir şekilde difüz ederler (yüksek alt tabaka sıcaklığı ya da tavlama sıcaklığında olduğu gibi). Atomlar birbirleri ile uyumlu bir birleşme yaparak, düzgün bir hizalanma ve kristal yapı oluştururlar (Ajimsha, 2008; Gezgin ve ark., 2017; Chávez-Urbiola ve ark., 2019; Gezgin ve Kiliç, 2019; Gezgin ve Kılıç, 2019). Tüm ZnO ince filmler, 2Θ=32.1º, 34.7º, 36.5º and 56.6º açıları üzerinde oluşmuş (100), (002), (101) ve (110) *hkl* yönelimleri üzerinde kristalleşmiştirler. ZnO ince filmlerin ana kırınım piki, (002) yönelimindedir (Shaban ve ark., 2017). ZnO ince filmlerin kalınlıkları artarken, kristal yapı gelişmiş ve ana piklerin yoğunluğu artmıştır. Ancak, 54000 laser puls sayısı ile üretilmiş ve 300ºC sıcaklıkta tavlanmış ZnO3-tav ince film (Gezgin ve ark., 2017) (100) ve (101) yöneliminde pikleşme yapmaya çalışsa da amorf yapıya yakın bir kristal yapı göstermiştir (Tat ve ark., 2014). Bu nedenle, ZnO3-tav ince film, ZnO/Si heteroeklem diyot üretimi için uygun görülmemiştir.



Şekil 4. 3. ZnO1, ZnO2, ZnO3 ve ZnO3-tav ince filmlerin XRD Spektrası

İnce filmleri oluşturan taneciklerin ortalama kristalin boyutu, Scherrer denklemi ile hesaplanmıştır:

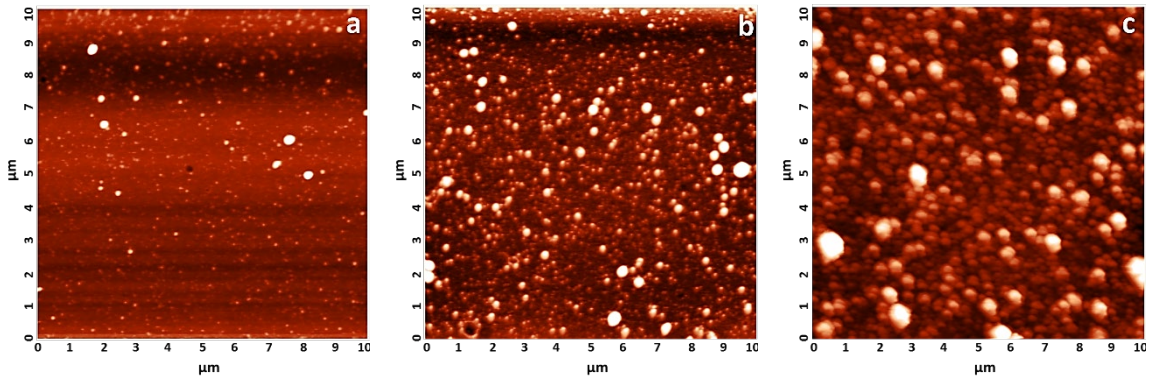
$$D = 0.94\lambda/\beta cos\theta \tag{4.1}$$

Burada, D ortalama kristalin boyutu, β kırınım tepe noktasının maksimum yarısında tam genişlik, λ , X-ışınının dalgaboyu, θ, Bragg kırınım açısıdır (Gezgin ve Kılıç, 2019). ZnO1, ZnO2 ve ZnO ince filmlerin ana kristal boyutları sırasıyla 6.58 nm,

13.31 nm ve 27. 4 nm olarak hesaplanmıştır. ZnO ince filmlerin kalınlıkları artarken, kristalin boyutları da artmıştır. Böylece, ZnO içerisindeki defekt sayıları azalmış ve yukarıda ifade edildiği gibi ZnO ince filmlerin kristalitesi gelişmiştir (Gezgin ve ark., 2019).

4.1.2.2. Morfolojik Analiz

Şekil 4.4, ZnO1, ZnO2 ve ZnO3 ince filmlerin 10 µm × 10 µm alanındaki AFM görüntüsünü vermektedir. Laser puls sayısındaki artış depozisyon oranını arttırdığı için, alt tabaka üzerine ulaşan atomlar birbirleri üzerine yığıldıkları için tanecik boyutunun büyümesine neden olurlar. En büyük tanecik boyutuna en kalın olan ZnO3 ince film sahip iken, en düşük kalınlıktaki ZnO1 ince filmi oluşturan tanecikler en küçük boyuttadır. ZnO2 ince film nispeten heterojen bir boyut dağılımına sahiptir. Ayrıca, laser puls sayısının artması ile birlikte tanecik boyutunun büyümesi, tanecik sınır sayılarının azalmasına ve bu sınırlar içerisindeki kusurların ve tuzakların pasifleşmesine olanak sağlar. Bu durum, kristal yapının gelişmesini desteklemektedir (Gezgin ve ark., 2019).

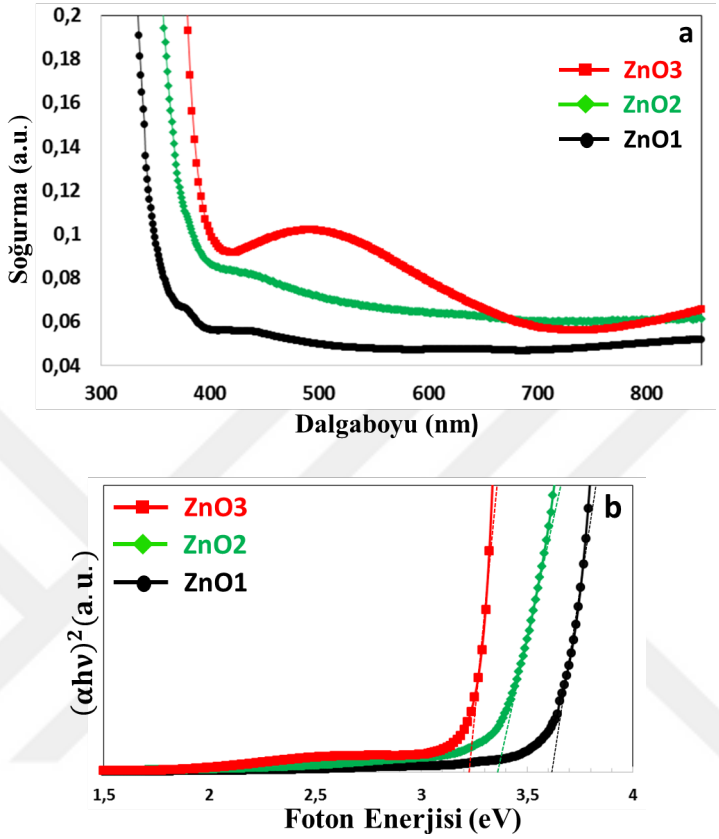


Şekil 4. 4. ZnO1, ZnO2 ve ZnO3 ince filmlerin 10µm × 10 µm alanındaki AFM görüntüsü

4.1.2.3. Optik Analiz

Şekil 4.5 de verilen soğurma spektrumuna göre, ZnO ince filmlerin kalınlıkları artarken soğurma miktarları da artmıştır. Kalınlığın artması ile birlikte tanecik boyutunun da artması ZnO ince filmlerin daha fazla foton soğurmasına yol açmıştır. (Dai ve ark., 2010; Gezgin ve Kiliç, 2019; Gezgin ve Kılıç, 2019). Düşük kalınlıktaki ZnO1 ve ZnO2 ince filmler, görünür bölgede daha fazla foton iletirlerken, en yüksek

kalınlıktaki ZnO3 ince film bu bölgede en düşük foton iletimi sergilemiştir. Ayrıca, ZnO ince filmin özellikle 400-600 nm bölge aralığında yüksek oranda foton soğurması, büyük boyuttaki taneciklerde oluşmasına dayandırılabilir.



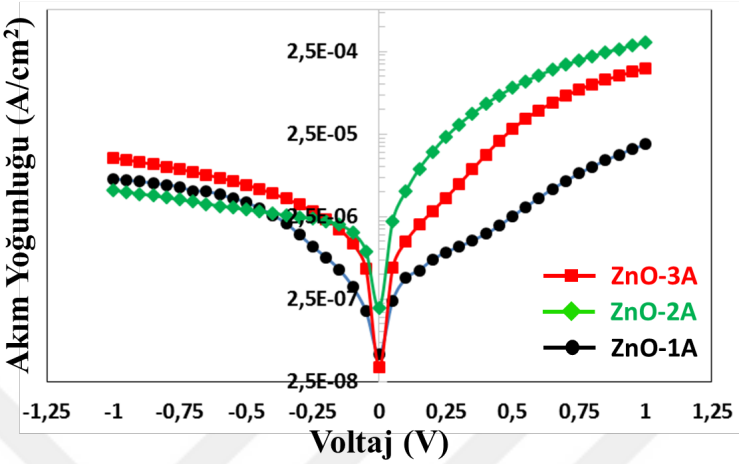
Şekil 4. 5. ZnO1, ZnO2 ve ZnO3 ince filmlerin a) soğurma spektrumları ve b) Tauc grafikleri

ZnO ince filmlerin bant aralıkları, aşağıda ifade edilen Tauc denklemi ile hesaplanmıştır:

$$(\alpha h\nu)^2 = A\left(h\nu - E_g\right)^{1/2} \tag{4.2}$$

Burada, A; sabit, $h\nu$; foton enerjisi, E_g ince film bant aralığıdır. Eg, Şekil 4.5b de verilmiş Tauc grafiğinde $(\alpha h\nu)^2$ ekseninden $(h\nu)$ eksenine çizilen düz çizgi ile belirlenmektedir. ZnO1, ZnO2 ve ZnO3 ince filmlerin E_g değerleri, sırasıyla 3.61 eV (Al-Asadi ve ark., 2016), 3.37 (Davis ve ark., 2019) ve 3.23 eV (Husna ve ark., 2012) olarak hesaplanmıştır ve bu değerler literatürde rapor edilen değerler ile uyumludur. Ayrıca, ince filmlerin kalınlıkları artarken tanecik boyutlarının artması, ZnO ince filmlerin soğurma yoğunluğunu arttırırken bant aralıklarını küçültmüştür (Dai ve ark., 2010).

4.1.2.4. Ag/n-ZnO/p-Si/Au Heteroeklem Diyotların Karanlık Ortamdaki Elektriksel Özellikleri



Şekil 4. 6. ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A diyotların karanlık ortamdaki logaritmik J-V karakterizasyonu

ZnO1, ZnO2 ve ZnO3 ince filmlere dayalı olarak üretilen ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A heteroeklem diyotların karanlık ortamdaki logaritmik J-V karakteristikleri Şekil 4.6 da verilmiştir. ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A heteroeklem diyotların doğrultma oranları (+1V voltajtaki ileri akımın (I_F), -1V voltajtaki ters akımın oranı (I_R)), sırasıyla 2.60, 61.12 ve 12.10 olarak bulunmuştur. ZnO1 ince filme dayalı üretilen diyotun ileri akımı en düşük değerde iken, ZnO2 ince film ile üretilen diyot en yüksek değerde ileri akımı göstermiştir (Chávez-Urbiola ve ark., 2019; Ismail ve ark., 2019). Bu durum, ZnO1 ince filmin kristal yapısı çok zayıflamasına ve bu ince film içerisinde kusur ve tuzakların sayısı oldukça yüksek olmasına dayandırılır. (Nasir ve Abass, 2016). Buna karşın, ZnO2 ve ZnO3 ince filmlere dayalı olarak üretilmiş diyotlar, daha iyi bir doğrultma göstermişlerdir. Çünkü, ZnO ince filmlerin kalınlıkların artması ile birlikte tanecik boyutlarındaki artış, ince filmin kristal yapısının iyileşmesine, defekt ve tuzakların azalması ile beraber yük geçişlerinin artmasına sebep olur (Kumar ve ark., 2013; Ismail ve ark., 2019).

Bir diyotun akımı, denklem (4.3) ile ifade edilmektedir. Termiyonik yayınım teorisine göre,

$$I = I_0[exp(qV/nkT) - 1] \quad (4.3)$$

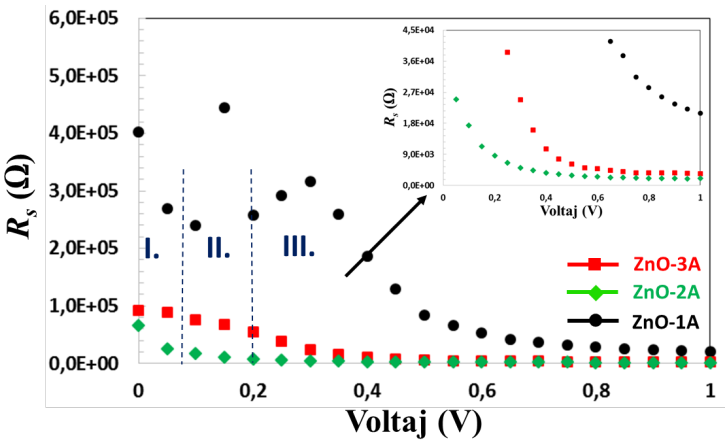
dir. V, uygulanan ileri bias voltajı, I_o doyma akımı, k Boltzman sabiti, n ideality faktörü, q elektrik yükü ve T mutlak sıcaklıktır. Diyotun ideality faktörü denklem (4.4) ile verilir:

$$n = \frac{q}{kT}\frac{dV}{d(lnI)} \tag{4.4}$$

Burada, I ileri bias akımıdır. İdeality faktörü Şekil 4.6 daki logaritmik eğrinin ileri bias bölgesinde çizilen düz bir çizgiden elde edilir. Denklem (4.6) nın kullanılması ile Şekil 4.6'deki logaritmik eğrinin ileri biasından, ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A heteroeklem diyotların ideality faktörleri sırasıyla, 7.34, 3.47 ve 4.56 olarak bulunmuştur. Diyotların yüksek ideality faktörleri, ZnO ve Si yarıiletkenler arasındaki kafes denksizliği, heteroeklem arayüzeyde SiO_x tabakasının oluşması, deplasyon bölgesinde yük taşıyıcıların yeniden birleşmesi, ara yüzey durumları ve kontak direnci gibi faktörlere dayandırılabilir (Zhu ve ark., 2005; Bo ve ark., 2009; Gupta ve ark., 2009; 2010; Jing-Jing ve ark., 2010). ZnO1 ince filmin çok fakir kristal yapıya sahip olması hem ZnO1 ince film içerisinde hem de heteroeklem ara yüzeyde çok fazla kusur ve yük tuzak bölgelerin oluşmasına sebep olur. Bu faktörler, ZnO-1A nın ideality faktörünün yüksek olmasına sebep olur. İnce film kalınlığının artması ile kristal yapının gelişmesi, ZnO-2A ve ZnO-3A diyotların ideality faktörlerinin azalmasına sebep olur (Ismail ve ark., 2019). Bir diyotun bariyer yüksekliği,

$$\Phi_b = \frac{kT}{q} ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_o}\right) \tag{4.5}$$

denklemi ile ifade edilir. A, diyotun aktif alanı, A^*, Richardson sabiti (p-Si için 32 A $cm^{-2}K^{-2}$). I_o, Şekil 4. 6. daki logaritmik eğrinin ters bias bölgesinde y eksenini kesen çizgiden belirlenmektedir. ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A heteroeklem diyotların Φ_{B1}, Φ_{B2} ve Φ_{B3} bariyer yükseklikleri denklem (4.5) kullanarak sırasıyla 0.75 eV, 0.69 eV ve 0.72 eV olarak bulunmuştur. İnce filmlerin kalınlıkları artarken bariyer yükseklikleri azalmıştır (Nasir ve Abass, 2016; Ismail ve ark., 2019; Koksal ve ark., 2019) (Nasir ve Abass, 2016; Kapatel ve ark., 2017).



Şekil 4. 7. Karanlık ortamda ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A diyotlarının seri dirençlerini uygulanan voltaja bağlı grafiği

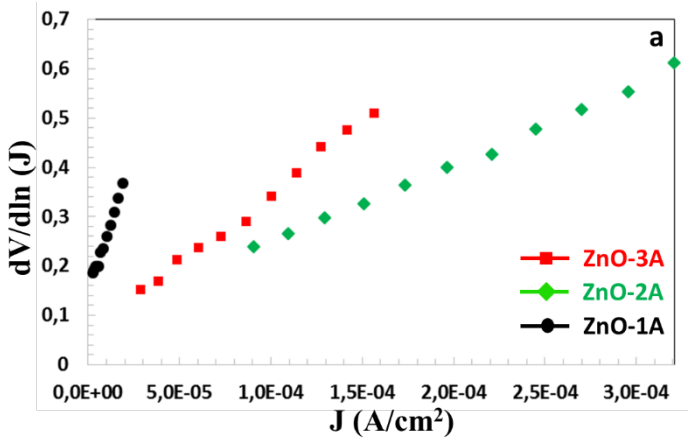
Seri direnç, bir heteroeklem diyotunu performansını etkileyen önemli bir faktördür. İleri bias voltajı artarken, seri direnç azalır ve belirli bir değerde sabitlenir. R_s değeri, en basit metot olan $R_s = \frac{\Delta V_{ileri\ bias\ voltaj}}{\Delta I_{ileri\ bias\ akım}}$ formülü kullanarak hesaplanır (Soliman ve ark., 2008; Soliman ve ark., 2012; Bedia ve ark., 2014). Bu metot kullanılarak, Ag/ZnO/Si/Au heteroeklem diyotun R_s değerleri Şekil 4.7 da verilen grafikten hesaplanır. I. bölgede, heteroeklem diyota düşük ileri biasta voltaj uygulandığında, seri direnci birden düşer. Seri direnç arttığında, II. bölgede R_s değeri dereceli olarak azalır. Voltaj daha da artış kaydettiğinde, R_s, doygunluk değerine ulaşır (Soliman ve ark., 2008; Bedia ve ark., 2014). Şekil 4.7'daki $R_s vs\ V$ grafiğine göre, karanlık ortamda, ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A heteroeklemin R_s değerleri, 20.90 kΩ, 1.96 kΩ ve 3.54 kΩ olarak belirlenmiştir. Tüm ZnO/Si diyotların dirençleri, ara yüzeydeki SiO_x tabakası, kontak direnci ve yük taşıyıcıların tuzaklanmasından dolayı genel olarak yüksektir. ZnO ince filmin kalınlığının artması ile n-ZnO/p-Si heteroeklem diyotların seri direnci azalmıştır. Bu durum, ZnO ince filmin kristal yapısının gelişmesine dayandırılır. Böylece, tuzak noktaları azalır, yük taşıyıcıların ortalama serbest yolu artar ve sonuç olarak, kalınlıkla birlikte tanecik boyutu artarak seri direnç azalır (Cheung ve Cheung, 1986; Kumar ve ark., 2013; Ismail ve ark., 2019). Heteroeklem diyotların n ve Φ_b değerlerinin yanında R_s değerleri, Cheung-Cheung metodu (Cheung ve Cheung, 1986) kullanarak logaritmik J-V eğrisinin ileri bias bölgesinde belirlenir. Cheung-Cheung metodu, denklem (4.6), denklem (4.7) ve denklem (4.8) ile ifade edilirler:

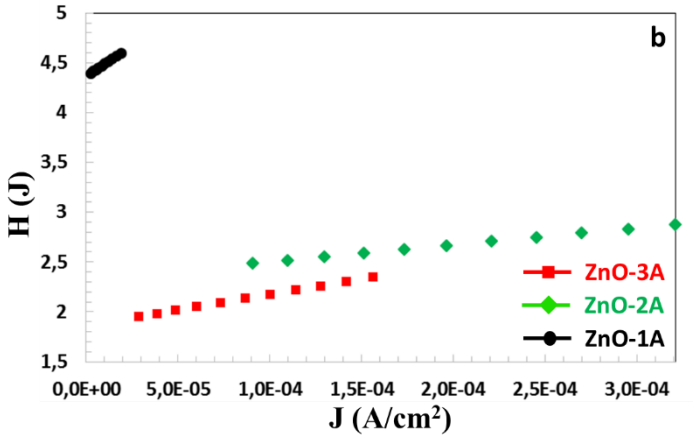
$$\frac{dV}{d(lnI)} = IR_s + n\left(\frac{kT}{q}\right) \tag{4.6}$$

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q}\right) ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \tag{4.7}$$

$$H(I) = IR_s + n\Phi_b \tag{4.8}$$

Şekil 4.8a ve 4.8b ZnO/Si heteroeklem diyotların dV/d(lnJ)-J ve H(J)-J karakteristikleri gösterilmektedir. Şekildeki dV/d(lnJ)-J eğrisi denklem (4.6) den elde edilmektedir. Şekil 4.8a da verilen dV/d(lnJ)-J eğrisinin y-eksen kesişimi ve eğimi, sırasıyla *nkt/q* ve R_s değerlerini verir. ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A heteroeklem diyotların *n* değerleri, sırasıyla 5.75, 2.36 ve 3.40 (Tablo 4.1) olarak hesaplanmıştır. Geleneksel J-V eğrisinden hesaplanan ideality faktörler, dV/dln(J)-J eğrisi ile hesaplanan değerinden bir miktar daha yüksektir. ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A diyotların Cheung-Cheung metotları ile hesaplanan R_s değerleri, 11.34 kΩ, 1.59 kΩ ve 2.87 kΩ dur.



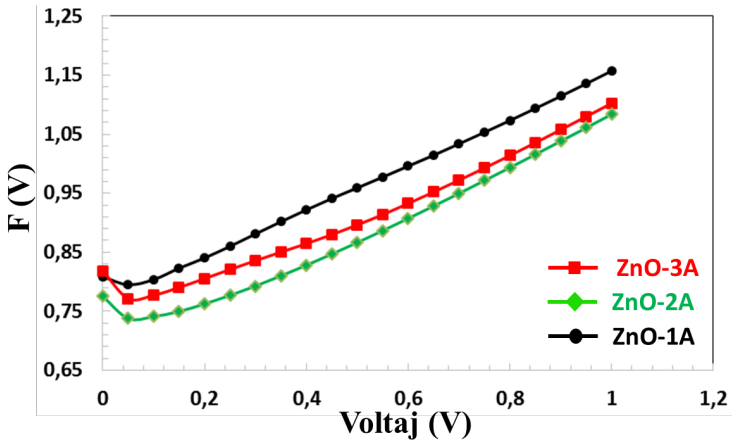


Şekil 4. 8. ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A diyotların a) dV/d(lnJ)-J ve b) H(J)-J karakteristikleri

Şekil 4.8b deki H(J)-J karakteristiği, Şekil 4.6 da verilen J-V logaritmik eğrinin ileri bias bölgesinden denklem (4.7) kullanılarak elde edilmiştir. H(J)-J eğrisindeki y-eksen kesişimi ve eğrisi, sırasıyla denklem (4.8) deki $n\Phi_b$ ve IR_s yi ifade eder. ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A heteroeklem diyotların Φ_b ve R_s değerleri sırasıyla 0.75 eV, 0.68 eV ve 0.78 eV (Paul ve ark., 2019) ve 12.19 kΩ, 1.68 kΩ, 3.08 kΩ (denklem (4.10) kullanarak) olarak hesaplanmıştır. dV/dln(J)-J, H(J)-J ve geleneksel J-V eğrisinden elde edilmiş R_s değeri ve bariyer yüksekliği, nispeten birbirleri ile uyumlu bulunmaktadır (Olyaee ve ark., 2015; Orak ve ark., 2018).

Tablo 4. 1. Karanlık Ortamda ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A diyotların elektriksel parametreleri

ZnO/Si heteroeklem diyotlar	J-V Metotu			Cheung Cheung Metotu				Norde Metotu	
	dln(J)-V			dV/dln(J)		H(J)		F(V)	
	n	R_s (kΩ)	Φ_b(eV)	n	R_s (kΩ)	R_s (kΩ)	Φ_b(eV)	R_s (kΩ)	Φ_b (eV)
ZnO-1A	7.34	20.90	0.75	5.75	11.34	12.19	0.75	71.15	0.77
ZnO-2A	3.47	1.96	0.69	2.36	1.59	1.68	0.68	6.23	0.64
ZnO-3A	4.56	3.54	0.72	3.40	2.87	3.08	0.78	19.07	0.75



Şekil 4. 9. ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A diyotların F(V)-V karakteristikleri

ZnO/Si heteroeklem diyotların F(V)-V karakteristikleri, Şekil 4.9 da verilmektedir Diyotların bariyer yüksekliği ve seri direncini hesaplamak için bir farklı metod olarak Norde Metodu kullanılmaktadır (Norde, 1979). Norde metodu, denklem (4.9) ile ifade edilmektedir:

$$F(V,\gamma) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} ln\left(\frac{I(V)}{AA^{*}T^{2}}\right) \tag{4.9}$$

Burada, γ logaritmik J-V eğrisinden elde edilmiş ideality faktörden büyük olan ilk sabit sayıdır. R_s ve Φ_b değerleri aşağıda ifade edilmiş Denklem 10 ve Denklem 11 ile hesaplanmaktadır:

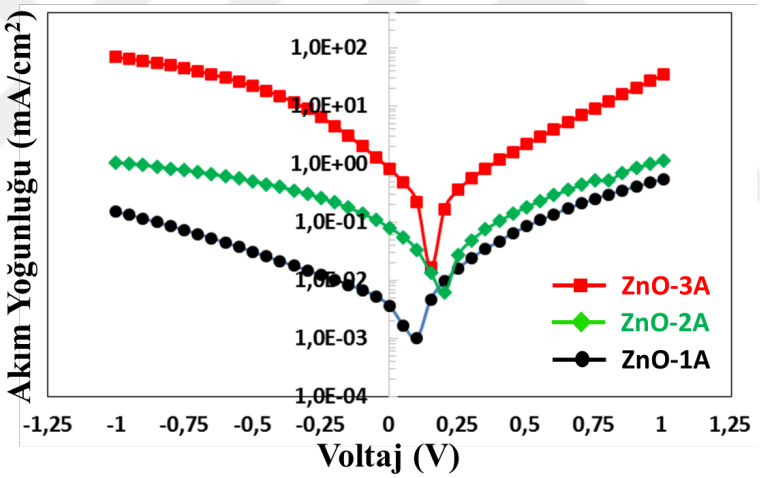
$$\Phi_b = F(V_o) + \frac{V_o}{\gamma} - \frac{kT}{q} \tag{4.10}$$

$$R_s = \frac{\gamma - n}{I_{min}} \frac{kT}{q} \tag{4.11}$$

$F(V_o)$, F(V)-V karakteristiğinin minimum noktasındaki değerdir. V_o, minimum $F(V_o)$ değerine karşılık gelen voltajdır. I_{min}, J-V karakteristiğinde minimum voltaja karşılık gelen akım değeridir. ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A heteroeklem diyotların R_s değerleri, Norde metotu kullanarak sırasıyla 1.15 kΩ, 6.23 kΩ ve 19.07 kΩ olarak

hesaplanmıştır. Bu heteroeklem diyotların Φ_b değerleri ise, 0.77 eV, 0.64 eV ve 0.75eV olarak bulunmuştur. Norde metodu ile hesaplanmış R_s seri direnç, Cheun-Cheung metodu ile hesaplanmış değerden daha yüksek elde edilmiştir (Orak ve ark., 2018). Bu durum, Cheung-Cheung metodunun logaritmik J-V eğrisinin ileri bias bölgesinin sadece lineer olmayan kısmından hesaplama yaparken, Norde metodunun tüm ileri bias bölgesini kullanmasına dayandırılmaktadır. Geleneksel J-V, Cheung Cheung ve Norde metotlarının kullanımının sonucu olarak, Ag/n-ZnO/p-Si/Au heteroeklem diyotlarının hesaplanan R_s, Φ_b ve n değerlerindeki yükselmeler ya da azalmalar üç metot ile uyumlu bulunmuştur.

4.1.2.5. Ag/n-ZnO/p-Si/Au Heteroeklem Diyotların Aydınlık Ortamdaki Fotovoltaik Özellikleri



Şekil 4. 10. ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A diyotların ışık altındaki J-V karakteristiği

n-ZnO/p-Si heteroeklem diyotlar, ışık altında fotovoltaik özellik göstermektedirler. Şekil 4.10 da, ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A heteroeklem diyotların ışık altında elde edilen J-V (Akım Yoğunluğu-Voltaj) karakteristiği ve Tablo 4.2. de bu diyotların hesaplanmış fotovoltaik parametreleri verilmektedir. ZnO-1A diyotunu oluşturan ZnO1 ince filmin çok ince olup p-Si yarıiletkene görünür bölgede yüksek oranda foton iletmesine rağmen, diyot J_{sc}=0.0036 mA/cm^2 lik çok düşük kısa devre akımına sahip çok η=%0.00014 lük çok düşük güç dönüşüm verimi göstermiştir (Habubi ve Mousa, 2015; Al-Maiyaly ve ark., 2018). Fotovoltaik parametrelerdeki bu düşük değerler, yukarıda ifade edildiği gibi, yüksek ideality faktörü ve seri dirence

sebep olan ara yüzey durumları, ara yüzdeki SiO_x tabaka oluşumu, çoğunluk yük geçişlerini sınırlandıran kusurlar ve tuzaklar gibi faktörlere dayandırılabilir (Kumar ve ark., 2013; Habubi ve Mousa, 2015).

Tablo 4. 2. Işık altındaki ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A diyotların fotovoltaik parametreleri

Diyotlar	J_{sc}	V_{oc}	***FF***	η
ZnO-1A	0.0036 mA/cm^2	100 mV	0.28	%0.00014
ZnO-2A	0.079 mA/cm^2	200 mV	0.20	%0.0042
ZnO-3A	0.83 mA/cm^2	150 mV	0.19	%0.03

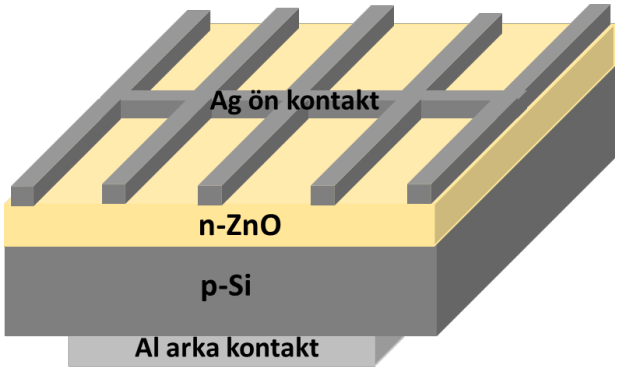
ZnO-2A diyotunun fotovoltaik parametreleri J_{sc}=0.079 mA/cm^2, V_{oc}=200 mV, FF=0.20 ve η=%0.0042 iken ZnO-3A diyotun fotovoltaik parametreleri J_{sc}=0.83 mA/cm^2, V_{oc}=150 mV, FF=0.19 ve η=%0.03 olarak hesaplanmıştır (Tablo 4.2). ZnO-3A diyotun foto akımının ve güç dönüşüm veriminin diğer iki diyota göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu yüksek fotovoltaik etki, mutlak ölçüde ZnO-3A diyotunu oluşturan ZnO-3 ince filmin daha iyi bir kristal yapıya sahip olmasına dayandırılmaktadır. ZnO-3 ince filmin kristalinin gelişmesi ile, bu ince film içerisinde elektronlar tuzak ve kusurlara takılmadan rahat bir şekilde geçişler gerçekleştirirler. Bu durum, diyot içerisinde yük toplanmasını ve foto akımı arttırmaktadır. Ancak, ZnO3 ince filmin 157 nm kalınlıkta olması, görünür bölgede bir miktar foton soğurmasına ve p-Si soğurucu tabakaya foton iletiminin kısıtlanmasına sebep olmuştur. Dolayısıyla, ZnO-3A diyotun ışık altında genel anlamda düşük fotovoltaik parametreler göstermesine sebep olabilmektedir. Sonuç olarak, üç diyot arasında ZnO-1A diyotun zayıf fotovotaik özellik sergilerken, ZnO-3A diyotunun fotovoltaik etkisi diğerlerine göre daha güçlü olduğu gözlemlenmiştir (Habubi ve Mousa, 2015; Al-Maiyaly ve ark., 2018).

4.2. ZnO İnce Film Kalınlığının Ag/n-ZnO/p-Si/Al Heteroeklem Diyotların Elektriksel Özellikleri Üzerindeki Etkisi

4.2.1. Deney Aşaması

ZnO ince filmler, PLD tekniği ile oda sıcaklığındaki p-Si wafer ve SLG alt tabakalar üzerine, 1064 nm dalgaboyunda, 10 Hz tekrarlama oranında ve 5 ns puls genişliğinde pulslu laser demeti kullanarak depozit edilmişlerdir. p-Si wafer, 500 µm kalınlığında, 1 Ω.cm direncinde ve (111) yöneliminde bir yarıiletkendir. Bölüm 4.1.1. de ifade edildiği gibi, Si wafer ve SLG alt tabakalar için temizlik prosedürü uygulanmıştır.

Deney öncesinde, vakum çemberi ~8×10^{-6} mbar basınca kadar pompalanmıştır. Hedef-alt tabaka arası uzaklık 4,5 cm ye ayarlanmıştır. Vakum çemberi içerisine 6×10^{-2} mbar basıncında oksijen gaz girişi gerçekleştirilmiştir. Laser akısı 1.9 J/cm^2 değerine ayarlanmıştır. ZnO sputtering target (%99.99 saflıkta) puls laser demeti ile ablate edilmiş ve ZnO4 ve ZnO5 ince filmleri sırasıyla 72000 ve 90000 laser pulse sayısına bağlı olarak oda sıcaklığında p-Si wafer ve SLG üzerine büyütülmüşlerdir. Alüminyum (Al) ve Ag kontaklar p-Si waferın arkasına ve n-ZnO ince filmin üzerine PVD tekniği kullanarak 60 nm kalınlığında depozit edilmişlerdir.



Şekil 4. 11. Ag/n-ZnO/p-Si/Al heteroeklem diyotun şematik görüntüsü

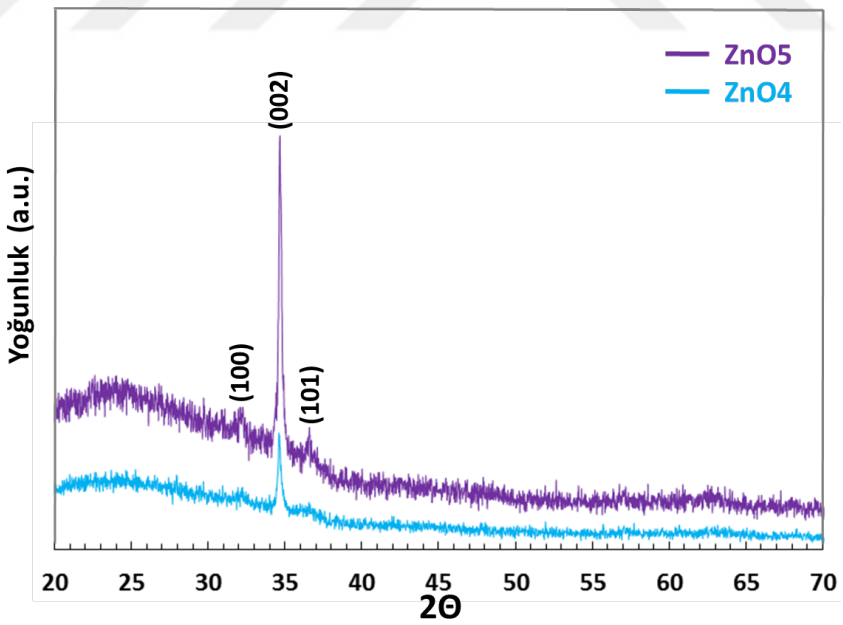
Laser puls sayısına bağlı olarak üretilmiş, ZnO ince filmlerin kristal, morfolojik ve optik özellikleri sırasıyla XRD, AFM, UV-vis spektroskopi ile analiz edilmiş ve film kalınlıkları profilometre cihazı ile ölçülmüştür. Şekil 4.11 de gösterilmiş n-ZnO/p-Si heteroeklem diyotların karanlık ortamdaki J-V grafiği elde edilmiştir ve sadece

geleneksel J-V grafiği ile ideality faktörü (n), bariyer yüksekliği (ϕ_B) ve seri direnç (R_s) parametreleri hesaplanmıştır.

4.2.2. Tartışma ve Sonuçlar

4.2.2.1. XRD Analizi

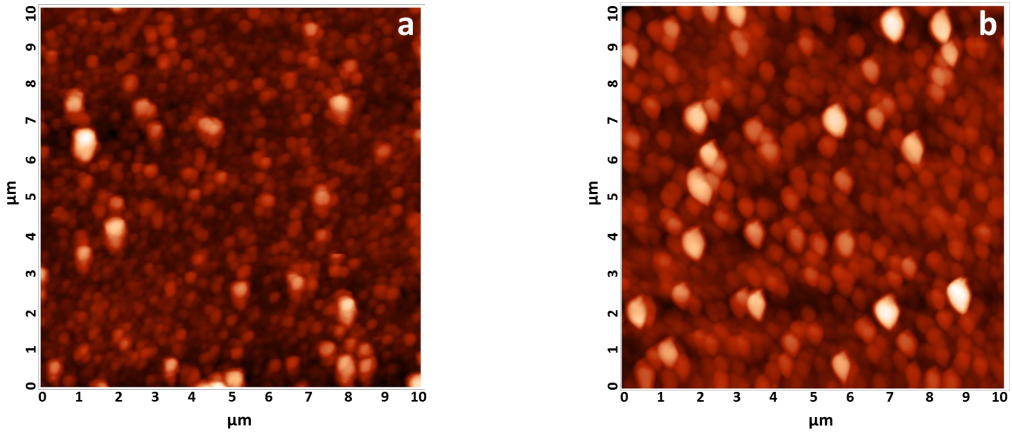
Şekil 4.12 de, sırasıyla 72000 ve 90000 laser pulse sayısı ile deposit edilmiş ZnO4 ve ZnO5 ince filmlerin XRD spektrumları verilmektedir. Yukarıda da ifade edildiği gibi, oda sıcaklığındaki alt tabaka üzerine büyütülmüş ZnO ince filmler kristal formdadır ve laser puls sayısı artarken kristal yapıları gelişmiştir (Gezgin ve ark., 2017; Gezgin ve ark., 2019; Gezgin ve Kiliç, 2019; Gezgin ve Kılıç, 2019). ZnO4 ince film tek kristal forma yakın olarak büyümüşken, laser puls sayısının artışı ile birlikte üretilen ZnO5 ince filmin kristal yapısı kayda değer ölçekte iyileşmiş fakat polikristal yapıda büyümüştür. ZnO5 ince film, 2Θ=32.1^o, 34.7^o ve 36.5^o açıları üzerinde oluşmuş (100), (002) ve (101) *hkl* yönelimleri üzerinde kristalleşmiştirler. ZnO ince filmin ana kırınım piki, (002) yönelimindedir (Shaban ve ark., 2017).



Şekil 4. 12. ZnO4 ve ZnO5 ince filmlerin XRD spektrası

Scherrer yasasının kullanımı ile, ZnO4 ve ZnO5 ince filmlerin kristalin boyutu 25 nm ve 34 nm olarak bulunmuştur. Laser puls sayısının artması ile kristalin boyutunun artması, ZnO5 ince filmin kristal yapısının gelişmesini desteklemektedir.

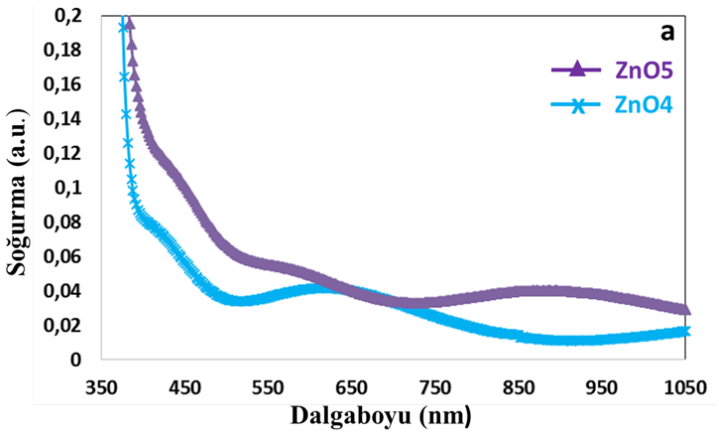
4.2.2.2. Morfolojik Analiz

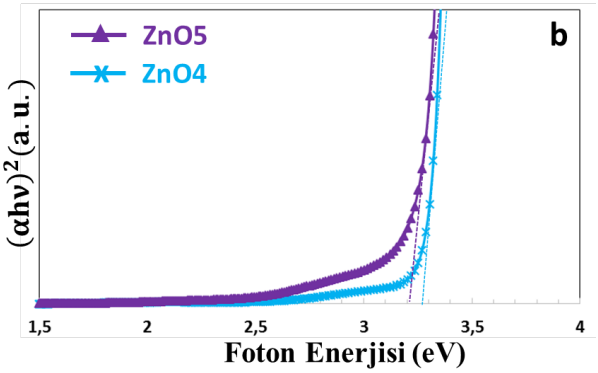


Şekil 4. 13. a) ZnO4 ve b) ZnO5 ince filmlerin 10µm×10µm alandaki AFM görüntüleri

Şekil 4.13 de verilen ZnO4 ve ZnO5 ince filmlerin AFM görüntülerine göre, laser puls sayısının artması ile ince filmin tanecik boyutunun arttığı gözlemlenmektedir. Laser puls sayısının artarken, depozisyon oranı artmış ve alt tabaka üzerine gelen ZnO atomları yan yana ve üst üste yığılma halinde birikim ve birleşme yaparak tanecik boyutunun büyümesine sağlamışlardır. Tanecik boyutunun artması ile tanecik sınır sayıları azalmıştır. Böylece, tanecik sınırları içerisinde rekombinasyon noktası gibi görev yapan ve diyotların verimini olumsuz yönde etkileyen kusur ve tuzaklar pasifleştirilmesine olanak sağlanmıştır (Gezgin ve ark., 2019; Gezgin ve Kiliç, 2019).

4.2.2.3. Optik Analiz



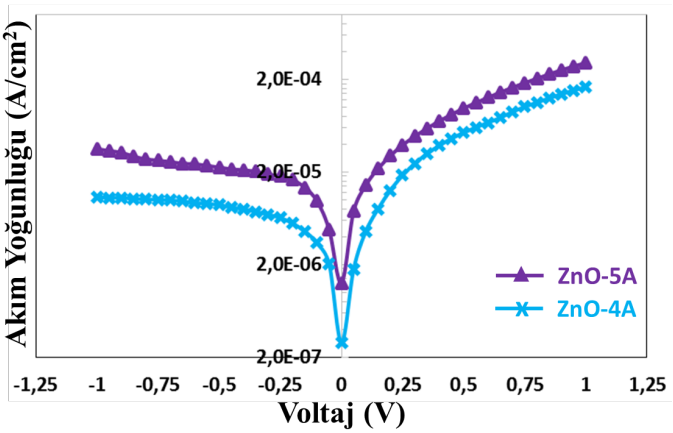


Şekil 4. 14. ZnO4 ve ZnO5 ince filmlerin a) soğurma spektrumu ve b) Tauc grafiği

Şekil 4.14a. da verilen soğurma spektrumuna göre, ZnO4 ince film görünür bölgede bir miktar foton soğururken, yakın kızıl ötesi (NIR) bölgede foton iletimi sergilemiştir. ZnO5 ince film ise, ZnO4 ince filmden farklı olarak görünür bölgede foton iletirken NIR bölgesinde bir miktar foton soğurmuştur. ZnO5 ince film TCO yarıiletken olarak daha ideal bir optik özellik gösterme eğilimindedir. Her iki ince filmde, genel olarak düşük foton soğurumu göstermekte olup daha çok foton iletimine yönelik özellik göstermektedir.

Tauc denklemi kullanarak, ZnO-4A ve ZnO-5A diyotların Şekil 4.14b deki Tauc grafikleri çizdirilmiştir. Tauc grafiğine göre, ZnO4 ve ZnO5 ince filmlerin Eg değerleri sırasıyla, 3.28 eV (Ramelan ve ark., 2017) ve 3.21 eV (Paul ve ark., 2014) olarak elde edilmiştir ve bu değerler literatürde rapor edilen ZnO değerleri ile uyumlu bulunmuştur.

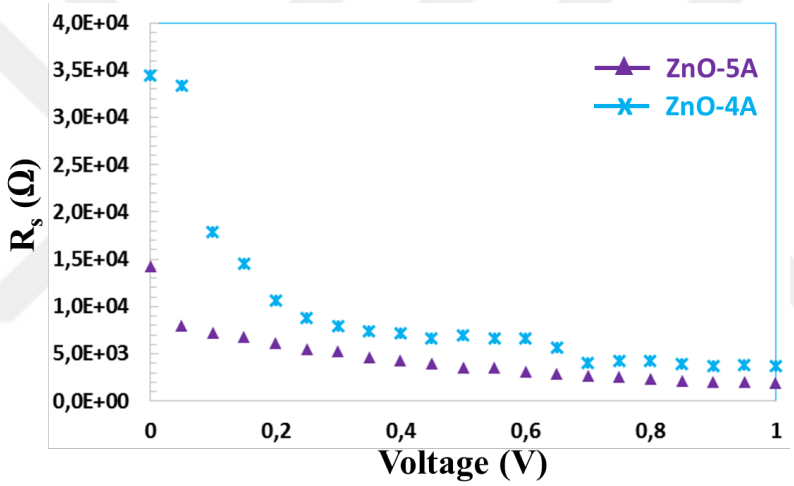
4.2.2.4. Ag/n-ZnO/p-Si/Al Heteroeklem Diyotların Karanlık Ortamdaki Elektriksel Özellikleri



Şekil 4. 15. ZnO-4A ve ZnO-5A diyot yapılarının karanlık ortamdaki logaritmik J-V karakteristiği

Şekil 4.15 de, sırasıyla ZnO4 ve ZnO5 ince filmlere dayalı olarak üretilen ZnO-4A ve ZnO-5A heteroeklem diyotların logaritmik J-V karakteristiği verilmiştir. ZnO-4A

ve ZnO-5A diyotlarının doğrultma oranları (RR) sırasıyla 8.54 ve 15.54 olarak hesaplanmış olup ZnO-5A diyotunun daha iyi doğrultma sergilediği gözlemlenmiştir. ZnO-4A ve ZnO-5A diyotlarının idealiy faktörleri (**n**) ve Bariyer yükseklikleri (Φ_B) sırasıyla, 3.74 ve 5.29; 0.66 eV ve 0.64 eV olarak hesaplanmıştır. Laser puls sayısının artması ile beraber ZnO5 ince filmin kalınlığındaki artış,ZnO-5 ince filmin kristal yapısının daha iyi olmasına bu ince film içerisinde daha az tuzak ve kusur yapılarının oluşmasına ve dolayısıyla elektroların bu tuzak noktalarda rekombinasyona çok fazla maruz kalmadan ilerlemesini sağlamaktadır. Böylece, ZnO5 ince film içerisinde hareket eden elektronların ortalama yolu, yoğunluğu ve hareketliliği artmaktadır. Bu durum, ZnO-5A diyotunun doğrultma oranının artmasına sebep olmaktadır (Habubi ve Mousa, 2015; Nasir ve Abass, 2016).

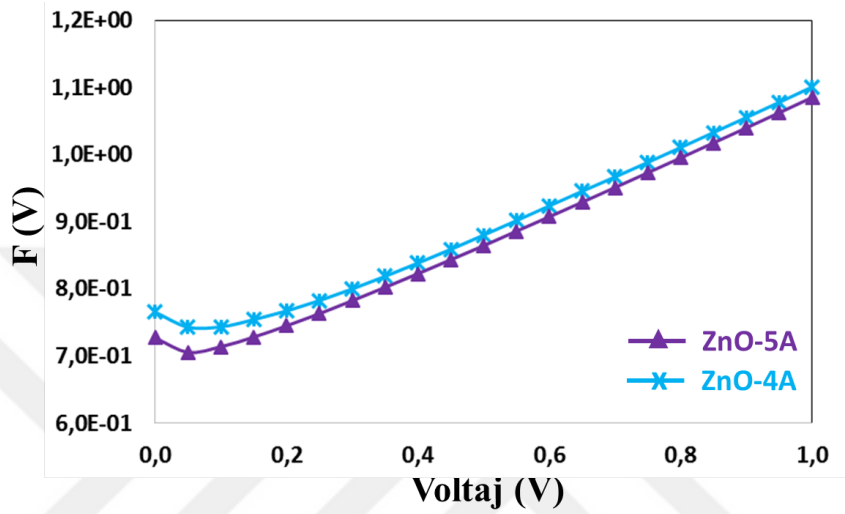


Şekil 4. 16. Karanlık ortamda ZnO-4A ve ZnO-5A heteroeklemlerin seri direncinin uygulanan voltaja bağlı grafiği

Şekil 4.16 da, ZnO-5A ve ZnO-4A heteroeklem diyotlarının karanlık ortamdaki seri dirençlerinin uygulanan voltaja bağlı grafikleri verilmektedir. İleri biastaki voltajın akıma oranından, ZnO-4A diyotunun seri direnci R_s=3.76 kΩ olarak ve ZnO-5A diyotunun seri direnci R_s=2.01 kΩ olarak hesaplanmıştır (Tablo 4.3). ZnO-4A diyotunun seri direncinin yüksek olması, ZnO4 ince filmin kristal yapısının bir miktar zayıf olmasından dolayı ince film içerisinde kusur ve tuzak sayıların bulunması ve elektronları bu tuzaklar içerisinde rekombinasyon olayına maruz kalmasına dayandırılabilir (Kumar ve ark., 2013; Ismail ve ark., 2019). Bu yol ile elektronların ortalama serbest yolu azalacağı için yük akımı sınırlı kalır ve seri direnç değeri yükselir. Genel olarak ZnO diyotların seri dirençlerin bir miktar yüksek olması ise, ZnO ve Si yarıiletkenleri arasındaki kafes uyumsuzluğu ve kontak direncine dayandırılmaktadır.

Tablo 4. 3. Karanlık ortamda ZnO-4A ve ZnO-5A diyotlarının elektriksel parametreleri

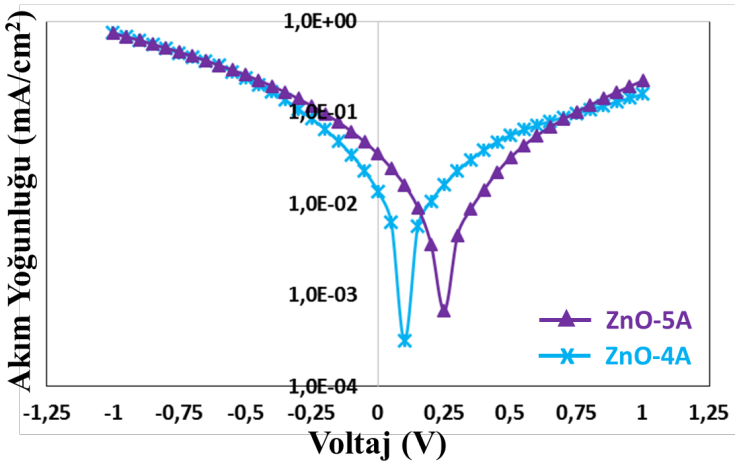
ZnO/Si heteroeklem diyotlar	J-V Metotu			Norde Metotu	
	dln(J)-V			F(V)	
	n	R_s (kΩ)	Φ_b(eV)	R_s (kΩ)	Φ_b (eV)
ZnO-4A	3.74	3.76	0.66	3.76	0.74
ZnO-5A	5.29	2.01	0.64	2.43	0.68



Şekil 4. 17. ZnO-4A ve ZnO-5A heteroeklem diyotların F(V)-V karakteristiği

Şekil 4.17 de, Norde metodu kullanarak ZnO-4A ve ZnO-5A heteroeklem diyotlarına ait çizdirilmiş F(V)-V karakteristiği verilmektedir. Norde metodu ile(Norde, 1979), ZnO-4A diyotunun seri direnci R_s=3.76 kΩ ve bariyer yüksekliği Φ_B=0,74 eV; ZnO-5A diyotunun R_s=2.43 kΩ ve bariyer yüksekliği Φ_B=0,68 eV olarak hesaplanmıştır. Geleneksel J-V grafiği ve Norde metotları kullanarak, her iki diyotun seri dirençleri birbirleri ile çok uyumlu bulunmuştur. Norde metodu ile iki diyotun bariyer yükseklikleri, geleneksel J-V metoda kıyasla büyük bulunmuştur. Bu duruma karşılık, her iki metot ile ZnO-4A diyotunu Φ_B değeri büyük, ZnO-5A diyotunki küçük değerde bulunmuş olup uyumlu sonuç vermiştir.

4.2.2.5. Ag/n-ZnO/p-Si/Al Heteroeklem Diyotların Aydınlık Ortamdaki Fotovoltaik Özellikleri



Şekil 4. 18. ZnO-4A ve ZnO-5A heteroeklem diyotların ışık altındaki J-V karakteristiği

Şekil 4.18 de, ZnO-4A ve ZnO-5A heteroeklem diyotların ışık altında elde edilen J-V karakteristiği ve Tablo 4.4.de bu diyotların hesaplanmış fotovoltaik parametreleri verilmektedir. ZnO-4A diyotu J_{sc}=0.013mA/cm2, V_{oc}= 100 mV, FF=0.22 η=%0.00039'lik fotovoltaik parametrelere sahipken, ZnO-5A diyotun parametreleri J_{sc}=0.035 mA/cm2, V_{oc}= 250 mV, FF=0.18 η=%0.002 dir (Tablo 4.4.). ZnO-5A diyotunu oluşturan, ZnO-5 ince filmin daha gelişmiş kristal yapısından dolayı (film) içerisindeki foto uyarım ile oluşan elektronlar, tuzak ve kusurlara çok fazla maruz kalmadan yüksek yoğunlukta ve hareketlilikte yol aldığı için, diyottaki foto akım ve yük toplanması yüksektir. Bu durum, J_{sc} değerinin artmasına sebep olur. Ayrıca, ZnO-5A diyotun seri direncinin, ZnO-4A diyotuna göre küçük olması ZnO-5A diyotunun J_{sc}, V_{oc} ve η değerlerinin yüksek çıkmasına sebep olur (Habubi ve Mousa, 2015; Al-Maiyaly ve ark., 2018).

Tablo 4. 4. Işık altındaki ZnO-4A ve ZnO-5A heteroeklem diyotların fotovoltaik parametreleri

Diyotlar	***J_{sc}***	***V_{oc}***	***FF***	***η***
ZnO-4A	0.013 mA/cm^2	100 mV	0.22	%0.00039
ZnO-5A	0.035 mA/cm^2	250 mV	0.18	%0.002

ZnO-4A ve ZnO-5A diyotları, aydınlık ortamda ideal bir fotovoltaik özellik sergileyememektedirler. Bu zayıf fotovoltaik davranış, ZnO ince filmlerin istenilen kristal yapıya ulaşamaması ve dolayısıyla ince filmler içerisinde kısmen rekombinasyon (elektron ve deşiklerin yeniden birleşmesi olayı) noktalarının bulunması, Al kontağın

kaplanması aşamasında sorunların yaşanması dolayısıyla ideal bir arka ohmik kontağın oluşamaması ve yük geçişin sınırlı kalması, ZnO ve Si yarıiletken arasındaki uyumsuz kafes yapısı, Si üzerinde oksijen gaz basıncından kaynaklı SiO_x tabakasının oluşması ve arayüzey durumları gibi faktörlere dayandırılabilir.

Ag/n-ZnO/p-Si/Au diyotları, Ag/n-ZnO/p-Si/Al heterokeklem diyotlarına göre genel olarak daha yüksek akım ve gün dönüşüm verimi göstermiştir. Bu durum, arka kontak olarak depozit edilen Au ve Al kontakların direncine dayandırılmaktadır. p-Si yarıiletken için, arka kontağı ohmik davranış sergilemesi için metalin iş fonksiyonun (ϕ_m) yarıiletkeninin iş fonksiyonundan (ϕ_s) daha büyük olması gereklidir ($\phi_m > \phi_s$). Au metalin iş fonksiyonunun (5.1 eV), Al metalin iş fonksiyonundan (4.06 eV) büyük olması neticesi ile, Au metali p-Si yarıiletken (5.00 eV) için daha ohmik davranış sergilemektedir. Böylece, Ag/n-ZnO/p-Si/Au heteoeklemin diyotun kontaklarında daha fazla yük toplanabilmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu yüksek lisans tez çalışmasında PLD tekniği kullanarak 1.3×10^{-1} mbar oksijen gaz basıncı içerisinde 1800, 3600 ve 5400 laser puls sayısına bağlı olarak sırasıyla 41 nm, 70 nm ve 97 nm kalınlığında ZnO1, ZnO2 ve ZnO3 ince filmler üretilmiştir. Oda sıcaklığındaki alt tabaka üzerine depozit edilmiş tüm ZnO ince filmler polikristal yapıdadırlar. 5400 laser puls sayısı ile üretilmiş ve 300ºC sıcaklıkta tavlanmış ZnO3-tav ince film amorf yapıya yakın bir kristal özellik gösterdiği için diyot üretimi için uygun görülmemiştir. Laser puls sayısı artarken, ZnO ince filmlerin tanecik boyutu artmış, kristal yapıları gelişmiş ve band aralığı azalmıştır. Bu ZnO1, ZnO2 ve ZnO3 ince filmlerin p-Si wafer üzerine büyütülmesi ile sırasıyla ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A p- n heteroeklem diyot yapıları (Ag/n-ZnO/p-Si/Au) üretilmiştir. ZnO-1A diyotunun ideality faktörü ve seri direnci en yüksek değeri sahipken, ZnO-2A diyotunun bu değerleri diğer iki diyota göre düşüktür. Ayrıca, ZnO-2A diyotunun bariyer yüksekliği en yüksek değerde ZnO-1A diyotununki en küçük değerdedir. Geleneksel J-V eğrisi, Cheung-Cheung ve Norde metotları kullanılarak, ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A diyotlarının ideality faktörü, bariyer yüksekliği ve seri direncindeki düşüş ve yükselişleri birbirleri ile uyumlu bulunmuştur.

ZnO-1A, ZnO-2A ve ZnO-3A diyotları, aydınlık ortamda fotovoltaik özellik göstermişlerdir. ZnO-1A diyotu düşük J_{sc} değeri ve güç dönüşüm verimi sergilemiş olup bu durum ZnO1 ince filmin zayıf kristal yapıya sahip olmasına ve yük taşıyıcıların tanecik sınırları içerisindeki tuzak noktalarında rekombinasyona uğramasına dayandırılmaktadır. ZnO-3A diyotu ise, diğer iki diyota kıyasla daha iyi fotovoltaik özellik göstermiştir. ZnO3 ince filmin kristal yapısının gelişmesi ile diyot içerisindeki yük hareketliği ve yoğunluğu yükselerek deplasyon bölgesinde yük toplanması artmıştır. Ayrıca, ZnO ince filmlerin kalınlığının artması ile bant aralıkları azaldığı için, n-ZnO/p-Si heteroeklem diyotları arasındaki yük geçişleri artma eğilimine girer. Bu faktörler, ZnO-3A diyotunun J_{sc} ve güç dönüşüm veriminde artışa katkı sağlamıştır.

6.0×10^{-2} mbar oksijen gaz basıncı içerisinde 72000 ve 90000 laser puls sayısı ile oda sıcaklığındaki SLG üzerine sırasıyla 240 ve 300 nm kalınlığında ZnO4 ve ZnO5 ince filmler üretilmiştir. Laser puls sayısı artarken ince filmlerin tanecik boyutu ve kalınlığı artmış, kristal yapıları gelişmiş ve bant aralıkları azalmıştır. ZnO4 ince film tek

kristal formda iken ZnO5 ince film polikristal yapıdadır. ZnO4 ve ZnO5 ince filmler p-Si wafer üzerine büyütülerek ZnO-4A ve ZnO-5A heteroeklem diyot yapıları (Ag/n-ZnO/p-Si/Al) üretilmiştir. ZnO-4A diyotun ideality faktörü ZnO-5A diyotuna göre küçük, bariyer yüksekliği ve seri direnci daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca Norde metodu kullanarak, geleneksel J-V metoduna çok yakın seri direnç değerleri hesaplanmış ve yine ZnO-4A için yüksek ve ZnO-5A diyotu için düşük bariyer yükseklikleri elde edilmiştir. Aydınlık ortamda, her iki diyot fotovoltaik davranış sergilemiştir. Daha gelişmiş kristal yapıya sahip ZnO5 ince film ile üretilmiş ZnO-5A diyotu ZnO-4A diyotuna kıyasla daha yüksek J_{sc} ve güç dönüşüm verimi göstermiştir. Yukarıdaki ifade edilen çalışmada da açıklandığı gibi, ZnO5 ince filmin tanecik sınır sayılarının azalması ile rekombinasyon noktaları azaldığı için diyotun deplasyon bölgesinde toplanan yük sayısı yükselmiştirBöylece, ZnO-5A diyotu ZnO-4A diyotuna göre daha iyi bir fotovoltaik özellik göstermiştir.

Ag/n-ZnO/p-Si/Au diyotları, Ag/n-ZnO/p-Si/Al heteroeklem diyotlarına göre genel olarak daha güçlü fotovoltaik davranış sergilemiştir. Bu durum, Au metalin iş fonksiyonunun (5.1 eV), Al metalin iş fonksiyonundan (4.06 eV) büyük olmasına ve Au metalinin p-Si yarıiletken (5.00 eV) için daha ohmik davranış sergilemesine dayandırılmaktadır.

Genel olarak yüksek seri dirence sahip olan ZnO/Si heteroeklem diyotların karanlık ortamdaki ideality faktörleri, bariyer yüksekliği ve seri dirençlerinin yüksek olması ve aydınlık ortamdaki J_{sc}, V_{oc}, FF ve η fotovoltaik parametrelerinin yüksek olması; ZnO ve Si yarıiletkenler arasındaki kafes uyumsuzluğu, homojen olmayan arayüzey, arayüzey yüklerin heterojen dağılımı, Si wafer üzerinde oksijenden kaynaklı SiO_x tabakasının oluşması, iki yarıiletken arasındaki yük enjeksiyonun sınırlı olması gibi ve kontak dirençlerine dayandırılmaktadır.

5.2 Öneriler

Bu yüksek tez çalışmasında elde edilen sonuçlar neticesinde, ZnO/Si heteroklem diyotları, karanlık ve aydınlık ortamda zayıf elektriksel ve fotovoltaik özellik göstermişlerdir. Bu durum, ZnO ince filmlerin ideal sayılabilecek kristal yapıda olmamaları ve arka kontakların ohmik davranış sergileyememiş olmasına dayandırılmaktadır. n-ZnO/p-Si heteroeklem diyotların daha ideal elektriksel ve fotovoltaik özellik gösterebilmesi için;

- ZnO ince filmlerin kristal yapıları iyileştirilmeli ve morfolojik ve optik özellikleri geliştirilmelidir. Daha ideal nitelikte ZnO ince film büyütmek için, oksijen gaz basıncı, hedef alt tabaka arası uzaklık, laser akısı ve alt tabaka sıcaklığının fonksiyonu olarak ZnO ince film üretim çalışmaları gerçekleştirilmelidir.

- ZnO ince film içerisine Ag ve Al nano parçacıkları doping ederek ZnO ince filmin elektriksel, morfolojik ve optik özellikleri iyileştirilmelidir.

- Arka kontağın ohmik davranış göstermesi için, iş fonksiyonu p-Si waferın iş fonksiyonundan daha yüksek metal kontaklar üretilmeli ve bu metal kontakların ohmik davranış sergilemesi için ideal sıcaklıkta tavlanmalıdırlar.

- Üzerlerinde daha fazla yük toplanması amacı ile, üst ve alt kontakların kalınlıkları arttırılmalıdır.

- Deplasyon bölgesinde daha fazla yük toplanması ve J_{sc} değerinin artması için, p-Si etchlenmeli ve deplasyon bölgesinin uzunluğu arttırılmalıdır.

KAYNAKLAR

Ajimsha, R., 2008, Growth and Characterization of ZnO based Heterojunction diodes and ZnO Nanostructures by Pulsed Laser Ablation, *Thesis submitted to Cochin University of Science and Technology for the …*.

Al-Asadi, A. S., Henley, L. A., Ghosh, S., Quetz, A., Dubenko, I., Pradhan, N., Balicas, L., Perea-Lopez, N., Carozo, V. ve Lin, Z., 2016, Fabrication and characterization of ultraviolet photosensors from ZnO nanowires prepared using chemical bath deposition method, *Journal of Applied Physics*, 119 (8), 084306.

Al-Hardan, N., Jalar, A., Hamid, M. A., Keng, L. K., Ahmed, N. ve Shamsudin, R., 2014, A wide-band UV photodiode based on n-ZnO/p-Si heterojunctions, *Sensors and Actuators A: Physical*, 207, 61-66.

Al-Maiyaly, B. K., Hussein, B. H., Salih, A. A., Shaban, A. H., Mahdi, S. H. ve Khudayer, I. H., 2018, Synthesis and characterization study of n-Bi2O3/p-Si heterojunction dependence on thickness, *AIP Conference Proceedings*, 030046.

Altamura, G., 2014, Development of CZTSSe thin films based solar cells.

Arora, A., 2016, Synthesis of Undoped and Aluminium Doped Zno based Thin Film by Sol Gel Method, DOI.

Bedia, F., Bedia, A., Benyoucef, B. ve Hamzaoui, S., 2014, Electrical characterization of n-ZnO/p-Si heterojunction prepared by spray pyrolysis technique, *Physics Procedia*, 55, 61-67.

Behera, J. K., 2009, Synthesis and Characterizations of ZnO Nanoparticles.

Bo, H., Quan, M. Z., Jing, X., Lei, Z., Sheng, Z. N., Feng, L., Cheng, S., Ling, S., Yue, Z. C. ve Shan, Y. Z., 2009, Characterization of AZO/p-Si heterojunction prepared by DC magnetron sputtering, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 12 (6), 248-252.

Chala, S., 2017, تصوين و بحث الخلايا الشوسيت ذاث الطبقاث الرقيقت II-VI Design and investigate of II-VI thin film solar cells Conception et investigation des cellules solaires en couches minces II-VI, *UNIVERSITE DE MOHAMED KHIDER BISKRA*.

Chávez-Urbiola, I. R., Willars-Rodríguez, F., Bon, R. R., Vorobiev, P. ve Vorobiev, Y. V., 2019, Development and characterization of photodiode n-ZnO/p-Si by Radio Frecuency Sputtering, a sensor with low voltage operation and its response to visible and UV light, *Thin Solid Films*, 669, 364-370.

Chawla, V., 2011, A study of CZTS thin films for solar cell applications, *Stanford University*.

Chen, L., Chen, X., Liu, Y., Zhao, Y. ve Zhang, X., 2017, Research on ZnO/Si heterojunction solar cells, *Journal of Semiconductors*, 38 (5), 054005.

Cheung, S. ve Cheung, N., 1986, Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics, *Applied Physics Letters*, 49 (2), 85-87.

Corpus Mendoza, A. N., 2017, Influence of the p-type layer on the performance and stability of thin film silicon solar cells, *University of Sheffield*.

Dai, P., Shen, X., Lin, Z., Feng, Z., Xu, H. ve Zhan, J., 2010, Band-gap tunable (Cu2Sn) x/3 Zn 1− x S nanoparticles for solar cells, *Chemical Communications*, 46 (31), 5749-5751.

Davis, K., Yarbrough, R., Froeschle, M., White, J. ve Rathnayake, H., 2019, Band gap engineered zinc oxide nanostructures via a sol–gel synthesis of solvent driven shape-controlled crystal growth, *RSC advances*, 9 (26), 14638-14648.

Faraz, S. M., Shah, W., Alvi, N. U. H., Nur, O. ve Wahab, Q. U., 2020, Electrical Characterization of Si/ZnO Nanorod PN Heterojunction Diode, *Advances in Condensed Matter Physics*, 2020.

Fereshteh Saniee, N., 2010, Structural, electrical and optical properties of transparent conducting Si-doped ZnO thin films grown by pulsed laser deposition, *University of Birmingham*.

Flemban, T. H., 2017, High Quality Zinc Oxide Thin films and Nanostructures Prepared by Pulsed Laser Deposition for Photodetectors.

Gezgin, B., Gezgin, S. Y., Kepceoğlu, A., Gündoğdu, Y. ve KILIÇ, H. Ş., 2017, Pulslu Laser Depozisyon (PLD) yöntemi ile üretilen FTO ve ZnO ince filmlerin morfolojik ve optik özellikleri, *Selçuk-Teknik Dergisi*, 16 (3), 161-183.

Gezgin, S. Y., Houimi, A. ve Kılıç, H. Ş., 2019, Production and photovoltaic characterisation of n-Si/p-CZTS heterojunction solar cells based on a CZTS ultrathin active layers, *Optik*, 199, 163370.

Gezgin, S. Y. ve Kiliç, H. Ş., 2019, Determination of electrical parameters of ITO/CZTS/CdS/Ag and ITO/CdS/CZTS/Ag heterojunction diodes in dark and illumination conditions, *Optical and Quantum Electronics*, 51 (11), 360.

Gezgin, S. Y. ve Kılıç, H. Ş., 2019, The electrical characteristics of ITO/CZTS/ZnO/Al and ITO/ZnO/CZTS/Al heterojunction diodes, *Optik*, 182, 356-371.

Gupta, R., Ghosh, K. ve Kahol, P., 2009, Fabrication and electrical characterization of Au/p-Si/STO/Au contact, *Current Applied Physics*, 9 (5), 933-936.

Gupta, R., Ghosh, K. ve Kahol, P., 2010, Temperature dependence of current–voltage characteristics of gold–strontium titanate thin film Schottky diode, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 42 (5), 1509-1512.

Habubi, N. F. ve Mousa, A. O., 2015, Fabrication and characterization of ZnO/p-Si heterojunction solar cell, *World Scientific News*, 18, 118-132.

Husna, J., Aliyu, M. M., Islam, M. A., Chelvanathan, P., Hamzah, N. R., Hossain, M. S., Karim, M. ve Amin, N., 2012, Influence of annealing temperature on the properties of ZnO thin films grown by sputtering, *Energy Procedia*, 25, 55-61.

Hussain, B., 2017, Development of n-ZnO/p-Si single heterojunction solar cell with and without interfacial layer, *The University of North Carolina at Charlotte*.

Ingebrigtsen, M. E., 2014, Band gap engineering of the ZnO/Si heterojunction using amorphous buffer layers.

Ismail, R. A., Abeduljabbar, N. F. ve Fatehi, M. W., 2019, Effect of dipping time on the properties of Sb2S3/Si heterojunction prepared by chemical bath deposition, *Materials Research Express*, 6 (4), 045915.

Jing-Jing, M., Ke-Xin, J., Bing-Cheng, L., Fei, F., Hui, X., Chao-Chao, Z. ve Chang-Le, C., 2010, Rectifying and photovoltage properties of ZnO: A1/p-Si heterojunction, *Chinese Physics Letters*, 27 (10), 107304.

Kapatel, S., Sumesh, C., Pataniya, P., Solanki, G. ve Patel, K., 2017, Layer-engineered IV characteristics of p-Si/WS 2 Van der Waals Heterostructure diode, *The European Physical Journal Plus*, 132 (4), 191.

Koksal, N. E., Sbeta, M. ve Yildiz, A., 2019, GZO/Si Photodiodes Exhibiting High Photocurrent-to-Dark-Current Ratio, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 66 (5), 2238-2242.

Kumar, M., Kanjilal, A. ve Som, T., 2013, Effect of grain-boundaries on electrical properties of n-ZnO: Al/p-Si heterojunction diodes, *AIP Advances*, 3 (9), 092126.

Li, S., 2016, Optimization of Buffer Layer for Copper-Zinc-Tin-Sulfide-based Solar Cells, *Tallinn University of Technology*.

MAHENDRAN, R., Charecteristic Studies On Zno And Mn Doped Zno Thin Films Synthesized By Sol Gel Spin Coating Method.

Mansour, S. A. ve Yakuphanoglu, F., 2012, Electrical-optical properties of nanofiber ZnO film grown by sol gel method and fabrication of ZnO/p-Si heterojunction, *Solid State Sciences*, 14 (1), 121-126.

Nasir, E. ve Abass, M., 2016, Characterization, Morphology and Electrical Properties of Chemically Deposited Nanocrystalline PbS/Si Heterojunction Thin Films, *Chalcogenide Letters*, 13 (6), 271-279.

Norde, H., 1979, A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance, *Journal of Applied Physics*, 50 (7), 5052-5053.

Olyaee, H. G. B., Foot, P. J. ve Montgomery, V., 2015, Electrical properties and I–V characteristics of 5, 14-dihydro-5, 7, 12, 14-tetraazapentacene doped Schottky barrier diode, *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 9 (4), 315-319.

Orak, İ., Kocyiğit, A. ve Karataş, Ş., 2018, The Analysis of the Electrical and Photovoltaic Properties of Cr/p-Si Structures Using Current-Voltage Measurements, *Silicon*, 10 (5), 2109-2116.

Paul, C. A., Shree, B. S., Preethi, T., Chandrasekaran, J., Mohanraj, K. ve Senthil, K., 2019, Exploration of organic additives-assisted vanadium pentoxide (V 2 O 5) nanoparticles for Cu/nV 2 O 5/p-Si Schottky diode applications, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30 (24), 20989-20996.

Paul, S., Hossain, M. F., Islam, M. H., Raihan, M. A. ve Chakladar, S., 2014, Optical properties of ZnO thin films prepared by automatic sol-gel method, *2013 International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT)*, 1-4.

Ramelan, A., Wahyuningsih, S., Munawaroh, H. ve Narayan, R., 2017, ZnO wide bandgap semiconductors preparation for optoelectronic devices, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 012008.

Savale, P., 2016, Physical vapor deposition (PVD) methods for synthesis of thin films: A comparative study, *Arch. Appl. Sci. Res*, 8 (5), 1-8.

Shaban, M., Zayed, M. ve Hamdy, H., 2017, Nanostructured ZnO thin films for self-cleaning applications, *RSC advances*, 7 (2), 617-631.

Sharma, S. ve Periasamy, C., 2014, A study on the electrical characteristic of n-ZnO/p-Si heterojunction diode prepared by vacuum coating technique, *Superlattices and Microstructures*, 73, 12-21.

Sharma, S., Bayer, B. C., Skakalova, V., Singh, G. ve Periasamy, C., 2016, Structural, electrical, and UV detection properties of ZnO/Si heterojunction diodes, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 63 (5), 1949-1956.

Soliman, H., Farag, A., Khosifan, N. ve El-Nahass, M., 2008, Electrical transport mechanisms and photovoltaic characterization of cobalt phthalocyanine on silicon heterojunctions, *Thin Solid Films*, 516 (23), 8678-8683.

Soliman, H., Farag, A., Khosifan, N. ve Solami, T., 2012, Electronic and photovoltaic properties of Au/pyronine G (Y)/p-GaAs/Au: Zn heterojunction, *Journal of alloys and compounds*, 530, 157-163.

Soylu, M. ve Savas, O., 2015, Electrical and optical properties of ZnO/Si heterojunctions as a function of the Mg dopant content, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 29, 76-82.

Tat, P. L., bin Deraman, K., Hussin, R., Wan Shamsuri, W. N. ve Ibrahim, Z., 2014, The Structural and Surface Morphology of Annealed ZnO Films, *Advanced Materials Research*, 73-77.

Tekcan, B., 2015, Investigation of photodetectors based on iii-nitride and metal oxide thin films deposited by atomic layer deposition, *Bilkent University*.

Yang, L. L., 2010, Synthesis and Characterization of ZnO nanostructures, *Linköping University Electronic Press*.

Zhang, W., Meng, Q., Lin, B. ve Fu, Z., 2008, Influence of growth conditions on photovoltaic effect of ZnO/Si heterojunction, *Solar energy materials and solar cells*, 92 (8), 949-952.

Zhu, J., Lin, B., Sun, X., Yao, R., Shi, C. ve Fu, Z., 2005, Heteroepitaxy of ZnO film on Si (111) substrate using a 3C–SiC buffer layer, *Thin Solid Films*, 478 (1-2), 218-222.

EKLER

EK-1 Bilgilendirme-1

Bu tez çalışması Selçuk Üniversitesi Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma projeler, tarafından 20201010 nolu proje ile desteklenmektedir.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Bahri GEZGİN
Uyruğu	**:**	T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	ISPARTA, 22.06.1977
Telefon	**:**	05057892915
Faks	**:**	
e-mail	**:**	bahri3207@gmail.com

EĞİTİM

Derece	**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	Isparta Endüstri Meslek Lisesi,Isparta	1994
Üniversite	Anadolu Üniversitesi, Eskişehir	2012
Yüksek Lisans	Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya	2021

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
1996-2021	Hava Kuvvetleri Komutanlığı	Astsubay

UZMANLIK ALANI

Elektronik
Diyot
Yarıiletken
İnce film
Laser-madde etkileşim

YABANCI DİLLER

İNGİLİZCE

YAYINLAR

Ulusal hakemli dergilerde yayınlanan makaleler

Gezgin, B., Gezgin, S. Y., Kepceoğlu, A., Gündoğdu, Y. ve KILIÇ, H. Ş., 2017, Pulslu Laser Depozisyon (PLD) yöntemi ile üretilen FTO ve ZnO ince filmlerin

morfolojik ve optik özellikleri, *Selçuk-Teknik Dergisi*, 16 (3), 161-183.(**Yükseklisans Tezinden yapılmıştır**)

Hakemli dergi/konferans/sempozyumların bildiri kitaplarında yer alan yayınlar

Gezgin B., Gündoğdu Y. and Kiliç, H.Ş., (2018), Morphologıcal Crystal and Optıcal Propertıes of CdS Thın Fılms Deposıted at Dıfferent Thıcknesses by Pulsed Laser Deposıtıon, 7 th International Conference on Technologies ICAT'18 (28 April-1 May), (Poster presentation), Antalya/ Turkey.