



**BAZI NADİR TOPRAK ELEMENTİ KATKILI ZnO FİMLERİNİN ELDE
EDİLMESİ, KARAKTERİZASYONU ve HETEROEKLEM UYGULAMALARI**

DOKTORA TEZİ

Gonca İLGÜ BÜYÜK

ESKİŞEHİR 2019

**BAZI NADİR TOPRAK ELEMENTİ KATKILI ZnO FİLMLERİNİN ELDE
EDİLMESİ, KARAKTERİZASYONU ve HETEROEKLEM UYGULAMALARI**

Gonca İLGÜ BÜYÜK

DOKTORA TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Saliha ILICAN

**Eskişehir
Eskişehir Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Mayıs, 2019**

*Bu tez çalışması BAP Komisyonu tarafından kabul edilen 1501F032 no.lu proje
kapsamında desteklenmiştir.*

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Gonca İLGÜ BÜYÜK'ün "Bazı Nadir Toprak Elementi Katkılı ZnO Filmlerinin Elde Edilmesi, Karakterizasyonu ve Heteroeklem Uygulamaları" başlıklı tezi 05/04/2019 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Fizik Anabilim dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

<u>Jüri Üyeleri</u>	<u>Ünvanı Adı Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Tez danışmanı)	: Prof. Dr. Saliha ILICAN	
Üye	: Prof. Dr. Yasemin ÇAĞLAR	
Üye	: Doç. Dr. Murat ERDEM	
Üye	: Prof. Dr. Gökhan SAVAROĞLU	
Üye	: Doç. Dr. Hanife SARAÇOĞLU	

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ÖZET

BAZI NADİR TOPRAK ELEMENTİ KATKILI ZnO FİMLERİNİN ELDE EDİLMESİ, KARAKTERİZASYONU ve HETEROEKLEM UYGULAMALARI

Gonca İLGÜ BÜYÜK

Fizik Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mayıs, 2019

Danışman: Prof. Dr. Saliha ILICAN

Bu tez çalışmasında, sol jel yöntemi kullanılarak spin kaplama tekniği ile Lantan (La), Evropiyum (Eu) ve Erbiyum (Er) katkı ZnO filmleri elde edilmiştir. Filmlerin kristallliği ve yüzey morfolojisi sırasıyla, X-ışını kırınım (XRD) cihazı ve alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ile analiz edilmiştir. Filmlerin XRD desenlerinden, kristallenme boyutu, dislokasyon yoğunluğu, örgü parametreleri, kristal yapıdaki deformasyon ve gerilim gibi yapısal parametreler hesaplanmıştır. SEM görüntülerinden, film yüzeylerinin çatlaklar ve gözenekler olmadan homojen olarak kaplandığı gözlenmiştir. Elde edilen filmlerin SEM görüntüleri, ImageJ programı kullanılarak analiz edilmiştir. Yüzey haritaları çizilmiş ve tane boyutu, tane sınırları ve yüzey pürüzlülüğü belirlenmiştir. Filmlerin optik özellikleri, UV-vis spektrofotometresi ile ölçülen difüz yansıma spektrumları kullanılarak incelenmiştir. Optik bant aralığı değerleri, diferansiyel yansıma ve Kubelka-Munk teorisi kullanılarak belirlenmiştir. Yapısal, morfolojik, optik parametreler belirlendikten sonra, elde edilen tüm filmler kullanılarak, $Au/p-Si/n-ZnO/Al$, $Au/p-Si/n-ZnO:La/Al$, $Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al$ ve $Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al$ heteroeklem yapıları üretilmiştir. Bu heteroeklemlerin -2V ile +2V aralığında akım-voltaj ($I-V$) ölçümleri alınmış, elektriksel karakterizasyonları araştırılmıştır. $I-V$ ölçümlerinden, bu heteroeklemlerin doğrultucu özelliğe sahip oldukları belirlenmiştir. Heteroeklem diyotların idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri farklı metotlar kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca, farklı aydınlatma şiddetlerinde (20-100mW/cm²) $I-V$ ölçümleri yapılarak, fotodiyot özellikleri incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Nadir toprak elementi, ZnO, Sol jel spin kaplama, $p-n$ heteroeklem, Fotodiyot.

ABSTRACT

PREPARATION, CHARACTERIZATION and HETEROJUNCTION APPLICATIONS of ZnO FILMS DOPED with SOME RARE EARTH ELEMENTS

Gonca ILGU BUYUK

Department of Physics

Eskisehir Technical University, Graduate Education Institute, May, 2019

Supervisor: Prof. Dr. Saliha ILICAN

In this thesis, Lanthanum (La), Europium (Eu) and Erbium (Er) doped ZnO films were prepared by sol gel method using spin coating technique. The crystallinity and surface morphologies of the prepared films were examined by X-ray diffraction (XRD) pattern and field emission scanning electron microscopy (FE-SEM), respectively. The structural parameters such as crystallite size, dislocation density, lattice parameters, strain and stress were calculated from XRD patterns of the films. From the SEM images, it was observed that the film surfaces were well-coated homogeneously without cracks and pores. SEM images of the prepared films were analyzed using the ImageJ program. Surface plots were drawn and grain size, grain boundaries and surface roughness were determined. The optical properties of the films were studied using the diffuse reflectance spectra measured by UV-vis spectrophotometer. The optical band gap values were determined using differential reflectance and Kubelka-Munk theory. After the structural, morphological and optical parameters were determined, the *Au/p-Si/n-ZnO/Al*, *Au/p-Si/n-ZnO:La/Al*, *Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al* and *Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al* heterojunction structures were fabricated using these films. The electrical characterization of these heterojunctions were investigated by current-voltage (*I-V*) measurements between -2V and +2V. From the *I-V* results, it was determined that these heterojunctions have rectifying properties. The ideality factor, barrier height and series resistance of the diodes were calculated by using different methods. In addition, the *I-V* measurements were performed at different illuminations (20-100mW/cm²) and their photodiode properties were investigated.

Keywords: Rare earth element, ZnO, Sol gel spin coating, *p-n* heterojunction, Photodiode.



Kızım Deren İzgü'ye

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca kendimi her zaman şanslı hissetmeme sebep olan, birikimlerini, manevi desteğini, yardımlarını, ilgisini ve şefkatini benden esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Saliha ILICAN’a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında yönlendirmeleri, destekleri ve tecrübeleriyle her zaman yardımcı olan, sorunlarımda rahatlıkla başvurabildiğim Prof. Dr. Yasemin ÇAĞLAR ve Prof. Dr. Müjdat ÇAĞLAR’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme jürimde bulunan ve her zaman pozitif yaklaşımıyla beni rahatlatan, bilgi birikimiyle destek olmaya çalışan Doç. Dr. Murat ERDEM’e teşekkürlerimi sunarım.

Uzakta olsa da manevi desteğini ve bana olan güvenini her zaman üzerimde hissettiğim, sayın hocam Doç. Dr. Hanife SARAÇOĞLU’na teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca beni destekleyen, bu süreci keyifli ve daha verimli geçirmemi sağlayan arkadaşlarım Sibel YURTSEVER ve Büşra AVCI’ya teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca maddi, manevi desteklerini her zaman üzerimde hissettiğim, yapabileceğime olan inançları ile beni motive eden Annem, Babam ve Kardeşlerime sonsuz teşekkürler. Bu ailenin bireyi olmaktan her zaman gurur duydum ve ömrümün sonuna kadar da duyacağım.

Ne zaman kendime olan güvenimi kaybetsem, pes etsem, yorulsam hep yanımda ve destekçim olan, bıkmadan usanmadan beni motive eden sevgili eşim, hayat arkadaşım Hüseyin Aydın BÜYÜK’e sonsuz teşekkürler.

Çok küçük olsa da, bana verdiği desteğin farkında olmasa da minik kızım Deren İzgü, iyi ki geldin hayatıma, desteğin paha biçilemez, sonsuz teşekkürler.

Saygılarımla

Gonca İLGÜ BÜYÜK

Mayıs, 2019

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....
Gonca İLGÜ BÜYÜK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI.....	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BELGESİ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
TABLOLAR DİZİNİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
GÖRSELLER DİZİNİ.....	xviii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
1. GİRİŞ ve AMAÇ.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür Özeti.....	2
1.3. Amaç ve Önem.....	11
2. TEORİK BİLGİLER.....	13
2.1. Çinko Oksitin Genel Özellikleri.....	13
2.2. Nadir Toprak Elementlerinin Genel Özellikleri.....	15
2.3. Sol Jel Yöntemi.....	17
2.3.1. Sol jel yöntemi ile film kaplama teknikleri.....	18
2.4. Yarıiletkenlerin Genel Özellikleri.....	22
2.4.1. Katkılı yarıiletkenler.....	23
2.4.1.1. <i>n-tipi yarıiletkenler</i>	23
2.4.1.2. <i>p-tipi yarıiletkenler</i>	24
2.5. p-n Eklem Diyotlar.....	25
2.6. Metal-Yarıiletken Kontaklar.....	30
2.7. Doğrultucu ve Omik Kontaklar.....	31
2.7.1. <i>p-tipi yarıiletken/metal omik kontak</i>	32
2.7.2. <i>n-tipi yarıiletken/metal omik kontak</i>	34
2.8. Yarıiletkenlerin Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi.....	35

	<u>Sayfa</u>
2.9. Yarıiletkenlerin Morfolojik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	38
2.10. Yarıiletkenlerin Optik Özelliklerinin Belirlenmesi	41
2.11. Yarıiletkenlerin Elektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi.....	43
2.11.1. <i>p-n</i> eklem diyotlarının akım voltaj karakteristiği.....	44
2.11.2. <i>p-n</i> eklem diyotlarının aydınlatma altında akım voltaj karakteristiği.....	46
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	49
3.1. Giriş.....	49
3.1.1. Si alttaş temizliği.....	49
3.1.2. Çözelti hazırlama.....	50
3.1.3. Katkısız ve katkılı filmlerin elde edilmesi.....	51
3.1.4. Diyotların fabrikasyonu.....	52
3.1.5. Elde edilen film ve heteroeklem diyotların karakterizasyonunda kullanılan cihazlar.....	56
4. DENEYSEL VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	60
4.1. Katkısız ve La, Eu, Er Katkılı ZnO Filmlerinin Yapısal Özellikleri.....	60
4.1.1. Katkısız ve La katkılı ZnO filmlerinin yapısal özellikleri.....	60
4.1.2. Katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerinin yapısal özellikleri.....	62
4.1.3. Katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerinin yapısal özellikleri.....	63
4.2. Katkısız ve La, Eu, Er Katkılı ZnO Filmlerinin Morfolojik Özellikleri...	66
4.2.1. Katkısız ve La katkılı ZnO filmlerinin morfolojik özellikleri.....	66
4.2.2. Katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerinin morfolojik özellikleri.....	71
4.2.3. Katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerinin morfolojik özellikleri....	76
4.3. Katkısız ve La, Eu, Er Katkılı ZnO Filmlerin Optik Özellikleri.....	82
4.3.1. Katkısız ve La katkılı ZnO filmlerinin optik özellikleri.....	82
4.3.2. Katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerinin optik özellikleri.....	85
4.3.3. Katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerinin optik özellikleri.....	89
4.4. <i>Au/p-Si/n-ZnO/Al</i> , <i>Au/p-Si/n-ZnO:La/Al</i> , <i>Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al</i> ve <i>Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al</i> Heteroeklem Diyotlarının Elektriksel Karakterizasyonları.....	93
4.4.1. <i>Au/p-Si/n-ZnO:La/Al</i> heteroeklem diyotlarının <i>I-V</i> grafikleri ve diyot parametreleri.....	93

4.4.2. <i>Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al</i> heteroeklem diyotlarının <i>I-V</i> grafikleri ve diyot parametreleri.....	98
4.4.3. <i>Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al</i> heteroeklem diyotlarının <i>I-V</i> grafikleri ve diyot parametreleri.....	103
4.4.4. <i>Au/p-Si/n-ZnO/Al</i> <i>Au/p-Si/n-ZnO:La/Al</i> ve <i>Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al</i> heteroeklem diyotlarının farklı aydınlatma şiddetleri altında <i>I-V</i> karakteristikleri.....	108
4.4.4.1. <i>Au/p-Si/n-ZnO:La/Al</i> heteroeklem diyotlarının farklı aydınlatma şiddetleri altında <i>I-V</i> karakteristikleri.....	108
4.4.4.2. <i>Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al</i> heteroeklem diyotlarının farklı aydınlatma şiddetleri altında <i>I-V</i> karakteristikleri.....	111
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	114
KAYNAKLAR.....	123
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLER DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1.1. Literatürde sol jel metodu ile elde edilen La, Eu, Er katkılı ZnO filmlerinin çözelti parametreleri.....	3
Tablo 1.2. Literatürde sol jel metodu ile elde edilen La, Eu, Er katkılı ZnO filmlerinin depolama parametreleri.....	4
Tablo 2.1. Metal-yarıiletken kontaklarda malzemelerin iş fonksiyonlarına göre kontak yapısı.....	32
Tablo 2.2. Büyütme oranı ve taranan alan arasındaki ilişki.....	40
Tablo 3.1. Elde edilen filmlere ait film kodları ve çözeltilerin kütlece katkı miktarları.....	51
Tablo 3.2. Elde edilen filmler kullanılarak fabrikasyonu yapılan heteroeklem diyotların kodları.....	56
Tablo 4.1. Elde edilen katkısız ve La katkılı ZnO filmlerinin (002) yönelimine ait yapısal parametreleri.....	61
Tablo 4.2. Elde edilen katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerinin (002) yönelimine ait yapısal parametreleri.....	63
Tablo 4.3. Elde edilen katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerinin (002) yönelimine ait yapısal parametreleri.....	65
Tablo 4.4. Elde edilen katkısız ve La katkılı ZnO filmlerinin ortalama tane boyutları ve ortalama yükselti değerleri.....	69
Tablo 4.5. Elde edilen katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerinin ortalama tane boyutları ve ortalama yükselti değerleri.....	76
Tablo 4.6. Elde edilen katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerinin ortalama tane boyutları ve ortalama yükselti değerleri.....	80
Tablo 4.7. Elde edilen katkısız ve La katkılı ZnO filmlerinin diferansiyel yansıma ve Kubelka-Munk teorisi kullanılarak hesaplanan E_g değerleri.....	84
Tablo 4.8. Elde edilen katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerinin diferansiyel yansıma ve Kubelka-Munk teorisi kullanılarak hesaplanan E_g değerleri.....	87

Tablo 4.9.	Elde edilen katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerinin diferansiyel yansıma ve Kubelka-Munk teorisi kullanılarak hesaplanan E_g değerleri.....	91
Tablo 4.10.	$Au/p-Si/n-ZnO:La/Al$ heteroeklem diyotları için farklı yöntemlerle hesaplanan diyot parametreleri.....	96
Tablo 4.11.	$Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al$ heteroeklem diyotları için farklı yöntemlerle hesaplanan diyot parametreleri.....	101
Tablo 4.12.	$Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al$ heteroeklem diyotları için farklı yöntemlerle hesaplanan diyot parametreleri.....	104
Tablo 4.13.	$Au/p-Si/ZnO:La/Al$ fotodiyotları için elde edilen m değerleri.....	110
Tablo 4.14.	$Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al$ fotodiyotları için elde edilen m değerleri.....	112

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. ZnO'nun farklı kristallenme biçimleri a) hekzagonal wurtzite b) kübik çinko blend ve c) kübik rock-salt yapı.....	14
Şekil 2.2. NTE'lerin periyodik tablodaki yeri.....	15
Şekil 2.3. NTE kullanım alanları yüzdesi.....	16
Şekil 2.4. Sol jel tekniği ile film kaplamanın şematik gösterimi.....	18
Şekil 2.5. Çözeltinin alttaş üzerine damlatılması.....	19
Şekil 2.6. Çözelti ile birlikte alttaşın dönmesi.....	20
Şekil 2.7. Dönme işleminin tamamlanması, durdurma.....	20
Şekil 2.8. Buharlaştırma ve film oluşumu.....	21
Şekil 2.9. Spin kaplama tekniği ile elde edilen film üzerinde oluşabilecek kusurlar.....	21
Şekil 2.10. Enerji bant aralıklarına göre iletken, yarıiletken ve yalıtkanlar.....	22
Şekil 2.11. Katkısız Si örgüsünün iki boyutlu görünümü.....	23
Şekil 2.12. a) P atomu ile katkılanmış Si örgünün iki boyutlu görünümü b) P atomu ile katkılanmış Si atomunun enerji bant diyagramı.....	24
Şekil 2.13. a) B atomu ile katkılanmış Si örgünün iki boyutlu görünümü b) B atomu ile katkılanmış Si atomunun enerji bant diyagramı.....	24
Şekil 2.14. p-n eklemine şematik gösterimi ve diyodun simgesi.....	25
Şekil 2.15. a) Düzgün olarak katkılanmış ideal bir p-n eklemine katkı profili ve b) uzay yükü bölgesi, elektrik alan ve yüklü taşıyıcılar üzerine etkiyen kuvvetler.....	26
Şekil 2.16. Termal dengedeki p-n eklemine enerji bant diyagramı.....	26
Şekil 2.17. Ters beslem altındaki p-n eklemine enerji bant diyagramı.....	28
Şekil 2.18. Ters beslem voltajı uygulanmış bir p-n eklemi.....	29

Şekil 2.19. Doğru beslenmiş $p-n$ eklemının enerji bant diyagramı.....	30
Şekil 2.20. Doğru beslem voltajı uygulanmış $p-n$ ekleminde uzay yükü elektrik alanı ve V_a tarafından oluşturulan elektrik alanın yönü.....	30
Şekil 2.21. Metal-yarıiletken kontağın şematik bir yapısı.....	31
Şekil 2.22. a) Doğrultucu kontağın ve b) omik kontağın akım-gerilim karakteristiği.....	32
Şekil 2.23. a) Metal ve p -tipi yarıiletken kontak oluşmadan b) Metal ve p -tipi yarıiletken kontak haline getirildikten sonra c) $V \neq 0$ durumundaki enerji bant diyagramları.....	33
Şekil 2.24. a) Metal ve n -tipi yarıiletken kontak olmadan b) Metal ve n -tipi yarıiletken kontak haline getirildikten sonra c) $V \neq 0$ durumundaki enerji bant diyagramları.....	34
Şekil 2.25. X-ışını tüpü.....	36
Şekil 2.26. X-ışınlarının bir kristal tarafından kırınımı.....	36
Şekil 2.27. SEM cihazının ayrıntılı şematik yapısı.....	39
Şekil 2.28. Elektron demeti ile numune etkileşimi.....	40
Şekil 2.29. $dR/d\lambda$ 'nın dalgaboyuna bağlı grafiği.....	42
Şekil 2.30. $(F(R)hv)/t)^2 - hv$ grafiği.....	43
Şekil 2.31. R_s etkisi ile akımdaki değişimi.....	45
Şekil 2.32. Fotodiyotun karanlık ve aydınlatılmış durumlardaki akım-voltaj karakteristikleri.....	47
Şekil 3.1. Elde edilen $p-n$ heteroeklem diyotların şematik gösterimi.....	53
Şekil 3.2. $Au/p-Si/n-ZnO/Al$ heteroeklem diyotunun üst kontağının a) $I-V$ grafiği ve b) ölçümün şematik gösterimi.....	58

Şekil 4.1.	Elde edilen katkısız ve La katkılı ZnO filmlerinin XRD spektrumları.....	60
Şekil 4.2.	Elde edilen katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerinin XRD spektrumları.....	62
Şekil 4.3.	Elde edilen katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerinin XRD spektrumları.....	64
Şekil 4.4.	Katkısız ve La katkılı ZnO filmlerine ait x50k büyütme oranındaki SEM görüntüleri.....	67
Şekil 4.5.	Katkısız ve La katkılı ZnO filmlerine ait x200k büyütme oranındaki SEM görüntüleri.....	68
Şekil 4.6.	Katkısız ve La katkılı ZnO filmlerine ait yüzey haritaları (x200k büyütme oranında çekilen SEM görüntüleri kullanılmıştır).....	70
Şekil 4.7.	Katkısız ve La katkılı ZnO filmlerinin tane sınırları (x200k büyütme oranında çekilen SEM görüntüleri kullanılmıştır).....	71
Şekil 4.8.	Katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerine ait x50k büyütme oranındaki SEM görüntüleri.....	72
Şekil 4.9.	Katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerine ait x200k büyütme oranındaki SEM görüntüleri.....	73
Şekil 4.10.	Katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerine ait yüzey haritaları (x200k büyütme oranında çekilen SEM görüntüleri kullanılmıştır).....	74
Şekil 4.11.	Katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerinin tane sınırları (x200k büyütme oranında çekilen SEM görüntüleri kullanılmıştır).....	75
Şekil 4.12.	Katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerine ait x50k büyütme oranındaki SEM görüntüleri.....	77
Şekil 4.13.	Katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerine ait x200k büyütme oranındaki SEM görüntüleri.....	78
Şekil 4.14.	Katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerine ait yüzey haritaları (x200k büyütme oranında çekilen SEM görüntüleri kullanılmıştır).....	79
Şekil 4.15.	Katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerinin tane sınırları (x200k büyütme oranında çekilen SEM görüntüleri kullanılmıştır).....	81
Şekil 4.16.	Katkısız ve farklı oranlarda La katkılı ZnO filmlerinin difüz yansıma spektrumları.....	82

Şekil 4.17. Katkısız ve farklı oranlarda La katkılı ZnO filmlerinin dalgaboyuna karşı çizilen $dR/d\lambda$ grafikleri.....	83
Şekil 4.18. Katkısız ve farklı oranlarda La katkılı ZnO filmlerinin Kubelka-Munk grafikleri.....	85
Şekil 4.19. Katkısız ve farklı oranlarda Eu katkılı ZnO filmlerinin difüz yansıma spektrumları.....	86
Şekil 4.20. Katkısız ve farklı oranlarda Eu katkılı ZnO filmlerinin dalgaboyuna karşı çizilen $dR/d\lambda$ grafikleri.....	87
Şekil 4.21. Katkısız ve farklı oranlarda Eu katkılı ZnO filmlerinin Kubelka-Munk grafikleri.....	88
Şekil 4.22. Katkısız ve farklı oranlarda Er katkılı ZnO filmlerinin difüz yansıma spektrumları.....	89
Şekil 4.23. Katkısız ve farklı oranlarda Er katkılı ZnO filmlerinin dalgaboyuna karşı çizilen $dR/d\lambda$ grafikleri.....	90
Şekil 4.24. Katkısız ve farklı oranlarda Er katkılı ZnO filmlerinin Kubelka-Munk grafikleri.....	91
Şekil 4.25. $Au/p-Si/n-ZnO:La/Al$ heteroeklem diyotlarının $I-V$ grafikleri.....	94
Şekil 4.26. $Au/p-Si/n-ZnO:La/Al$ heteroeklem diyotlarının yarılogaritmik $I-V$ karakteristikleri.....	95
Şekil 4.27. $Au/p-Si/n-ZnO:La/Al$ heteroeklem diyotlarının $dV/d\ln(I) - I$ grafikleri.....	96
Şekil 4.28. $Au/p-Si/n-ZnO:La/Al$ heteroeklem diyotlarının $F(V) - V$ grafikleri.....	97
Şekil 4.29. $Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al$ heteroeklem diyotlarının $I-V$ grafikleri.....	99
Şekil 4.30. $Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al$ heteroeklem diyotlarının yarılogaritmik $I-V$ karakteristikleri.....	100
Şekil 4.31. $Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al$ heteroeklem diyotlarının $dV/d\ln(I) - I$ grafikleri.....	101
Şekil 4.32. $Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al$ heteroeklem diyotlarının $F(V) - V$ grafikleri.....	102

Şekil 4.33. <i>Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al</i> heteroeklem diyotlarının <i>I-V</i> grafikleri.....	104
Şekil 4.34. <i>Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al</i> heteroeklem diyotlarının yarılogaritmik <i>I-V</i> karakteristikleri.....	105
Şekil 4.35. <i>Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al</i> heteroeklem diyotlarının <i>dV/dln(I) - I</i> grafikleri.....	106
Şekil 4.36. <i>Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al</i> heteroeklem diyotlarının <i>F(V) – V</i> grafikleri.....	107
Şekil 4.37. <i>Au/p-Si/n-ZnO:La/Al</i> heteroeklem diyotlarının farklı ışık şiddetleri altındaki yarılogaritmik <i>I-V</i> karakteristikleri.....	109
Şekil 4.38. <i>Al/p-Si/n-ZnO:La/Al</i> fotodiyotlarının ışık şiddetine karşı fotoakım değişimleri.....	110
Şekil 4.39. <i>Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al</i> heteroeklem diyotlarının farklı ışık şiddetleri altındaki yarılogaritmik <i>I-V</i> karakteristikleri.....	111
Şekil 4.40. <i>Al/p-Si/n-ZnO:Eu/Al</i> fotodiyotlarının ışık şiddetine karşı fotoakım değişimleri.....	112
Şekil 5.1. Elde edilen bütün ZnO filmlerinin kristallenme boyutlarının karşılaştırılması (XRD).....	115
Şekil 5.2. Elde edilen bütün ZnO filmlerinin tane boyutlarının karşılaştırılması (SEM).....	117
Şekil 5.3. Elde edilen bütün ZnO filmlerinin optik band aralıklarının karşılaştırılması.....	118
Şekil 5.4. Elde edilen heteroeklem diyotların idealite faktörlerinin katkı elementlerinin miktarına göre değişimi.....	119
Şekil 5.5. Elde edilen heteroeklem diyotların engel yüksekliklerinin katkı elementlerinin miktarına göre değişimi.....	120
Şekil 5.6. Elde edilen heteroeklem diyotların seri dirençlerinin katkı elementlerinin miktarına göre değişimi.....	120

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 3.1.	Hazırlanan şeffaf ve berrak çözeltiler.....	50
Görsel 3.2.	a. Laurell WS-400B-6NPP/LITE spin_kaplama cihazı b. MTI marka KSL-1100X model kül Fırın.....	52
Görsel 3.3.	Elde edilen filmlerin fotoğrafları.....	52
Görsel 3.4.	VAKSİS PVD Handy-MT/101T model metal buharlaştırma ve OLED sistemi.....	53
Görsel 3.5.	a. Shadow maske b. Numune tutucu üzerine yerleştirilen filmler c. Filmler üzerine yerleştirilen shadow maskelerin fotoğrafları.....	54
Görsel 3.6.	a. Metal buharlaştırma sisteminin üst kısmındaki numune tutucu ve açık konumdaki shutter b. Kapalı konumdaki shutter.....	54
Görsel 3.7.	a. Numune odacığının alt kısmında bulunan metal-kaynak kısmı b. Basket pota.....	55
Görsel 3.8.	a. EMS550X marka kaplama cihazı b. Alt omik kontak yapılırken kullanılan alttaşlar.....	55
Görsel 3.9.	a. BRUKER D2 Phaser XRD cihazı ve b. ZEISS Ultraplus alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM).....	57
Görsel 3.10.	a. SHIMADZU UV-2450 UV-VIS spektrofotometre cihazı ve b. Entegre küre ataçmanı.....	57
Görsel 3.11.	a. $p-n$ heteroeklem diyotların karanlık ortamda $I-V$ ölçümleri için kullanılan ölçüm sistemi ve b. Numune kutuna yerleştirilen diyot.....	58
Görsel 3.12.	$p-n$ heteroeklem diyotların farklı aydınlatma şiddetlerinde $I-V$ ölçümleri için kullanılan deney düzeneği	59

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Absorbans
A'	: Doğrultucu kontak alanı
$\text{\AA}$	: Angstrom
A^*	: etkin Richardson sabiti
Al	: Alüminyum
Au	: Altın
AFM	: Atomik kuvvet mikroskobu
a, b, c	: Kristal yapının örgü parametreleri
B	: Bor
$^{\circ}C$	: Santigrad derece
c^*	: Işık hızı
C_{11}	: Değeri $2,097 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ olan esneklik sabiti
C_{33}	: Değeri $2,109 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ olan esneklik sabiti
C_{12}	: Değeri $1,211 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ olan esneklik sabiti
C_{13}	: $1,051 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ olan esneklik sabiti
CBD	: Kimyasal banyo depolama
CVD	: Kimyasal buhar depolama
d	: Kristal düzlemleri arası mesafe
d_0	: Standart kristal düzlemleri arası mesafe
D	: Kristallenme boyutu
$\bar{D}$	: Ortalama tane boyutu
DI	: Deiyonize
eV	: Elektronvolt
E_a	: Akseptör enerji seviyesi
E_c	: İletim bandı enerji seviyesi
E_d	: Donör enerji seviyesi
E_F	: Fermi enerjisi
E_{Fi}	: Asal Fermi enerjisi
E_{Fm}	: Metalin Fermi enerjisi
E_{Fs}	: Yarıiletkenin Fermi enerjisi
E_g	: Optik band aralığı

EA	: Etanolamin
Eu	: Evropiyum
EuAc	: Evropiyum (III) asetat hidrat
Er	: Erbiyum
ErAc	: Erbiyum (III) asetat hidrat
E_v	: Valans bandı seviyesi
$F(R)$	: Kubelka-Munk fonksiyonu
Ge	: Germanyum
h	: Planck sabiti
I	: Akım
In	: İndiyum
I_0	: Doyum akımı
$I_{0(hkl)}$	: (hkl) düzleminin standart şiddeti
$I_{(hkl)}$	: (hkl) düzleminin gözlenen şiddeti
I_{ph}	: Fotoakım
I'_0	: Gelen ışının şiddeti
I'	: Geçen ışının şiddeti
k_B	: Boltzmann sabiti
La	: Lantanyum
LaAc	: Lantan(III) asetat hidrat
LED	: Işık yayan diyot
MBE	: Moleküler demet epitaksi
N	: Kırınım piki sayısı
n_0	: n bölgesindeki elektron konsantrasyonu
n'	: Yansımanın mertebesini veren tam sayı
n	: İdealite faktörü
n_i	: Asal taşıyıcı konsantrasyonu
N_a	: Akseptör konsantrasyonu
N_d	: Donör konsantrasyonu
NTE	: Nadir toprak elementi
O	: Oksijen
P	: Uygulanan ışık şiddeti

p_0	: p bölgesindeki hol konsantrasyonu
q	: Elektronun yükü
R	: Difüz yansıma
R_s	: Yarıiletkenin seri direnci
R_y	: Yansıma
Sn	: Kalay
Si	: Silisyum
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
t	: Film (malzeme) kalınlığı
T	: Kelvin cinsinden ortam sıcaklığı
T'	: Geçirgenlik
TC	: Yapılanma katsayısı
TE	: Termiyonik emisyon
TFT	: İnce film transistör
UV	: Morötesi (Ultraviyole)
V	: Voltaj
V_{bi}	: Yerleşik potansiyel engeli
V_t	: Termal voltaj
$V_{toplamlam}$	: Toplam potansiyel engeli
V_R	: Ters beslem voltajı
V_a	: İleri beslem voltajı
W	: Uzay yükü bölgesinin genişliği
W_p	: p bölgesinin genişliği
W_n	: n bölgesinin genişliği
$\bar{Y}$	: Ortalama yükselti değeri
XPS	: X-ışını fotoelektron spektrometresi
XRD	: X-ışını kırınımı
Zn	: Çinko
ZnAc	: Çinko asetat dihidrat
ZnO	: Çinko oksit
β	: Yarı pik genişliği
α	: Absorpsiyon katsayısı

δ	: Dislokasyon yoğunluğu
ϵ_s	: Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ_z	: Kristal yapıdaki deformasyonu (strain)
ϕ_b	: Potansiyel engel yüksekliği
ϕ_m	: Metalin iş fonksiyonu
ϕ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
ϕ_{Fn}	: n bölgesindeki potansiyel engel yüksekliği
ϕ_{Fp}	: p bölgesindeki potansiyel engel yüksekliği
λ	: Dalgaboyu
σ_c	: Kristal yüzeyine paralel gerilim (stress)
θ	: Kırınım (Bragg) açısı
γ	: İdealiteden büyük ilk tam sayı
χ_s	: Elektron ilgisi

1. GİRİŞ ve AMAÇ

1.1. Giriş

Yarıiletken malzemeler elektronğin temelini oluşturmaktadır. Özellikle son yıllarda yarıiletken teknolojisi üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Gelişen ve değişen dünya her geçen gün farklı ihtiyaçların ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Artık insanlar daha hızlı telefonlar kullanmak, telefona çok daha fazla veri kaydedip, uzun süre saklamak ve kullandıkları teknolojik aletleri uzun süre şarj etmeden kullanmak istiyorlar. Tüm bu ihtiyaçlar yarıiletken teknolojisi üzerine çalışmaların daha uzun yıllar süreceğini göstermektedir.

Yarıiletkenlerin elektriksel özelliklerini araştırmak için metal-yarıiletken kontaklar kullanılmaktadır. Metal yarıiletken kontaklar elektronik ve optoelektronik teknolojisinde aygıtların yapımında önemli bir rol oynamaktadır. 1874'lü yıllarda Braun metal-yarıiletken kontaklarla ilgili ilk çalışmayı yapmıştır. Braun, metal ve yarıiletken arasındaki elektriksel iletkenliği keşfetmiştir. Bu nokta kontak doğrultucuları dedektör olarak kullanmıştır [1]. 1904 yılından sonra ise değişik biçimlerdeki nokta kontak doğrultucuların pratik uygulamaları üzerinde çalışmalar yapılmıştır [2]. 1931 yılında ise Wilson, katıların bant teorisini temel olarak alan yarıiletkenlerin akım-iletim teorisini formüle etmiştir [3]. Daha sonra bu teori, metal-yarıiletken kontaklarda kullanılmıştır. 1938 yılında Schottky ve Mott elektronların potansiyel engeli üzerinden difüzyon ve sürüklenme yolu ile geçiş yaptığını açıklamışlardır [4]. Mott yine bu yıl içinde, metal ve yarıiletkenlerin iş fonksiyonlarının farklı olmasının potansiyel engeli oluşmasına neden olduğunu açıklamıştır [5]. Yarıiletken fiziğinin gelişmesiyle beraber yarıiletkenlerin yapısı hakkında daha fazla bilgi edinilmiş ve metal-yarıiletken kontakların yapısı anlaşılmağa başlanmıştır.

Yarıiletken teknolojisinde en çok kullanılan nanoyapılı malzemelerden biri olan çinko oksit (ZnO), oda sıcaklığında yaklaşık 3,37eV değerinde geniş optik bant aralığına ve yüksek elektriksel iletkenliğe sahiptir. Ayrıca bu yarıiletkenin, görünür bölgede geçirgenliği de yüksektir [6, 7]. Morfolojik, mekanik, elektronik, optik ve yapısal özellikleri açısından nano-aygıtlar için çok büyük bir öneme sahiptir. İnce film transistörleri, yüksek güçlü elektronik devreler, ışık yayan diyotlar (LED), alan etkili transistörler (FET), sensörler, güneş pilleri gibi birçok elektronik devre elemanlarının yapısında kullanılırlar. Özellikle son yıllarda yapılan çalışmalar incelendiğinde, ZnO filmleri birçok element ile katkılandırılarak, elde edilen katkılı ZnO filmlerinin fiziksel

özellikleri araştırılmaktadır [8-16]. Geniş bir optik bant aralığına sahip olan ZnO, nadir toprak elementleri (NTE) olarak isimlendirilen elementlerle katkılanırsa, optoelektronik aygıtlar için uygun malzeme halini alır. NTE katkılı nanokristaller görünür bölgede çalışan (kırmızı, yeşil ve mavi) optoelektronik aygıtlara entegre edildiğinde, oda sıcaklığında bile verimli lüminesansa sahip olurlar. NTE⁺³ iyonları arasında yer alan Eu⁺³ (Evropiyum) iyonu katkı yapılabilecek farklı bileşiklere örnektir ve kırmızı ışık yayan Eu⁺³ iyonu da yoğun olarak çalışılır, genel olarak LED yapımında kullanılır. Fakat Eu⁺³ iyonunun yarıçapı ($r=0,107$ nm) ve Zn⁺² iyonunun yarıçapı ($r=0,074$ nm) arasındaki farklılık nedeniyle, Eu⁺³ iyonu Zn⁺² iyonu ile yer değiştirdiğinde, kristal örgüde bozulmalar olabilir. Bu yüzden katkılama miktarı oldukça önemlidir. Lantan (La) katkılı ZnO mor ve yeşil ışık yayma özelliği sergiler ve katkı konsantrasyonuna bağlı olarak optik bant aralığı ayarlanabilir. Erbiyum (Er) katkısı ise, LED'lerin elektrolüminesans özelliklerini değiştirmek ve geliştirmek için kullanılmıştır.

1.2. Literatür Özeti

Sol jel metodu ile ZnO filmlerinin elde edilmesi, elde edilen filmlerden heteroeklem diyotların üretilmesi sık çalışılan bir konudur. ZnO filmlerin geniş kullanım alanı ve sol jel metodunun içerdiği çok sayıda değişkenin varlığı bu çalışmaların uzun yıllar yapılacağını göstermektedir. ZnO filmlerinin fiziksel özellikleri üzerine katkı malzemelerinin etkileri ile ilgili çok fazla çalışma bulunmasına rağmen, bazı katkı malzemelerinin etkilerinin hala tam olarak açıklığa kavuşturulamamıştır.

Ulaşılabilir literatürdeki sol jel metodu ile hazırlanan çözeltiler kullanılarak farklı teknikler ile elde edilen, Nadir Toprak Elementi (NTE) olarak isimlendirilen La, Eu ve Er katkılı ZnO filmleri ile ilgili yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda kısaca özetlenmiş, çözelti parametreleri ve film depolama parametreleri sırasıyla Tablo 1.1 ve Tablo 1.2'de verilmiştir.

Tablo 1.1. Literatürde sol jel metodu ile elde edilen La, Eu, Er katkılı ZnO filmlerinin çözelti parametreleri.

Kaplama Tekniği	Alttaş	ZnO kaynağı	Katkı Kaynağı	Stabilizer	Çözücü	Çözelti karıştırma sıcaklığı (°C)/Süresi (sa)	Katkı konsantrasyonu (%)	Referans
Spin	Si	Zn(CH ₃ CO ₂) ₂ .2H ₂ O	La(NO ₃) ₃ .6H ₂ O	Monoetanolamin	Etanol	70 / 3	0; 1; 3; 5; 10	[17]
Dip	Cam	Zn(CH ₃ CO ₂) ₂ .2H ₂ O	La(NO ₃) ₃ .6H ₂ O	Diethanolamin	2-Metoksietanol	Oda sıcaklığı / 3	0; 1; 3; 5; 10	[18]
Spin	Cam	Zn(CH ₃ CO ₂) ₂ .2H ₂ O	LaCl ₃ .7H ₂ O	Diethanolamin	İsopropanol	70 / 2	0; 1; 2; 3; 4	[19]
Dip	Si	Zn(CH ₃ CO ₂) ₂ .2H ₂ O	La(CH ₃ CO ₂) ₃ .xH ₂ O	Ethanolamin	2-Metoksietanol	60 / 2	0; 1	[20]
Spin	Cam	Zn(CH ₃ CO ₂) ₂ .2H ₂ O	LaCl ₃ .7H ₂ O	Ethanolamin	2-Metoksietanol	60 / 2	0; 2,5; 5,0; 7,5	[21]
Baskı	Cam	Zn(CH ₃ CO ₂) ₂ .2H ₂ O	La(NO ₃) ₃ .6H ₂ O	Monoetanolamin	Etilen glikol	100 / Birkaç saat	0; 2	[22]
Dip	Cam	Zn(CH ₃ CO ₂) ₂ .2H ₂ O	La(NO ₃) ₃ .6H ₂ O	Monoetanolamin	Etanol	60 / 1	0; 1; 2; 3; 4; 5	[23]
Spin	Cam	Zn(CH ₃ CO ₂) ₂ .2H ₂ O	(Eu(NO ₃)) ₃ .5H ₂ O	Monoetanolamin	2-Metoksietanol	60 / 0,16	0; 0,5; 5; 15; 20	[24]
Spin	Cam	Zn(CH ₃ CO ₂) ₂ .2H ₂ O	(Eu(NO ₃)) ₃ .5H ₂ O	Monoetanolamin	2-Metoksietanol	60 / 0,16	0; 10; 15; 20	[25]
Spin	Si	Zn(CH ₃ CO ₂) ₂ .2H ₂ O	EuCl ₃ .6H ₂ O	Monoetanolamin	2-Metoksietanol	75 / 2	0; 1; 2; 3; 5; 7	[26]
Dip	Si	Zn(CH ₃ CO ₂) ₂ .2H ₂ O	(Eu(NO ₃)) ₃ .5H ₂ O	Monoetanolamin	Etanol	70 / 2	0; 1	[27]
Spin	Kuartz	Zn(CH ₃ CO ₂) ₂ .2H ₂ O	(Eu(NO ₃)) ₃ .5H ₂ O	Monoetanolamin	2-Metoksietanol	--- / 3	0; 2; 5; 10	[28]
Dip	Cam	Zn(CH ₃ CO ₂) ₂ .2H ₂ O	(Er(NO ₃)) ₃ .5H ₂ O	Monoetanolamin	Etanol	60 / 1	0; 0,05; 0,1; 0,3; 0,4; 0,5; 1	[29]
Spin	Kuartz	Zn(CH ₃ CO ₂) ₂ .2H ₂ O	Er(CH ₃ CO ₂) ₃ .4H ₂ O	Monoetanolamin	2-Metoksietanol	80 / 3	0,05	[30]
Spin	Cam	Zn(CH ₃ CO ₂) ₂ .2H ₂ O	ErCl ₃ .6H ₂ O	Monoetanolamin	Metanol	--- / 2	0; 0,2; 0,4; 0,6	[31]
Spin	Kuartz	Zn(CH ₃ CO ₂) ₂ .2H ₂ O	Er(CH ₃ CO ₂) ₃ .4H ₂ O	Monoetanolamin	2-Metoksietanol	80 / 3	0; 0,05; 0,5; 3	[32]
Spin	Cam	Zn(CH ₃ CO ₂) ₂ .2H ₂ O	ErCl ₃ .6H ₂ O	Monoetanolamin	2-Metoksietanol	60 / 1	0; 1; 2; 3; 4; 5	[33]
Spin	Cam	Zn(CH ₃ CO ₂) ₂ .2H ₂ O	Er(CH ₃ CO ₂) ₃ .H ₂ O	Monoetanolamin	2-Metoksietanol	40 / 2	0; 0,5; 1; 5; 10	[34]
Dip	Cam	Zn(CH ₃ CO ₂) ₂ .2H ₂ O	Er(CH ₃ CO ₂) ₃ .4H ₂ O	Monoetanolamin	Metanol	60 / 8	0; 1; 2; 3; 4; 5	[35]

Tablo 1.2. Literatürde sol jel metodu ile elde edilen La, Eu, Er katkılı ZnO filmlerinin depolama parametreleri.

Döndürme hızı (rpm) / süresi (s)	Daldırma hızı	Kurutma Sıcaklığı (°C)/Süresi (dk)	Tavlama Sıcaklığı (°C)/Süresi (dk)	Katman Sayısı	Karakterizasyon					Referans
					Yapısal	Morfolojik	Optik	Elektriksel	Uygulama	
3000 / 20	---	300 / 5	600 / 60	6	x	x	x	---	---	[17]
---	1mm / s	100 / 30	350 / 60	10	x	x	x	x	x	[18]
3000 / 30	---	250 / 10	400 / 120	5	x	x	x	x	---	[19]
---	8mm / dk	300 / 10	600 / 120	10	x	x	x	x	x	[20]
2000 / 30	---	180 / 20	500 / 120	6	x	x	x	---	---	[21]
---	---	100 / 60	500 / 10	---	x	x	x	x	---	[22]
---	12mm / s	225 / 10	550 / 60	1	x	x	x	x	---	[23]
2000 / 20	---	125 / 1	450 / 60	15	x	x	x	---	---	[24]
2000 / 20	---	125 / 1	450 / 60	15	x	---	x	---	---	[25]
2500 / 30	---	175 / 10	550 / 30	---	x	x	x	---	x	[26]
---	60mm / dk	350 / 3	350, 500, 650, 800 / 30	30	x	x	x	---	---	[27]
3000 / 30	---	300 / 10	700 / 60	9	x	x	x	---	---	[28]
---	1mm / s	100 / 10	450 / 60	6	x	x	x	---	---	[29]
3000 / 60	---	280 / 10	400/60; 600, 800, 1000 /120	6	x	x	x	---	---	[30]
2500 / 30	---	225 / 10	450 / 1	15	x	x	x	---	---	[31]
3000/ 60	---	280/10	400, 600, 800, 1000 / 120	6	---	---	x	---	---	[32]
---	---	---	500, 600 / 60	---	x	x	x	---	---	[33]
3000 / 30	---	300 / 10	550 / 60	10	x	x	x	x	---	[34]
---	---	300-400 / ---	600 / 30	10	x	x	x			[35]

Chen ve ark. [17], La katkı miktarını değiştirerek (katkısız ve %1, %3, %5, %10 katkılı) spin kaplama tekniği ile ZnO ince filmlerini elde etmişlerdir. Alttaş olarak silisyum (Si) kullanmışlar ve La katkı miktarının ZnO filmi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Elde edilen filmlerin karakterizasyonunda, X-ışınları difraktometresi (XRD), X-ışını fotoelektron spektrometresi (XPS), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve morötesi-görünür (UV-vis) spektrofotometresi kullanmışlardır. Artan La miktarı ile XRD spektrumlarındaki pik şiddetlerinin azaldığını gözlemişlerdir. La^{+3} iyonları ZnO kristal örgüsü içinde Zn^{+2} iyonları ile yer değiştirdiğini ve bu durumun kristal örgüde bozulmalara neden olduğunu ifade etmişlerdir. Bunun sebebi olarak, katkı maddesi ile Zn iyonları arasındaki boyut farkının, gerilmelerin oluşumuna sebep olması ve yüksek katkı miktarında hem Zn^{+2} iyonları ile yer değiştiren La^{+3} iyonlarının, hem de örgü içerisinde ara durumlara sıkışan La^{+3} iyonlarının kristal yapıda meydana getirdikleri kusurların olduğunu belirtmişlerdir. Elde ettikleri filmlerin SEM görüntülerinden, film yüzeylerinde çatlakların olmadığını fakat gözeneklerin olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca tane sınırlarının açıkça belli olduğunu, artan katkı miktarı ile birlikte tane boyutlarının küçüldüğünü rapor etmişlerdir.

Venkatesh ve ark. [18], La katkı miktarını değiştirerek (1, 3, 5 ve 10 %) dip kaplama tekniği ile ZnO ince filmlerini elde etmişlerdir. Alttaş olarak cam kullanmışlardır. La katkı miktarının ZnO filminin morfolojik ve yapısal özelliklerine etkisini ve H_2 gazına duyarlılığını incelemişlerdir. Elde edilen filmlerin XRD spektrumlarından, filmlerin hekzagonal yapıda olduğunu, (100), (002) ve (101) düzlemlere ait piklerin daha belirgin olduğunu belirlemişlerdir. Tercihli yöneliminin ise (002) düzleminde olduğu, ayrıca artan La katkı miktarı ile birlikte (002) pikinin şiddetinin arttığını gözlemlemişlerdir. Yine artan katkı konsantrasyonu ile birlikte film kalınlığının 0,141 μm 'den 0,102 μm 'ye düştüğünü belirlemişlerdir. Katkısız ve La katkılı ZnO filmlerinin SEM görüntülerinden, film yüzeylerinin 15-20 nm boyutlarındaki nanocornlardan oluştuğunu, La katkısıyla nanocorn boyutlarının arttığını gözlemlemişlerdir.

Aal ve ark. [19], La katkı miktarını (%0, 1, 2, 3, 4) değiştirerek cam alttaşlar üzerine ZnO filmlerini spin kaplama tekniği ile elde etmişler ve La katkı miktarının yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. XRD spektrumlarından, artan katkı miktarıyla birlikte kristal yapının bozulduğunu ve oluşan tanecik boyutlarının 19nm'den 10nm'ye kadar azaldığını belirlemişlerdir. Bu durumu La^{+3} (0,106nm) ve Zn^{+2} (0,074nm) arasındaki iyonik yarıçap farklılığına bağlamışlardır.

Elde edilen ince filmlerin taşıyıcı konsantrasyonu, mobilitesi ve iletkenliğini de belirlemişler ve artan La katkı miktarı ile birlikte taşıyıcı konsantrasyonun, mobilitenin ve iletkenliğin arttığını rapor etmişlerdir.

Ilican ve Ilgu [20], dip kaplama tekniği ile p-Si alttaşlar üzerine katkısız ve %1 La katkılı ZnO filmlerini elde edip, yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel karakterizasyonlarını yapmışlardır. Ayrıca elde ettikleri La katkılı ZnO filmini kullanarak heteroeklem yapı elde etmiş ve *I-V* karakteristiğini araştırmışlardır. XRD verilerinden katkısız ve %1 La katkılı ZnO filmi için tanecik boyutunu sırasıyla 34nm ve 26nm olarak hesaplamışlardır. Katkıyla beraber kristal yapının bozulduğunu rapor etmişlerdir. SEM görüntülerinden, film yüzeylerinin homojen olduğunu ve yüzeydeki nanotanecik boyutunun La katkılıandığında küçüldüğünü gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda elde edilen filmlerin Hall ölçümü yöntemiyle taşıyıcı konsantrasyonu, taşıyıcı tipi, mobilitesi ve öz direncini belirlemişlerdir. Elde ettikleri heteroeklem diyotun *n* idealite faktörünü 2,85 ve ϕ_b bariyer yüksekliğini ise 0,72eV olarak hesaplamışlardır. 100mWcm⁻²'lik ışık altında ters beslem akımının arttığını, dolayısıyla elde edilen bu diyotun fotodiyot özelliği sergilediğini rapor etmişlerdir.

Shaben ve Sayed [21], katkısız ve %2,5, %5 ve %7,5 La katkılı ZnO filmlerini spin kaplama tekniği ile elde etmiş ve yapısal, morfolojik ve optik özelliklerini belirlemişlerdir. Tanecik boyutunun 19nm ile 34nm arasında değerler aldığını ve katkı arttıkça azaldığını belirtmişlerdir. Tercihli yönelimin ise (002) yönünde olduğunu ifade etmişlerdir. Benzer durumu SEM görüntüleri ile de belirlemiş, katkı ile film yüzeyinin bozulduğunu rapor etmişlerdir. Optik bant aralığı değerini ise katkısız ZnO filmi için 3,26eV olarak hesaplarken, La katkısıyla 3,22 ile 3,14 arasında değerler aldığını ve katkı miktarı arttıkça optik bant aralığının azaldığını rapor etmişlerdir. Bu durumun nedenini ise, katkı ile birlikte örgü içinde oluşmuş olabilecek kusurlardan kaynaklanmış olabileceği şeklinde ifade etmişlerdir.

Chaudhary ve ark. [22], katkısız ve %2 La katkılı ZnO filmlerini cam alttaşlar üzerine baskı (screen printing) tekniği kullanarak elde etmişlerdir. Elde ettikleri filmlerin yapısal, morfolojik, elektriksel ve optik özelliklerini incelemişlerdir. Katkısız ZnO için tanecik boyutunun 32nm olduğunu, La katkılı ZnO filmi için ise 28nm olduğunu belirlemişlerdir. Katkı ile tanecik boyutunun azalmasının ise Zn⁺² iyonunun iyonik yarıçapı ile yerine yerleşen La⁺³ iyonu arasındaki iyonik yarıçap farkının sebep olmuş olabileceğini ifade etmişlerdir. Katkısız ve La katkılı ZnO filmlerine ait optik bant

aralıklarını difüz yansıma spektrumlarından yararlanarak, Kubelka-Munk teorisini kullanarak, sırasıyla 3,24eV ve 3,40eV olarak hesaplamışlardır.

Maache ve ark. [23], dip kaplama tekniği ile cam alttaşlar üzerine katkısız ve farklı oranlarda (%1, %2, %3, %4 ve %5) La katkısıyla ZnO filmlerini elde etmiş ve bu filmlerin karakterizasyonlarını yapmışlardır. XRD sonuçlarına göre, elde edilen filmlerde sadece (002) pikine rastlandığını ve artan La katkısı ile beraber XRD spektrumundaki pik şiddetinin azaldığını belirlemişlerdir. Yine XRD sonuçlarını kullanarak tanecik boyutunu hesaplamışlar ve artan katkı ile beraber tanecik boyutunun 15nm değerinden 9nm değerine kadar azaldığını ifade etmişlerdir. UV-vis spektrumları yardımıyla hesapladıkları optik bant aralığı değerlerinin ise katkı artışıyla 3,21eV değerinden 3,24eV değerine kadar artış gösterdiğini rapor etmişlerdir.

Ping ve ark. [24], katkısız ve %0,5, %5, %15 ve %20 oranlarında Eu katkılı ZnO filmlerini spin kaplama tekniği kullanarak cam alttaşlar üzerine elde etmişlerdir. Elde ettikleri filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerini incelemişler. XRD spektrumlarından, 2θ açısının yaklaşık 34° değerinde (002) piki olduğunu, hekzagonal wurtzite yapıda kristallendiğini olduğunu belirlemişlerdir. Ancak, SEM fotoğraflarını incelediklerinde altıgen bir yapıya rastlamadıklarını, onun yerine yaklaşık 40nm çapında nanotoplarla kaplı bir yüzeyin oluştuğunu rapor etmişlerdir. Elde edilen filmlerin 400 ve 800nm aralığında yaklaşık %80 geçirgenliğe sahip saydam yapıda olduklarını ve absorpsiyon sınırının 363nm ($E_g=3,40\text{eV}$) olduğunu rapor etmişlerdir.

Che ve ark. [25], spin kaplama tekniği ile katkısız ve %10, %15, %20 Eu katkılı ZnO filmlerini cam alttaşlar üzerine elde etmişlerdir. Filmlerin yapısal ve optik karakterizasyonlarını yapmışlardır. Filmlerin XRD spektrumlarında (100), (002), (101), (102) ve (110) piklerinin olduğunu ve tercihli yönelimin (002) yönünde olduğunu ifade etmişlerdir. Artan Eu katkısıyla beraber spektrumdaki pik şiddetinin de arttığını, pik konumlarında küçük miktarlarda kayma olduğunu rapor etmişlerdir. 450W ksenon lamba kullanarak çektikleri uyarma ve emisyon spektrumlarından, Eu katkı miktarı arttıkça uyarma ve emisyon şiddetlerinin de arttığını gözlemlemişlerdir.

Turgut ve ark. [26], katkısız ve %1, %2, %3 %5 ve %7 oranında Eu katkılı ZnO filmlerini p-Si alttaşlar üzerine spin kaplama tekniği kullanarak elde etmişler, ardından *Al/p-Si/n-ZnO:Eu/Al* heteroeklemlerini üretmişlerdir. Öncelikle elde edilen filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerini incelemişlerdir. Yaptıkları karakterizasyon sonucunda, Eu katkısıyla beraber tanecik boyutunda ve optik bant aralığında değişimler

gözlemlenmişlerdir. Optik bant aralığının katkı artışı ile önce arttığını, sonra azaldığını belirlemişlerdir. Ardından heteroeklem diyot haline getirilen filmlerin elektriksel özellikleri incelenmişler ve artan katkı miktarı ile beraber idealite faktörünün 1,57'den 3,91 değerine, seri direnç değerlerinin ise $3k\Omega$ değerinden $4733k\Omega$ değerine arttığını belirlemişlerdir.

Ghosh ve ark. [27], katkısız ve %1 Eu katkılı ZnO filmlerini Si alttaşları üzerine farklı tavlama sıcaklıklarında (350°C , 500°C , 650°C ve 800°C) dip kaplama tekniğini kullanarak elde etmişlerdir. Ardından filmlerin yapısal, morfolojik ve optik karakterizasyonlarını yapmışlardır. Elde edilen filmlerin XRD spektrumlarında $31,78^{\circ}$, $34,48^{\circ}$, $36,43^{\circ}$, $56,88^{\circ}$, $63,03^{\circ}$ ve $68,23^{\circ}$ değerlerinde piklere rastlamışlar ve bu piklerin ait olduğu düzlemlerin sırasıyla (100), (002), (101), (110), (103) ve (112) olduğunu ifade etmişlerdir. Artan sıcaklıkla beraber (103) pikinde daha büyük açılara doğru bir kayma oluştuğunu rapor etmişlerdir. Tanecik boyutlarının artan sıcaklıkla beraber 9nm değerinden 23nm değerine kadar büyüdüğünü ifade etmişlerdir. Benzer sonuçlara, SEM görüntülerinden de ulaşmışlardır. Ayrıca, filmlerin optik bant aralığı değerlerinin 3,21eV ile 3,14eV arasında değiştiğini rapor etmişlerdir.

Mao ve ark. [28], katkısız ve %2, %5, %10 Er katkılı ZnO filmlerini spin kaplama tekniği ile kuartz alttaşlar üzerine elde etmişlerdir. Er katkı miktarının ZnO filminin mikroyapı ve optik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. XRD verilerinden, tüm filmlerde hekzagonal wurtzite yapıda ZnO piklerinin görüldüğünü ve tercihli yönelimin (002) olduğunu; sadece yüksek katkı oranındaki (%10 Er) ZnO filminde $2\theta=29,4^{\circ}$ değerinde Er_2O_3 bileşiğine ait olan (222) kırınım pikinin gözlemlendiğini rapor etmişlerdir. Artan katkı miktarıyla tanecik boyutunun 36nm değerinden 17nm değerine kadar küçüldüğünü ifade etmişlerdir. Tanecik boyutundaki bu azalmanın nedeninin ZnO filminin kristal kalitesinin azalmasının sonucu olduğunu rapor etmişlerdir. Ayrıca atomik kuvvet mikroskobu (AFM) görüntülerinden de ZnO filminin tanecik boyutunun 19,86nm değerinden artan Er miktarı ile 10,07nm değerine kadar küçüldüğünü belirterek, XRD sonuçlarını doğrulamışlardır. Optik geçirgenlik spektrumlarından, elde edilen filmlerin görünür bölgedeki geçirgenliklerinin %80 değerinden daha büyük olduğunu; optik bant aralığının ise Er katkı miktarı artması ile 3,289eV değerinden 3,279eV değerine düştüğünü rapor etmişlerdir.

Bouhouche ve ark. [29], katkısız ve farklı katkı oranlarında (%0,05, %0,1, %0,3, %0,4, %0,5, %1) Er katkılı ZnO filmlerini dip kaplama tekniği kullanarak cam alttaşlar

üzerine elde etmişlerdir. Elde ettikleri filmlerin XRD, SEM, Raman, UV-VIS-NIR analizlerini yapmışlardır. XRD spektrumlarından, %0,3 Er katkısına kadar ZnO filmlerinin kristallenmesinin arttığını, daha büyük katkılarda ise kristal yapıda yeniden bozulma olduğunu ifade etmişlerdir. Filmlerin tanecik boyutu, spesifik yüzey alanı ve örgü sabitleri gibi yapısal parametrelerini belirlemişlerdir. Filmlerin optik geçirgenliklerinin %70 ile %95 arasında yüksek değerlere sahip olduğunu ifade etmişler ve optik band aralıklarını 3,278eV ile 3,263eV değerleri arasında değişkenlik gösterdiğini belirlemişlerdir.

Ran ve ark. [30], %0,05 Er katkılı ZnO filmlerini kuartz alttaşlar üzerine farklı tavlama koşullarında (400°C sıcaklık değerinde 1sa; 600°C, 800°C ve 1000°C sıcaklık değerinde 2sa) spin kaplama tekniği kullanarak elde etmişlerdir. Tavlama süresi ve sıcaklığının ZnO filminin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. XRD sonuçlarından, 2 saat süreyle 800°C sıcaklıkta tavlanan filmin (002) tercihli yöneliminin en büyük değerde olduğunu ve en iyi kristallendiğini ifade etmişlerdir. Sıcaklık 800°C'nin üstüne çıktığında ise filmin biraz daha iyi kristallendiğini ancak (002) pikinin şiddetinin azaldığını belirtmişlerdir. 2-boyutlu ve 3-boyutlu AFM görüntülerinin analizlerinden, tanecik boyutlarının tavlama sıcaklığının artmasıyla 29nm değerinden 300nm değerine kadar büyüdüğünü; 1000°C sıcaklıkta tavllanmış olan film hariç, elde edilen filmlerin homojen küresel tanelere sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Optik ölçümler sonucunda filmlerin optik bant aralığını yaklaşık 3,28eV olarak hesaplamış ve sıcaklığın filmlerin bant aralığını değiştirmediğini rapor etmişlerdir. Optik ölçüm sonuçlarından, tavlama sıcaklığının optik band aralığını değiştirmediğini ve 3,28eV olarak belirlediklerini rapor etmişlerdir.

Kumari ve ark. [31] spin kaplama tekniği ile cam alt taşlar üzerine Er katkılı ZnO ince filmleri elde etmişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada katkı miktarının film oluşumu üzerine etkilerini araştırmışlardır. Elde edilen filmlerin incelenmesinde XRD, SEM ve UV-vis spektrofotometresi kullanmışlardır. Er katkılı ZnO filmlerin hekzagonal yapıda ve (002) tercihli yönelimine sahip olduğunu XRD yöntemini kullanarak tespit etmişlerdir. Elde ettikleri ZnO filmlerinin SEM görüntülerinden, tüm filmlerin pürüzsüz bir yüzeye sahip olduğunu ve çatlakların olmadığını gözlemlemişlerdir. Tanecik boyutlarının 30nm ile 60nm arasında değiştiğini ve en büyük tanecik boyutunun %0,4 Er katkılı ZnO filmde oluştuğunu ifade etmişlerdir. Er konsantrasyonunun daha fazla artışı ile birlikte yapıda bozulmalar olduğunu ve tanecik boyutunda da küçülmeye başlamıştır.

Miao ve ark. [32], katkısız ve %0,05, %0,5, %3 Er katkılı ZnO filmlerini kuartz alttaş üzerine farklı tavlama sıcaklıklarında (400°C, 600°C, 800°C ve 1000°C) spin kaplama tekniği kullanarak elde etmişlerdir. Hem farklı tavlama sıcaklıklarının hem de farklı oranlarda Er katkısının, ZnO filminin optik özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Er katkısının, yapıda oluşan lokal gerilmelerin, yapı düzensizliklerinin, homojen olmayan dağılımların elde edilen filmin optik parametrelerini (optik sabitler, optik bant aralığı ve Urbach enerjisi gibi) doğrudan etkilediğini ifade etmişlerdir. Filmlerin optik bant aralığının 3,05eV ile 4,18eV arasında değerler alırken, Urbach enerjisi değerlerinin 510meV ile 24meV arasında değerler aldığını rapor etmişlerdir.

Vettumperumal ve ark. [33], Er katkı miktarını (0, %1, %2, %3, %4, %5) ve tavlama sıcaklığını (500°C ve 600°C) değiştirerek cam alttaşlar üzerine ZnO filmlerini spin kaplama tekniği kullanarak elde etmişlerdir. Er katkı miktarı ve tavlama sıcaklığının ZnO filminin yapısal ve optik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. XRD spektrumlarında ZnO yapıya ait (100), (002) ve (101) düzlemlerinin piklerini gözlemlemişlerdir. 500 ve 600°C'de tavlanan filmlerin ortalama tanecik boyutlarını sırasıyla 27,44nm ve 29,28nm olarak hesaplamışlardır. Farklı büyütmelelerdeki SEM görüntülerinden, yüzeyde küçük taneciklerin olduğu ve boşluksuz, homojen bir dağılımın olduğunu ifade etmişlerdir. Optik ölçümler sonucunda filmlerin yüksek geçirgenliğe (%80) sahip olduklarını ve Er katkısının artmasıyla büyük dalga boylarına (kızılötesi bölgeye) kayma olduğunu yani ZnO filminin optik band aralığının Er katkısıyla azaldığını rapor etmişlerdir.

Ilıcın [34] katkısız ve %0,5, %1, %5 ve %10 Er katkılı ZnO filmlerini spin kaplama tekniği kullanarak cam alttaşlar üzerine elde etmiş ve yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özelliklerini incelemiştir. SEM görüntülerinden, Er katkısına bağlı olarak yüzeyin değiştiğini; katkısız ZnO film yüzeyinin yuvarlak parçacıklardan oluşurken, %1 Er katkılı ZnO filminin yüzeyinde nanoçubukların belirgin şekilde oluştuğunu ve katkı daha da artınca yeniden kaybolduğunu gözlemlemiştir. XRD spektrumlarından, bütün filmlerin polikristal olarak hekzagonal wurtzite zinkit yapıya sahip olduğunu, artan Er katkısıyla kristal yapının bozulmaya başladığını ve bütün filmler için tercihli yönelimin (002) olduğunu belirlemiştir. Optik ölçümler sonucu, bütün filmlerin görünür bölgede yüksek optik geçirgenliğe sahip olduğu (>%84) rapor etmiştir. Ayrıca kırılma indisi, tükenim katsayısı, gerçel ve sanal dielektrik sabiti gibi optik parametreleri hesaplanmış,

%1 Er katkılı ZnO filminin görünür bölgedeki ortalama optik sabitlerinin, diğerlerinkinden daha küçük olduğu tespit etmiştir.

Asikuzun ve ark. [35], katkısız ve %1, %2, %3, %4, %5 Er katkısıyla cam alttaşlar üzerine dip kaplama tekniği ile ZnO filmlerini elde etmişlerdir. Elde edilen filmlerin XRD spektrumlarında sadece (002) pikine rastlandığını, Er katkısının artışıyla birlikte pik şiddetinin azaldığını ve pikin pozisyonunun küçük açılara doğru kaydığını ifade etmişlerdir. Tanecik boyutunun ise Er katkı miktarının artışıyla birlikte 31,73nm değerinden 16,07nm değerine kadar azaldığını belirtmişlerdir. Elde edilen filmlerin SEM görüntülerinin analizi sonucunda da benzer sonuçları elde etmişlerdir. Optik band aralığı değerinin ise Er katkı artışı ile 3,28eV değerinden 3,24eV değerine kadar azaldığını rapor etmişlerdir.

1.3. Amaç ve Önem

Aygıt uygulamalarında kullanılan yarıiletkenin ucuz metotlar kullanılarak iyi kalite elde edilmesi oldukça önemlidir. Bu tez çalışmasına başlandığında, literatür detaylı olarak incelenmiş, ZnO yarıiletken filmlerinin aygıt uygulamalarında sıkça kullanıldığı ve film depolama parametreleri ya da katkı elementleri ile fiziksel özelliklerinin değişiminin yoğun bir şekilde araştırma konusu olduğu görülmüştür. La, Eu ve Er elementleri ile katkılı ZnO filmlerinin ucuz ve pratik bir metot olan sol jel metodu ile elde edilmesi ve karakterizasyonu üzerine yapılan çalışmaların, alüminyum (Al), indiyum (In), kalay (Sn) gibi diğer katkılara göre çok daha az olduğu dikkat çekmiştir. Bunun dışında, La katkılı ZnO filmleri kullanılarak elde edilen bir heteroeklem diyot çalışmasının bulunmadığı; Eu katkılı ZnO filmleri kullanılarak elde edilen heteroeklem diyot çalışmasının sadece bir iki tane olduğu ve bu çalışmaların da farklı *p-n* heteroeklemi ve yöntemler kullanılarak yapıldığı; Er katkılı ZnO filmleri kullanılarak yapılan diyot çalışmasının da birkaç tane olup, bu çalışmalarda ise, aydınlatma şiddetinin diyot parametreleri üzerine etkilerinin detaylı olarak incelenmemiş olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle yapılacak tez çalışmasının özgün değer taşıyıp, literatüre katkıda bulunulacağı düşünülmüştür. Tez çalışması süresince de, literatüre çok fazla çalışmanın eklenmediği görülmüştür. Bu durum da, yapılan çalışmanın önemini artırmaktadır.

La, Eu ve Er katkı elementlerinin, ZnO filminin yapısal, morfolojik, optik özelliklerine ve bu filmler kullanılarak elde edilen *p-n* heteroeklem diyotlarının elektriksel özelliklerine etkisinin açıklığa kavuşturulması literatüre katkı sağlayacaktır. Bu amaç doğrultusunda, ilk olarak sol jel metodu ile hazırlanan çözeltiler kullanılarak

spin kaplama tekniği ile p -Si alttaşlar üzerine katkısız ve farklı oranlarda (%0,2, %0,4, %0,6 %0,8, %1,0) La, Eu ve Er katkılı ZnO filmlerinin elde edilmesi planlanmıştır. Daha sonra bu filmler ile p -Si/ n -ZnO, p -Si/ n -ZnO:La, p -Si/ n -ZnO:Eu ve p -Si/ n -ZnO:Er heteroeklem yapılarının oluşturularak, diyot fabrikasyonu ve karakterizasyonlarının yapılması amaçlanmıştır. Öncelikli hedefimiz La, Eu ve Er katkısı ile ZnO filminin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerini değiştirerek, daha iyi filmler elde etmektir. Daha sonra, elde edilen filmleri kullanarak p - n heteroeklem diyotlarını üretip, diyot parametrelerini belirleyerek, en ideal diyotu elde edebilmeyi amaçlıyoruz. Aynı zamanda, elde ettiğimiz heteroeklem diyotların fotodiyot olarak da kullanılabilmesini hedefliyoruz.



2. TEORİK BİLGİLER

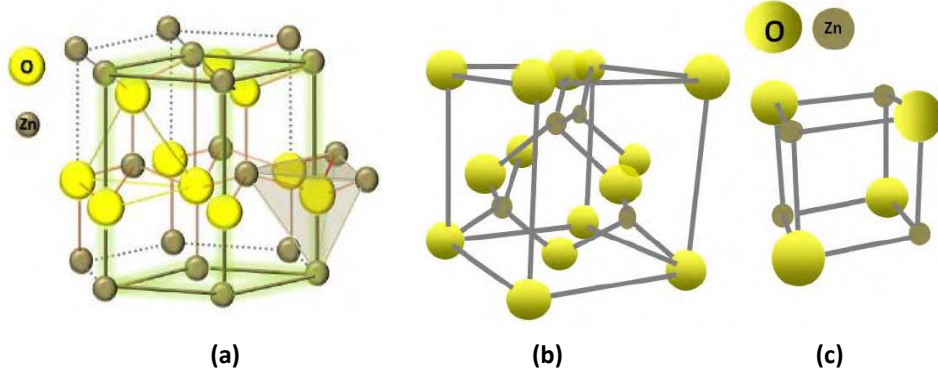
2.1. Çinko Oksitin Genel Özellikleri

Çinko oksit (ZnO) periyodik tablonun II. grup elementi olan çinko (Zn) ve VI. grup elementi olan oksijenin (O) oluşturduğu bir bileşiktir. ZnO elektronik devrelerin çoğunda kullanılan önemli bir yarıiletkenidir. ZnO, geniş optik bant aralığına ($E_g=3,37\text{eV}$, oda sıcaklığında) sahip *n*-tipi bir yarıiletkenidir. Görünür bölgede yüksek geçirgenliğe sahip olup, eksiton bağ enerjisi ise 60meV değerindedir [6, 7]. Bu enerji değerinin yüksek olması, malzemenin ışıltama (lüminesans) verimliliğinin artması anlamına gelir. Ayrıca ZnO kullanılarak yapılmış olan aygıtlar radyasyona karşı dayanıklı olduğundan uzay araştırmalarında da sıkça kullanılmıştır. ZnO sahip olduğu bu üstün özellikler nedeniyle, güneş pillerinde [8, 9], nem ve gaz sensörlerinde [10-12], fotodiyotlarda [13, 14] ve transistörlerde [15, 16] kullanılmaktadır.

ZnO filmi farklı yöntemler kullanılarak elde edilebilir. Hangi alanda kullanılacaksa, ona göre yöntemler ve deney şartları belirlenir. Bu yöntemlerden bazıları kimyasal buhar depolama (CVD) [36], moleküler demet epitaksi (MBE) [37], elektrokimyasal kaplama [38, 39], püskürterek kaplama [40, 41], sol jel [42, 43] ve kimyasal banyo depolama (CBD) [44] yöntemidir. Çeşitli büyütme yöntemleri kullanılarak elde edilen ZnO filmlerinin optik, morfolojik ve elektriksel özellikleri gibi birçok fiziksel özellikleri, deneysel şartlarla değiştirilebilir. Örneğin sol jel yönteminde, çözelti molaritesi ve pH değeri, çözelti karıştırma sıcaklığı, çözücü türü gibi çözelti hazırlama parametreleri ile döndürme hızı ve süresi, kurutma ve tavlama sıcaklık ve süreleri gibi film depolama parametrelerinin değiştirilmesi, elde edilen filmlerin fiziksel özelliklerini etkiler. Ayrıca, ZnO örgü içine farklı iyonik çaplardaki elementlerin katkılanması da, filmin fiziksel özelliklerini değiştirecektir. Bu nedenle, nanoçubuk, nanotel, nanoçiçek gibi farklı nanoyapılarda ZnO filmler üretilebileceği gibi, optik uygulamalar için istenen özelliklere sahip (yüksek optik bant aralığı, yüksek geçirgenlik, yüksek absorpsiyon ve kırıcılık gibi) filmler de üretilir. Geniş bir fiziksel özellik yelpazesinde elde edilebilen ZnO filmleri, istenen amaca uygun özelliklerde teknolojik ve endüstriyel alanlarda kullanılmak üzere üretilmektedir.

ZnO, doğada üç farklı kristal yapıda bulunur. Bunlar hekzagonal wurtzite, kübik çinko-blend ve kübik rock-salt yapılarıdır. Bu yapılara ait şematik gösterim Şekil 2.1'de verilmiştir. ZnO, normal şartlar altında hekzagonal wurtzite yapıya sahipken, yüksek basınç altında (10GPa) kübik rock-salt yapıya sahiptir. Kübik çinko-blend yapı,

hekzagonal wurtzite yapıya göre daha düşük iyonikliğe sahiptir. Bu durum, düşük taşıyıcı saçılımlarına ve yüksek katkı verimliliğine neden olmaktadır [6, 45].



Şekil 2.1. ZnO'nun farklı kristallenme biçimleri a) hekzagonal wurtzite b) kübik çinko-blend ve c) kübik rock-salt yapı [45]

ZnO'nun örgü parametreleri uzun yıllar boyunca araştırma konusu olmuştur [46]. Bir yarıiletkenin örgü parameteresinin bağlı olduğu dört etken vardır. Bunlar:

- i. serbest elektron konsantrasyonu,
- ii. yabancı atomların sayısı ve bu atomların örgü içinde oluşturduğu kusurlar,
- iii. dış gerilmeler (alttaş kirliliği, hazırlanan çözelti içindeki safsızlıklar) ve
- iv. sıcaklıktır.

Örgü parametreleri belirlenirken genellikle XRD verileri kullanılmaktadır. Oda sıcaklığında örgü sabitlerini belirlerken çeşitli deneysel ve teorik hesaplamalar kullanılmaktadır. Hekzagonal wurtzite yapıdaki ZnO'nun örgü parametrelerinden olan a değeri 3,2475 ile 3,2501 Å arasında değerler alabilirken, bir diğer örgü parametresi olan c ise 5,2042 ile 5,2075 Å arası değerler almaktadır. Teorik olarak hekzagonal wurtzite yapı için c/a oranı 1,633 değerindedir [6]. Ancak deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar genel olarak, örgünün dengede olmayışı ya da oluşan yapıdaki kusurlardan dolayı bu değerden sapmaktadır.

ZnO filmleri n -tipi yapıya sahiptirler. Ancak, iletkenlik tipleri uygun katkı ya da ısıtılma işlemiyle değiştirilebilmektedir [47]. n -tipi iletkenlik stokiometriyedeki sapmalardan dolayı oluşur. Araya sıkışan oksijen atomları ve çinko eksiklikleri, olası akseptör düzeyi yaratabilmesine karşılık; serbest yük taşıyıcılar, oksijen boşlukları ve araya sıkışan çinko ile bağlantılı olarak donör düzeylerden kaynaklanmaktadır.

ZnO'nun bol miktarda bulunması ve ucuz bir malzeme olması elde edilen filmlerin de maliyetini düşürmektedir. Ayrıca ZnO filmlerinin üretimi için yüksek sıcaklıklar ve vakum gerektirmeyen ucuz ve basit yöntemlerle de elde edilebilir olması, zehirsiz ve doğaya dost bir malzeme olması, 10^{-3} - 10^{-2} Ω cm aralığında düşük elektriksel özdirence ve görünür bölgede ortalama %80-90 aralığında yüksek optik geçirgenliğe sahip olması bu malzemeye ilginin artmasına ve dolayısıyla yapılan çalışmaların günden güne artmasına neden olmuştur [6, 48].

2.2. Nadir Toprak Elementlerinin Genel Özellikleri

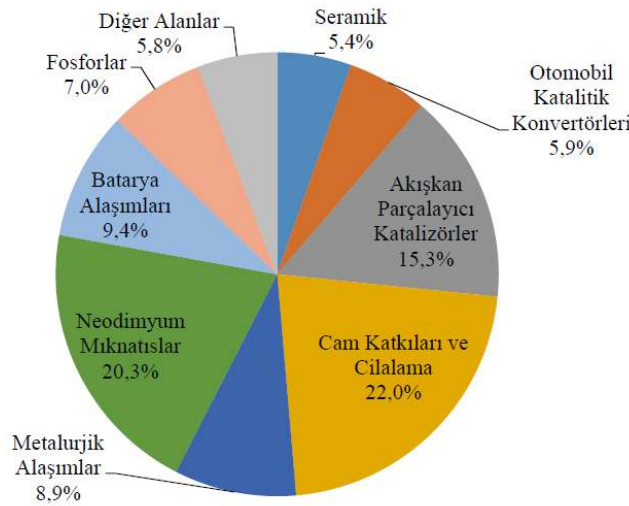
Atom numaraları periyodik tabloda, 57'den (Lantanyum; La) 71'e (Lutesyum; Lu) kadar olan ve kimyasal yapı olarak birbirleriyle benzerlik gösteren 15 element yer almaktadır. Bu elementler Lantanitler olarak da bilinen Nadir Toprak Elementleri (NTE) olarak adlandırılır (Şekil 2.2). Atom numaralarına göre bu elementler ağır ve hafif olmak üzere ikiye ayrılırlar. Atom numarası 57-64 arasında yer alan NTE'ler hafif, 65-71 arası olanlar ise ağır elementler olarak isimlendirilirler. Bu elementlerin isimlendirilmesinde "nadir" nitelendirmesinin yapılmasının nedeni ise diğer elementlerle karşılaştırıldığında yer kabuğunda daha az bulunmasıdır. NTE'ler kararlı bileşiklerinde genellikle +3 değerliklidirler. Ancak bazıları (Eu, Ce vb.) +2 değerlik almaktadır. Prometyum hariç diğer NTE'ler doğada bileşik halinde bulunmaktadır. Doğada en çok rastlandıkları yerler; volkanik kayalar, granitik kayalar, alkalın magmatizmayla bağlantılı karbonatit yataklarıdır [49].

H ¹	AĞIR NADİR TOPRAK ELEMENTLER																He ²								
Li ³	Be ⁴	HAFİF NADİR TOPRAK ELEMENTLER																B ⁵	C ⁶	N ⁷	O ⁸	F ⁹	Ne ¹⁰		
Na ¹¹	Mg ¹²																	Al ¹³	Si ¹⁴	P ¹⁵	S ¹⁶	Cl ¹⁷	Ar ¹⁸		
K ¹⁹	Ca ²⁰	Sc ²¹	Ti ²²	V ²³	Cr ²⁴	Mn ²⁵	Fe ²⁶	Co ²⁷	Ni ²⁸	Cu ²⁹	Zn ³⁰	Ga ³¹	Ge ³²	As ³³	Se ³⁴	Br ³⁵	Kr ³⁶								
Rb ³⁷	Sr ³⁸	Y ³⁹	Zr ⁴⁰	Nb ⁴¹	Mo ⁴²	Tc ⁴³	Ru ⁴⁴	Rh ⁴⁵	Pd ⁴⁶	Ag ⁴⁷	Cd ⁴⁸	In ⁴⁹	Sn ⁵⁰	Sb ⁵¹	Te ⁵²	I ⁵³	Xe ⁵⁴								
Cs ⁵⁵	Ba ⁵⁶	La-Lu	Hf ⁷²	Ta ⁷³	W ⁷⁴	Re ⁷⁵	Os ⁷⁶	Ir ⁷⁷	Pt ⁷⁸	Au ⁷⁹	Hg ⁸⁰	Tl ⁸¹	Pb ⁸²	Bi ⁸³	Po ⁸⁴	At ⁸⁵	Rn ⁸⁶								
Fr ⁸⁷	Ra ⁸⁸	Ac-Lr	Rf ¹⁰⁴	Db ¹⁰⁵	Sg ¹⁰⁶	Bh ¹⁰⁷	Hs ¹⁰⁸	Mt ¹⁰⁹																	
NADİR TOPRAK ELEMENTLER																									
*Lantanid Serisi		La ⁵⁷	Ce ⁵⁸	Pr ⁵⁹	Nd ⁶⁰	Pm ⁶¹	Sm ⁶²	Eu ⁶³	Gd ⁶⁴	Tb ⁶⁵	Dy ⁶⁶	Ho ⁶⁷	Er ⁶⁸	Tm ⁶⁹	Yb ⁷⁰	Lu ⁷¹									
**Aktinid Serisi		Ac ⁸⁹	Th ⁹⁰	Pa ⁹¹	U ⁹²	Np ⁹³	Pu ⁹⁴	Am ⁹⁵	Cm ⁹⁶	Bk ⁹⁷	Cf ⁹⁸	Es ⁹⁹	Fm ¹⁰⁰	Md ¹⁰¹	No ¹⁰²	Lr ¹⁰³									

Şekil 2.2. NTE'lerin periyodik tablodaki yeri [50]

2014 yılında elde edilen verilere göre dünyada yaklaşık 131 milyon ton NTE bulunduğu tahmin edilmektedir. Bu rezervin çok büyük bir kısmını Çin Halk Cumhuriyeti karşılamaktadır. 4 milyonluk bir rezerv ise Türkiye’de bulunmaktadır [51]. Ülkemizde ise Eskişehir, Malatya, Çanakkale, Kırşehir ve Van’da NTE bulunmaktadır. Ancak bunlar arasında en önemli yatak Eskişehir-Sivrihisar bölgesinde 15km²’lik bir alanda bulunmaktadır [52]. Bu bölgede bulunan başlıca NTE’leri ise lantanyum, seryum ve neodyumdur. Eskişehir’de bulunan NTE’lerinin kaynağının hidrotermal çözeltiler ve bu çözeltilerin kaynağının ise volkanizma ile ilişkili olduğu düşünülmektedir [51].

NTE’lerinin kullanımı ülkeye ve ürüne bağlı olarak değişimler göstermektedir. Gözlük camlarından telefon kulaklığına kadar çok geniş uygulama ve kullanım alanları mevcuttur. Şekil 2.3’te NTE’lerinin kullanım alanları yüzdesi verilmiştir. Bu şekilden de görüleceği üzere, çok farklı alanlarda kullanım alanları mevcuttur [53].



Şekil 2.3. NTE kullanım alanları yüzdesi [53]

Bu tez çalışmasında katkı elementi olarak kullanılan La, Eu ve Er ile ilgili kısa bilgiler aşağıda verilmiştir.

Lantan’ın, atom numarası 57, erime noktası 826°C, iyonik yarıçapı ise 0,104nm’dir. La, yumuşak, kolayca tutuşabilir, tuzları genellikle kolayca çözünmeyen maddelerdir. Kimyasal olarak aktiftir, NTE’leri arasında en aktif olanıdır. Havada hızla oksitlenir ve su ile tepkimeye girerek hidroksit oluşturur [54]. La, hibrit batarya ve hibrit araçlarda, projeksiyonlarda, stüdyo aydınlatmalarında, fiber optik kablolarda veri aktarım hızını artırmak için, kaliteli kamera merceği üretmek için kameralarda, teleskoplarda, gece görüş dürbünlerinde, özel optik cam üretimlerinde, pH ayarı gerektiren yerlerde, X-

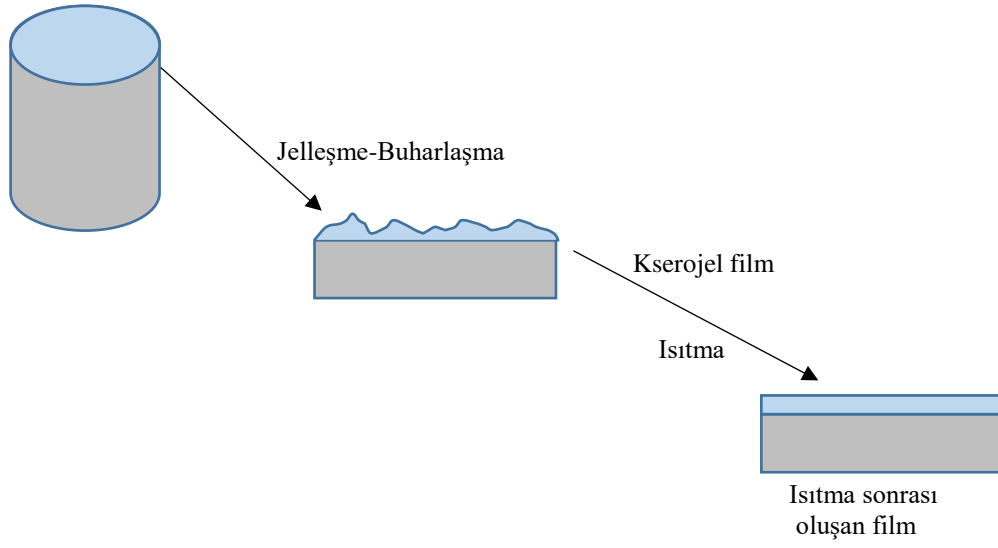
ışınları cihazlarında, kaliteli alaşım gerektiren yerlerde ve hava kirliliği kontrolünde kullanılmaktadır [55].

Evropiyum'un, atom numarası 63, erime noktası 822°C ve kaynama noktası ise 1529°C'dir. Eu; yumuşaktır, NTE'leri arasında en reaktif elementlerdendir. Oda sıcaklığında hava ile etkileşerek hızlıca kararmaya başlar, 150°C ile 180°C arasında kolayca yanar ve su ile hızlıca reaksiyona girebilir. Bitkilere, hayvanlara, kısaca çevreye zararlı değildir [56]. Eu, televizyonlarda kırmızımsı ve turuncu rengin sağlanmasında, enerji tasarruflu floresan ışıklarda, lazerlerde, sahte paraların belirlenmesinde, nükleer reaktörlerde füzyon kontrolünde ve LCD ekranlarda kullanılmaktadır [55].

Erbiyum'un, atom numarası 68, erime noktası 1522°C ve kaynama noktası 2510°C'dir. Er, yumuşak, parlak, tuzları gül renklidir, görünür, mor ötesi ve kızılötesi ışıktaki keskin bir absorpsiyon spektrumuna sahiptir. Havada çok karardır. Oksijen ve su ile çok yavaş reaksiyona girer ve asitlerde erir [57]. Er, cam boyamada, sertlik ve işlenebilirliğin artırılmasında, pembe renkli olduğu için cam veya porselenlerde renklendirici olarak, dermatolojide kullanılan lazerlerde, güneş gözlüklerinde, takı sektöründe, fiber optik kablolar, nükleer santrallerde füzyon kontrolünde kullanılmaktadır [55].

2.3. Sol Jel Yöntemi

Sol jel yöntemi, başlangıç malzemesi olarak çözelti (sol) ve bu çözeltinin jelleştirilmesi, çözücülerin uzaklaştırılması temeline dayanır. "Sol"ün hazırlanmasında kullanılan başlangıç çözeltileri metal tuzları veya metal organik bileşiklerdir. Sıvı içerisinde yer alan kolloidal katı taneciklerin kararlı bir karışımı sol'ü oluşturur. Bu tanecikler kolloid olarak adlandırılır ve çok küçük boyutlara sahiptirler. Yaklaşık olarak boyutları 1nm ile 1µm arasında değişebilir. Moleküller arasında bulunan elektriksel itme kuvveti ve Van der Waals etkisi, yerçekimi kuvvetine göre daha fazla olduğu için solü meydana getiren malzemeler dibe çökmeyecektir. Çözelti içindeki moleküller genişleyerek büyük bir boyuta ulaştığında jel adını alır. Katı yapının sürekliliği, jelin elastik bir özellik kazanmasını sağlar. Jelin çatlak oluşturmada kurutulması çok önemlidir. Bu yüzden kurutma işlemi çok yavaş ve dikkatli yapılmalıdır. Jelin kurutulması, çözücü içinde bulunan alkol ve su fazlalığının giderilmesi anlamına gelir. Kurutma işlemi ardından jel büzülür ve oluşan katıya "kserojel (xerogel)" denir. Sol jel yöntemiyle film kaplamanın şematik bir gösterimi Şekil 2.4'te verilmiştir [58, 59].



Şekil 2.4. Sol jel tekniği ile film kaplamanın şematik gösterimi [60]

Teknolojide çok önemli bir konuma sahip olan sol jel yöntemi, kullanılan diğer kaplama yöntemlerine göre daha fazla avantaj sağladığından geçmişten günümüze önemini yitirmemiştir. Söz konusu bu avantajları sıralayacak olursak; homojen ve saf yapıya sahip filmlerin düşük sıcaklıklarda elde edilebilmesi ve bu şekilde enerji tasarrufu yapılmasını sağlıyor olması, kaplanan filmin yapısının rahatlıkla kontrol edilebilmesi, farklı geometrik yapıya sahip olan filmlerin bu yöntemle homojen ve pürüzsüz olarak kaplanabiliyor olması, kirlilik oluşturmaması ve tehlikeli olmamasıdır. Bununla birlikte, gözenekli yapıya sahip, kırılma indisi düşük, farklı geometrilerde ve ebatlarda ya da çok katmanlı filmler hazırlayabilmek de mümkün olmaktadır. Sol jel yönteminin avantajlarının yanında dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar önem derecesine göre sıralanırsa; filmin hazırlanması aşamasında çok fazla hammaddenin boşa gitmesi ve eğer kullanılan kimyasal malzeme pahalı bir malzeme ise maliyetin de bu oranda artmasıdır. Bunun yanında, sol jel yöntemiyle hazırlanan film yüzeylerinde oluşabilecek küçük gözeneklerin giderilememesi ve film kaplama işleminin fazla zaman alması da dezavantajları arasında yer almaktadır [58-61].

2.3.1. Sol jel yöntemi ile film kaplama teknikleri

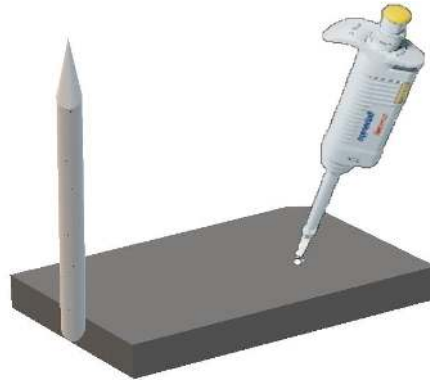
Sol jel yönteminde elde edilen çözelti ile alttaş üzerine, farklı teknikler kullanılarak film elde edilebilir. Bu tekniklerden en çok kullanılanları döndürerek (spin) kaplama, daldırma (dip) ve püskürtme teknikleridir [62].

Dip kaplama tekniğinde, kullanılacak olan alttaş belirlenen hızlarda hazırlanan çözelti içine daldırılır ve aynı hızda geri çekilir. Her daldırma sonrası kurutma işlemi yapılır ardından tekrar belirlenen sayı kadar çözelti içine daldırılır. Daldırma işlemi tamamlandıktan sonra film tavlanır ve istenilen özelliklere sahip film elde edilmiş olur.

Püskürterek kaplama tekniğinde ise, hazırlanan çözelti ısıtılmış veya soğuk bir alttaşa basınçlı püskürtücü bir başlık kullanılarak püskürtülür. Damlacıkların sıcak alttaşa çarptıktan sonra çözücü buharlaşırken, çözünen madde alttaş üzerinde tutunur. Bu şekilde yüzeyde ince film elde edilmiş olur.

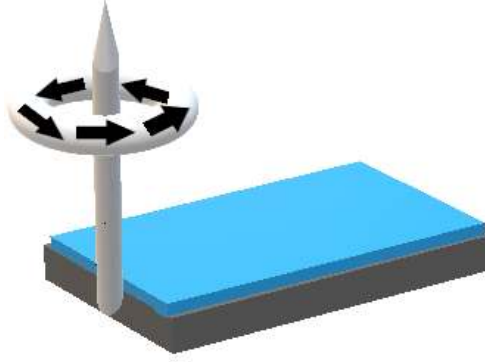
Spin kaplama tekniğinde, çözelti alttaş üzerine damlatılır, belirlenen hızda ve sürede alttaşın dönmesi sağlanır. Alttaş dönerken çözelti merkezci kuvvetin etkisi ile tüm alttaş yüzeyine yayılır. Döndürme işlemi tamamlandıktan sonra ortamdan çözücüü uzaklaştırmak ve film oluşumunu sağlamak için hazırlanan çözelti ile kaplanan alttaş belirlenen sıcaklıktaki fırın içinde belirlenen süre kadar bekletilir. Böylece tek katlı bir film elde edilmiş olur. Elde edilen filmin kalınlığı çözelti molaritesine, döndürme hızına ve süresine ve alttaşın cinsine bağlıdır. Spin kaplama tekniği basamakları aşağıda kısaca anlatılmıştır.

i. Damlatma; bu basamakta çözelti bir mikropipet yardımıyla alttaş üzerine damlatılır (Şekil 2.5). Damlatılan çözelti alttaşın tamamını kaplamaya yetecek kadar olmalıdır. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken bir başka husus ise, çözeltinin tamamen çözünmüş olması ve içinde büyük parçacıkların olmamasıdır. Ayrıca kullanılacak alttaşın da temiz olması oluşacak film kalitesi açısından çok önemlidir.



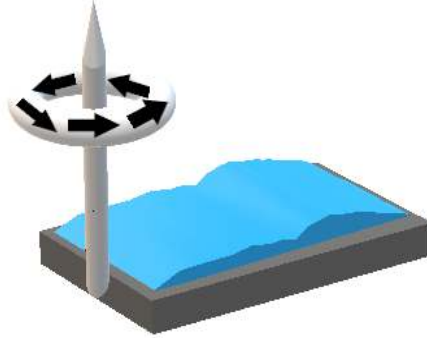
Şekil 2.5. Çözeltinin alttaş üzerine damlatılması

ii. Döndürme; çözeltinin alttaş üzerinde homojen olarak dağılması ve fazla çözeltinin alttaş üzerinden uzaklaşmasını sağlamak için, numune tutucusuna yerleştirilen alttaşlar üzerine çözelti damlatıldıktan hemen sonra, belirli bir hızda ve sürede döndürme işlemi yapılır (Şekil 2.6). Dönme sırasında fazla çözeltinin uzaklaşmasıyla film kalınlığı azalır.



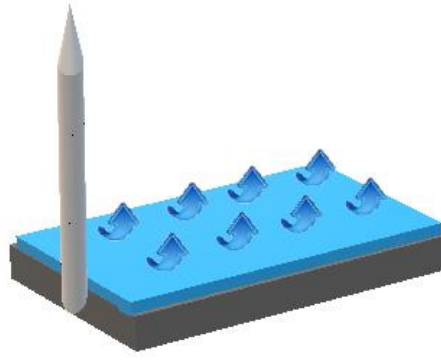
Şekil 2.6. Çözelti ile birlikte alttaşın dönmesi

iii. Durdurma; dönme sonrasında fazla çözelti artık alttaş yüzeyini terk etmiştir (Şekil 2.7). Alttaş üzerinde ince bir tabaka halinde çözelti bulunmaktadır. Bu tabakaya zarar vermeden hassas bir şekilde numune tutucudan alınır ve bir sonraki basamağa geçilir.



Şekil 2.7. Dönme işleminin tamamlanması, durdurma

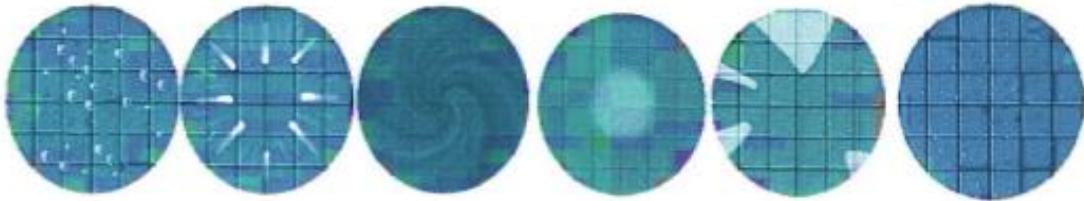
iv. Buharlaşma; durdurma aşamasından sonra buharlaşma aşamasına geçilir (Şekil 2.8). Buharlaşma ile birlikte jel oluşumu da sağlanmış olur. Bu aşamada belirlenen sıcaklıktaki fırın içine yerleştirilir ve yüzeydeki çözücünün buharlaşmasının ardından homojen bir filmin oluşması sağlanır.



Şekil 2.8. Buharlaşıma ve film oluşumu

Spin kaplama tekniğinin bazı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Kolay ve hızlı bir tekniktir. Çok katmanlı filmler elde etmek istenirse, rahatlıkla uygulanabilir. Hatta katman sayıları değiştirilerek film kalınlığı da değiştirilebilir. Çok yüksek sıcaklıklar da gerektirmez. Ancak, çok büyük yüzeylerin homojen kaplanması biraz zordur. Çözücü hızlı buharlaşırsa, homojen bir film elde edilemez. İşlem basamakları arasında film yüzeyinin temiz tutulması zordur [63].

Spin kaplama tekniğinde, film yüzeyinde oluşabilecek kusurlar filmin tüm özelliklerini etkiler. Alttaş üzerindeki ya da çözelti içindeki hava kabarcığı, oluşacak film yüzeyinde küçük noktaların oluşmasına neden olacaktır. Döndürme hızının yüksek olması, damlatılan çözeltinin alttaş üzerinde döndürme öncesi fazla bekletilmesi, alttaş yüzeyinin doğru bir şekilde temizlenmemiş olması film yüzeyinde kuyruklu yıldız ya da çizgiler halinde kusurların oluşmasına neden olacaktır. Dönüş hızı ve hızlanma ayarı çok yüksek ve döndürme süresi kısa olursa, film yüzeyinde girdap desenine benzeyen kusurlar oluşacaktır. Eğer film yüzeyinde kaplanmamış alanlar varsa, damlatılan çözelti yetersizdir. Aynı şekilde film yüzeyinde iğne delikleri gibi görüntüler mevcutsa, alttaş yüzeyi yeteri kadar temizlenmemiş olabilir (Şekil 2.9) [64].

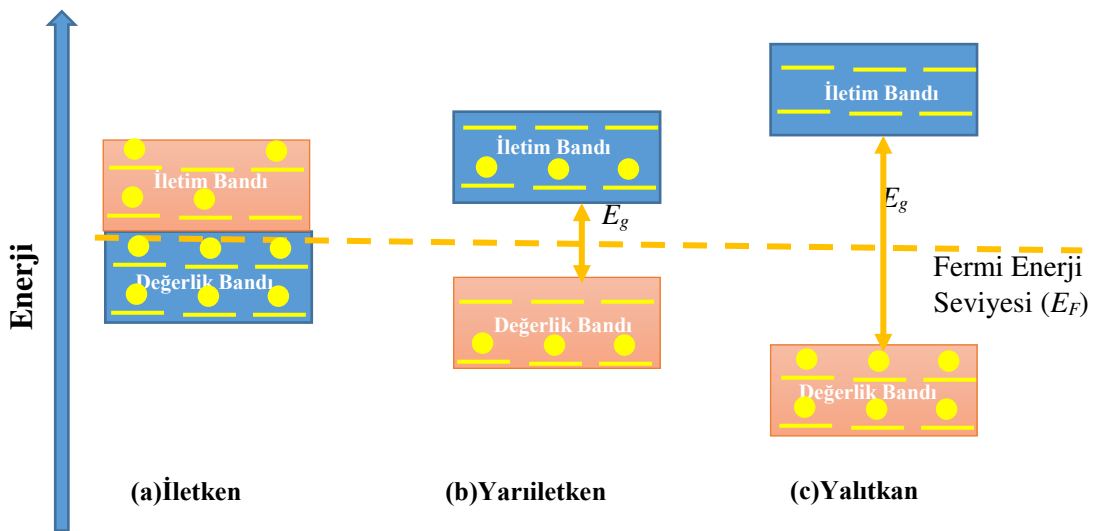


Şekil 2.9. Spin kaplama tekniği ile elde edilen film üzerinde oluşabilecek kusurlar [64]

2.4. Yarıiletkenlerin Genel Özellikleri

Katı malzemeler iletkenliklerine göre, iletken, yarıiletken ve yalıtkan olmak üzere üç ana gruba ayrılırlar (Şekil 2.10.). Bir başka deyişle, malzemeler değerlik ve iletim bandı arasındaki optik bant aralığı değerlerine göre sınıflandırılabilir [65]. Şekil 2.10.a'da bir iletkenin ait enerji bant diyagramı verilmiştir. İletkenlerde, enerji seviyelerinde daha çok elektron bulunmaktadır. Bu elektronlar hareket ederek malzemenin yüksek bir elektriksel iletkenlik sergilemesine sebep olurlar. Şekil 2.10.b'de bir yarıiletkenin ait enerji bant diyagramı verilmiştir. Yarıiletkenler, iletkenlikleri metaller ile yalıtkanlar arasında olan malzemelerdir. Yarıiletkenlerde değerlik bandı ve iletim bandı yasak enerji aralığı (E_g) ile birbirinden ayrılmıştır ve bu değer yaklaşık 1,0-3,5eV mertebesinde. Yalıtkanlar (Şekil 2.9.c) için E_g değeri, 3,5-6,0eV arasında ya da daha büyük değerler alır. Oda sıcaklığında yalıtkanların iletim bandında hiçbir elektron bulunmaz ve değerlik bandı tamamen doludur [66].

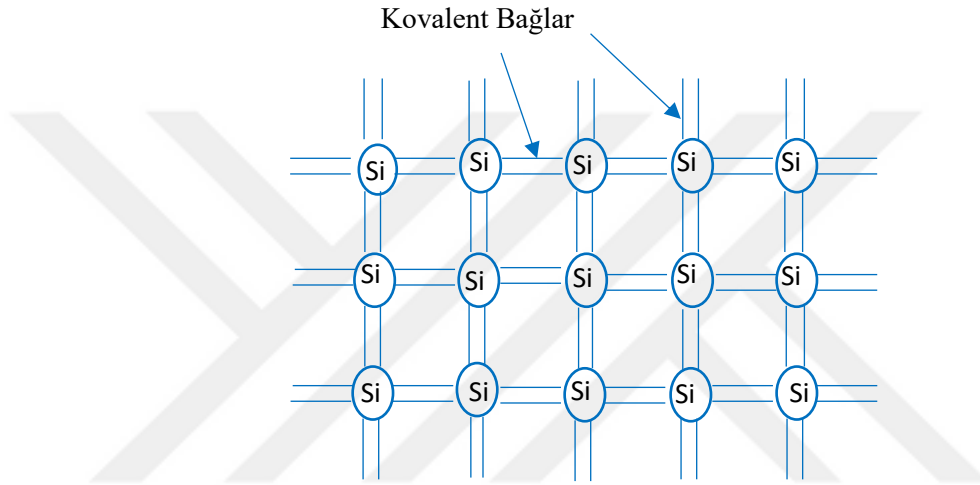
Yarıiletkenler de kendi aralarında genel olarak elementel ve bileşik yarıiletkenler olarak iki grupta sınıflandırılırlar. Elementel yarıiletkenler, aynı atomlardan oluşan Germanyum ve Silisyum (Ge ve Si gibi) yarıiletkenlerdir. Periyodik tablonun IV. grubunda yer alırlar. Bileşik yarıiletkenler, iki veya daha fazla elementten meydana gelen yarıiletkenlerdir. ZnO, galyum arsenayt (GaAs) ve indiyum fosfat (InP) iki elementten meydana gelen yarıiletkenlere, bakır alüminyum sülfür (CuAlS_2), alüminyum galyum nitrit ($\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$) ise üç elementten meydana gelen yarıiletkenlere birer örnektir.



Şekil 2.10. Enerji bant aralıklarına göre iletken, yarıiletken ve yalıtkanlar

2.4.1. Katkılı yarıiletkenler

Periyodik tablonun IV. grubundaki Si atomları birbirlerine kovalent bağ ile bağlıdır. Her bir Si elementi 4 adet değerlik elektronuna sahiptir. Değerlik enerji kabuğunu tamamlamak için en yakın Si atomu komşusu ile kovalent bağ yapar. Şekil 2.11’de saf Si örgünün iki boyutlu görünümü verilmiştir. Saf Si örgüsü değerlik elektron sayısı beş olan bir element ile katkılanırsa *n*-tipi bir yarıiletken, değerlik elektron sayısı üç olan bir element ile katkılanırsa *p*-tipi bir yarıiletken elde edilmiş olur.

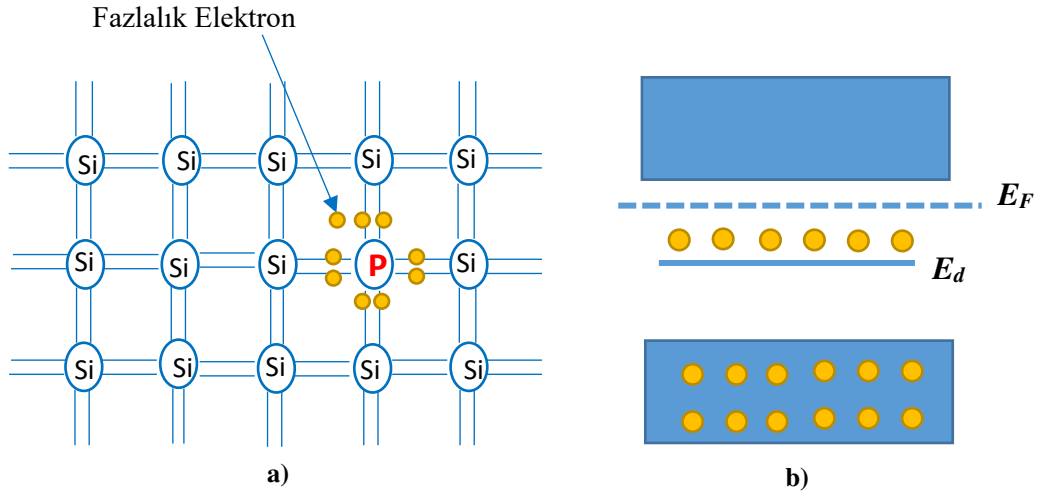


Şekil 2.11. Katkısız Si örgüsünün iki boyutlu görünümü

2.4.1.1. *n*-tipi yarıiletkenler

Saf Si kristali Fosfor (P) gibi bir V. grup elementi ile katkılanırsa, 4 değerlik elektronuna sahip olan Si atomları ile kovalent bağ yapar ve fazla olan bir elektronunu kristale verir. Bu durum Şekil 2.12.a’da verilmiştir.

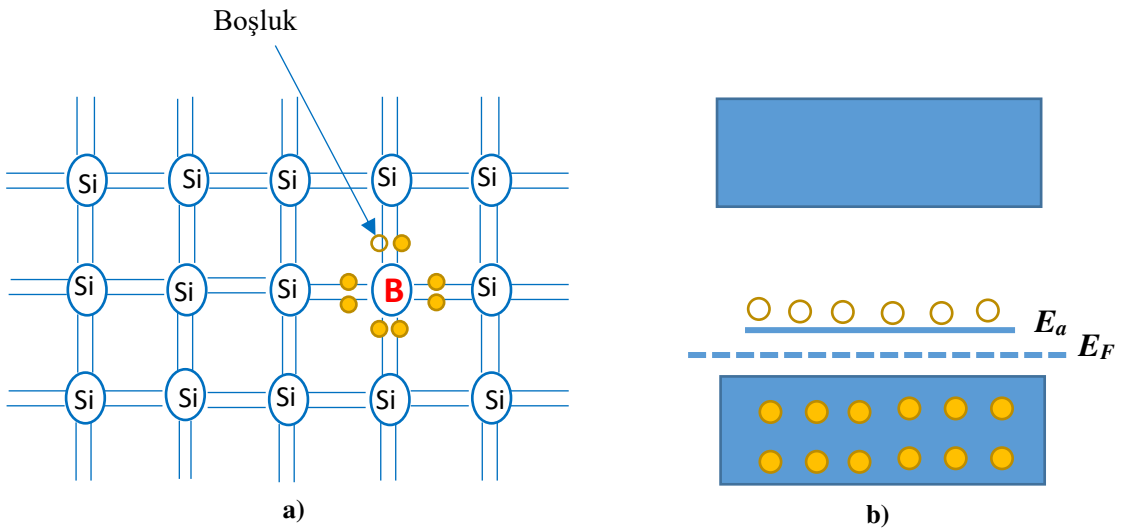
Fazlalık olan bu 1 elektron donör elektronu olarak adlandırılır. Bu fazlalık elektronu P atomuna zayıf bir şekilde bağlıdır. Bu donör elektronu çok küçük bir enerji ile atomundan ayrılarak Si kristalinin iletim bandına çıkabilir. Şekil 2.12.b’de *n*-tipi bir yarıiletken için enerji bant diyagramı verilmiştir. E_d enerji seviyesi, donör elektronunun enerji halidir. Bu şekilde elde edilen yarıiletkenler, *n*-tipi yarıiletken olarak adlandırılırlar ve bu tip yarıiletkenlerde iletim elektronlar ile sağlanır.



Şekil 2.12.a) *P atomu ile katkılanmış Si örgünün iki boyutlu görünümü* **b)** *P atomu ile katkılanmış Si atomunun enerji bant diyagramı*

2.4.1.2. *p*-tipi yarıiletkenler

Saf Si kristali Bor (B) gibi bir III. grup elementi ile katkılanırsa, 4 değerlik elektronuna sahip Si atomları ile kovalent bağ yapar ve kristalden bir elektron alır. Bu durum Şekil 2.13.a’da verilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü gibi, bir kovalent bağlanma pozisyonu boştur. B atomlarıyla oluşturulan bu boşluk, değerlik bandındaki bir elektron tarafından işgal edilebilir. Bu durumda değerlik bandında yeni boşluklar oluşacaktır. Boşalan bu yeni pozisyon yarıiletken içindeki hol olarak düşünülebilir.

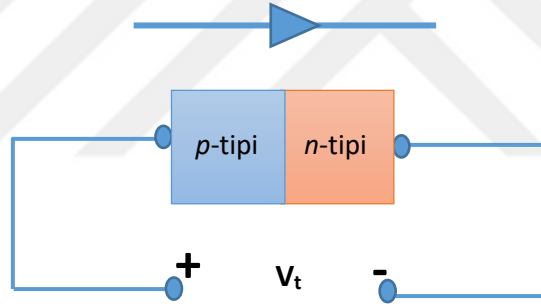


Şekil 2.13.a) *B atomu ile katkılanmış Si örgünün iki boyutlu görünümü* **b)** *B atomu ile katkılanmış Si atomunun enerji bant diyagramı*

Şekil 2.13.b’de enerji bant diyagramı verilmiştir. Negatif olarak yüklenmiş B atomu kristal içinde sabitken, bu hol kristal örgü boyunca hareket edebilir. Bu III. grup atom, değerlik bandından bir elektron aldığı için akseptör atomu olarak adlandırılır. Bu tip yarıiletkenler *p*-tipi yarıiletken olarak adlandırılır ve bu tip yarıiletkenlerde iletim holler ile sağlanır [66].

2.5. *p-n* Eklem Diyotlar

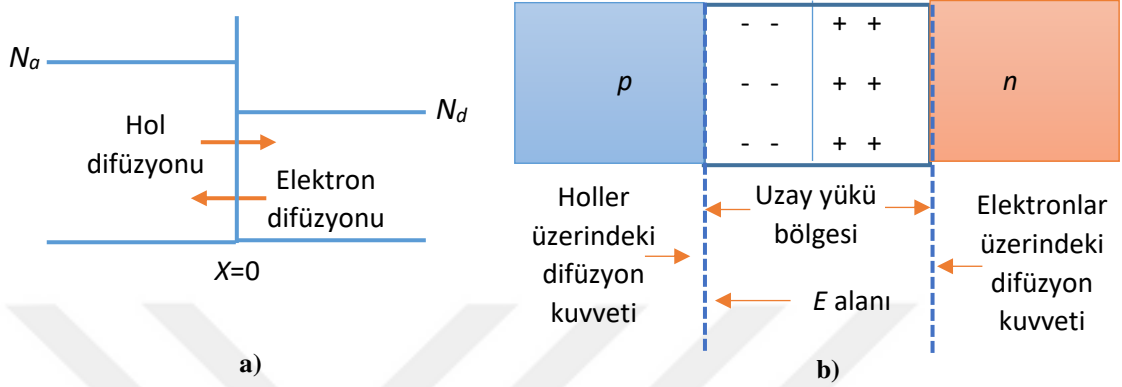
Bir diyot, tek bir *p-n* ekleminden oluşan yarıiletken bir elektronik devre elemanıdır. *p-n* eklem diyotları, bir *p*-tipi yarıiletken ile bir *n*-tipi yarıiletken bir araya getirilerek elde edilir. *n*-tipi ve *p*-tipi bölgeler farklı yarıiletkenden yapılmış ise (*n*-Si/*p*-Ge), bu bir heteroeklem; *n*-tipi ve *p*-tipi bölgeler aynı yarıiletkenden yapılmış ise (*n*-Si/*p*-Si), bu bir homoeklem olur. *p-n* eklemi bir beslemde akım akışına izin verirken, diğer beslemde izin vermez, bu yüzden akımı doğrultur. Şekil 2.14’te *p-n* eklemi ve diyotu temsil eden simge gösterilmiştir.



Şekil 2.14. *p-n* eklemine şematik gösterimi ve diyodun simgesi

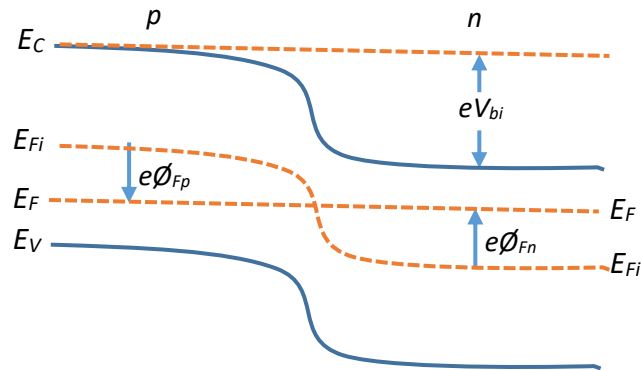
n-tipi ve *p*-tipi bir yarıiletken bir araya getirildiği zaman termal denge söz konusu olmaktadır. Bir yarıiletken sistem boyunca Fermi enerjisinin sabit olmasına termal denge denir. *p* ve *n* bölgeleri arasına bir voltaj uygulandığı zaman, *p-n* eklemi artık termal dengede değildir. Şekil 2.15.a’da *p* ve *n* bölgelerindeki kirlilik katkı konsantrasyonları gösterilmektedir. *n* bölgesinde çoğunluk taşıyıcı olan elektronlar *p* bölgesine ve *p* bölgesinde çoğunluk taşıyıcı olan holler *n* bölgesine geçmeye başlayacaktır. Yarıiletkene bir dış gerilim uygulanmadığı sürece bu geçiş termal denge sağlanıp, Fermi enerji seviyesi eşitleninceye kadar sürecektir. *n* bölgesinden elektronlar difüze olduğu için geride pozitif olarak yüklenmiş donör atomları kalır. Benzer şekilde, *p* bölgesinden holler difüze olduğu için geride negatif olarak yüklenmiş akseptör atomları bırakılır. Net

pozitif ve negatif yükler bir elektrik alan oluştururlar. Bu elektrik alanın yönü n bölgesinden p bölgesine doğrudur. Şekil 2.15.b’de bu bölgelerdeki net pozitif ve negatif yükler gösterilmektedir. Bu iki bölge uzay yükü bölgesi olarak adlandırılır. Bu bölgede hareketli yük bulunmadığından tükenim bölgesi olarak da adlandırılır [66].



Şekil 2.15. a) Düzgün olarak katılanmış ideal bir p-n eklemine katkı profili ve **b)** uzay yükü bölgesi, elektrik alan ve yüklü taşıyıcılar üzerine etkiyen kuvvetler

p - n eklemine voltaj uygulanmadığı zaman, eklem termal dengede olur ve tüm sistem boyunca Fermi enerji seviyesi sabit kalır. Termal dengede ki p - n eklemi için enerji bant diyagramı Şekil 2.16’da verilmiştir. Fermi enerji seviyeleri eşitlendiğinde değerlik ve iletim bölgesi boyunca enerji bantları bükülmelidir. n bölgesinde iletim bandı içinde bulunan elektronlar, p bölgesine geçmeye çalıştığında bir potansiyel engeli ile karşılaşacaktır. Bu potansiyel engeli yerleşik potansiyel engeli olarak adlandırılır ve V_{bi} şeklinde gösterilir. V_{bi} , p ve n bölgeleri arasında dengeyi sağlamaktadır.



Şekil 2.16. Termal dengedeki p-n eklemine enerji bant diyagramı

Yerleşik potansiyel engeli, p ve n bölgelerindeki asal Fermi seviyeleri arasındaki fark olarak ifade edilebilir. Şekil 2.17’de gösterildiği gibi ϕ_{Fn} (n bölgesindeki potansiyel engel yüksekliği) ve ϕ_{Fp} (p bölgesindeki potansiyel engel yüksekliği) potansiyellerini belirleyebiliriz. Böylece,

$$V_{bi} = |\phi_{Fn}| + |\phi_{Fp}| \quad (2.1)$$

denklemini yazabiliriz. n bölgesindeki iletim bandındaki elektron konsantrasyonu

$$n_0 = N_d \exp \left[\frac{-(E_C - E_F)}{k_B T} \right] \quad (2.2)$$

denklemiyle verilir. Bu denklemi aşağıdaki formda da ifade edebiliriz;

$$n_0 = n_i \exp \left[\frac{E_F - E_{Fi}}{k_B T} \right] \quad (2.3)$$

bu ifadede n_i ve E_{Fi} sırasıyla asal taşıyıcı konsantrasyonu ve asal Fermi enerjisidir. n bölgesindeki ϕ_{Fn} potansiyeli,

$$e\phi_{Fn} = E_{Fi} - E_F \quad (2.4)$$

olarak ifade edilebilir. O zaman (2.3) denklemi,

$$n_0 = n_i \exp \left[\frac{-(e\phi_{Fn})}{k_B T} \right] \quad (2.5)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (2.5)’in her iki tarafınında doğal logaritmasını alıp, n_0 yerine N_d yazarak ve potansiyeli denklemden çekerek,

$$\phi_{Fn} = \frac{-k_B T}{e} \ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right) \quad (2.6)$$

ifadesi elde edilebilir. Benzer şekilde, p bölgesindeki hol konsantrasyonu;

$$p_0 = N_a = n_i \exp \left[\frac{E_{Fi} - E_F}{k_B T} \right] \quad (2.7)$$

denklemiyle verilir. Burada N_a akseptör konsantrasyonudur. p bölgesindeki ϕ_{Fp} potansiyeli,

$$e\phi_{Fp} = E_{Fi} - E_{Fp} \quad (2.8)$$

olarak verilir. Denklem (2.7) ve (2.8)’i birleştirilirse,

$$\phi_{Fp} = \frac{+k_B T}{e} \ln \left(\frac{N_a}{n_i} \right) \quad (2.9)$$

denklemleri elde edilir. Sonuç olarak V_{bi} ,

$$V_{bi} = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) = V_t \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad (2.10)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadede $V_t = k_B T / e$ 'dir ve termal voltaj olarak ifade edilir [66].

p ve n bölgeleri arasına bir potansiyel fark uygulanacak olursa denge şartı bozulacak ve sistem boyunca Fermi enerji seviyesi sabit kalmayacaktır. n bölgesi üzerindeki Fermi seviyesi, p bölgesi üzerindeki Fermi seviyesinden aşağıdadır. Bu iki Fermi enerji seviyesi arasındaki fark uygulanan voltaja eşittir. Artık toplam potansiyel engeli beslem uygulanmamış durumdakinden daha büyük olacaktır. Artan potansiyel engeli elektronların ve hollerin geçişini engeller. Böylece yük akışı ve akım olmaz. p bölgesine göre n bölgesine daha pozitif bir voltaj uygulanırsa, p - n eklemının enerji bant diyagramı Şekil 2.17'deki gibi olacaktır.

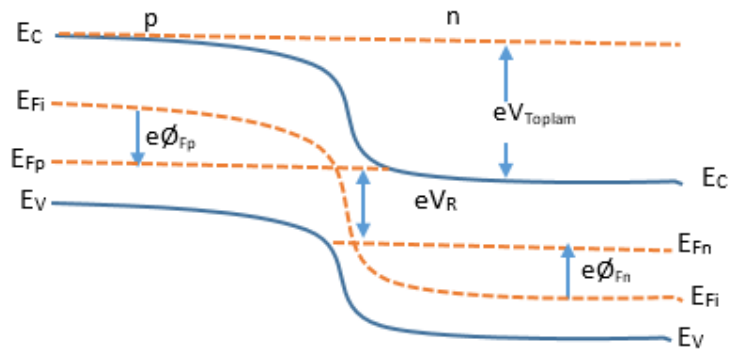
Şekil 2.17'de V_{Toplam} ile gösterilen toplam potansiyel engeli

$$V_{Toplam} = |\phi_{Fn}| + |\phi_{Fp}| + V_R \quad (2.11)$$

ifadesi ile verilir. Burada V_R uygulanan ters beslem voltajının büyüklüğüdür. Bu denklem aşağıdaki gibi de yazılabilir:

$$V_{Toplam} = V_{bi} + V_R \quad (2.12)$$

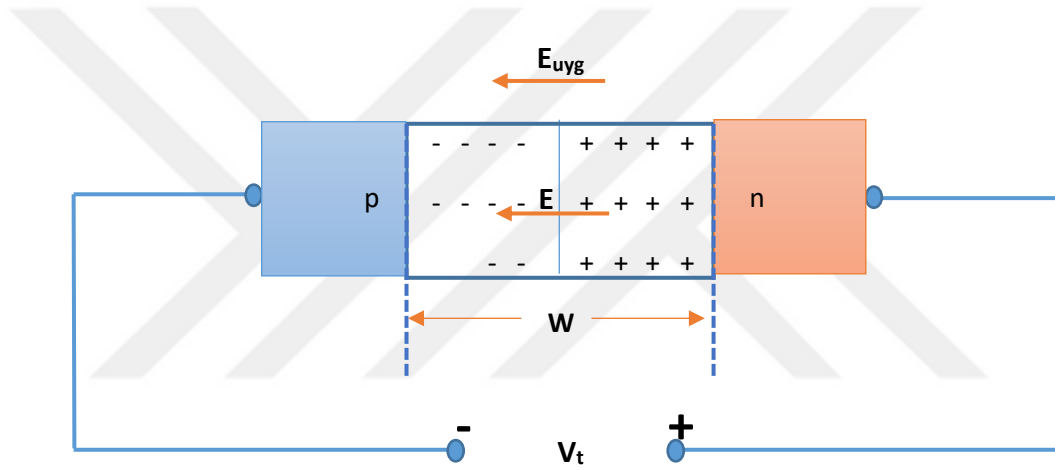
Burada V_{bi} , termal denge için tanımlanan yerleşik potansiyel engeli ile aynıdır.



Şekil 2.17. Ters beslem altındaki p - n eklemının enerji bant diyagramı

Şekil 2.18, V_R ters beslem voltajının uygulandığı bir p - n eklemine göstermektedir. Aynı şekil üzerinde, uygulanan voltajın oluşturduğu elektrik alan ile uzay yükü bölgesindeki alan gösterilmektedir. Nötr p ve n bölgelerindeki elektrik alan yok denecek kadar azdır. Elektrik alan pozitif yükten başlar, negatif yükte son bulur. Yani, eğer elektrik alan artarsa, pozitif ve negatif yüklerin sayısı da artmalıdır. Ters beslem voltajı V_R 'nin artmasıyla, W uzay yükü genişliği artabilir. Toplam W genişliği aşağıdaki gibi ifade edilir:

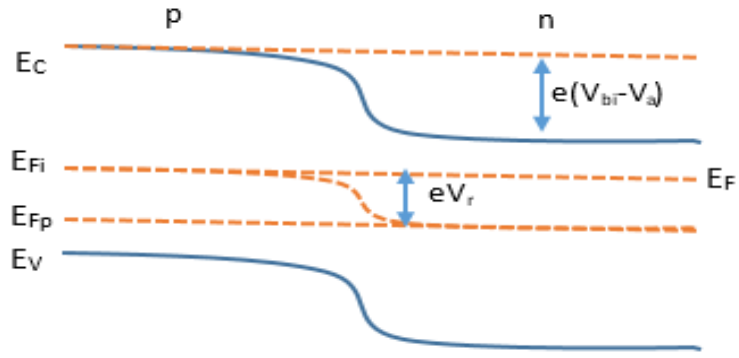
$$W = \left\{ \frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_R)}{e} \left[\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right] \right\}^{1/2} \quad (2.13)$$



Şekil 2.18. Ters beslem voltajı uygulanmış bir p - n eklemi

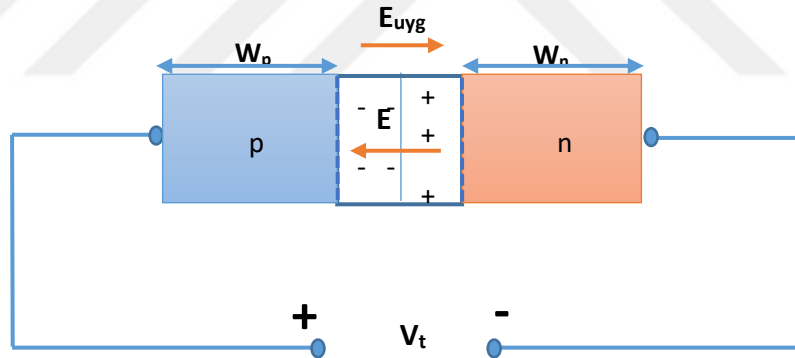
Bir ters beslem voltajı uygulandığında, toplam uzay yükü genişliğinin arttığı görülmektedir [66].

Eğer n bölgesine göre p bölgesine bir pozitif voltaj uygulanırsa, potansiyel engeli azalır. Şekil 2.19, bir V_a voltajının uygulandığı p - n eklemine göstermektedir. p bölgesindeki Fermi seviyesi, n bölgesindekinden daha küçüktür ve toplam potansiyel engeli azalmıştır. Daha küçük bir potansiyel engeli tükenim bölgesindeki elektrik alanında azalması demektir. Daha küçük bir elektrik alan ise n ve p bölgelerindeki elektron ve hollerin karşı bölgeye geçişlerinin artık daha kolay olması demektir. İşte bu yüklerin akışı eklem boyunca akım oluşturacaktır.



Şekil 2.19. Doğru beslenmiş p-n eklemine enerji bant diyagramı

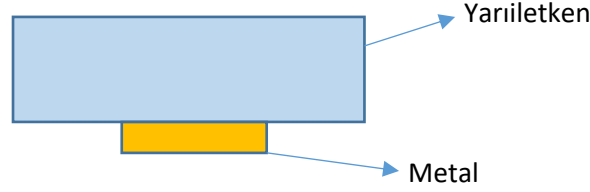
Şekil 2.20’de ise doğru beslem voltajı uygulanmış p-n eklemine uzay yükü elektrik alanı ve V_a tarafından oluşturulan elektrik alanın yönü gösterilmektedir. Uygulanan voltajın tümü eklem bölgesi üzerindedir. Uygulanan voltajın oluşturduğu E_{uy} elektrik alanı termal denge uzay yükü alanına zıt yöndedir. V_a beslemi uygulandığı süreç taşıyıcıların geçişi uzay yükü üzerinden devam eder. Bu beslem şartı doğru beslem olarak bilinir [66].



Şekil 2.20. Doğru beslem voltajı uygulanmış p-n eklemine uzay yükü elektrik alanı ve V_a tarafından oluşturulan elektrik alanın yönü

2.6. Metal-Yarıiletken Kontaklar

Yarıiletkenlerin elektriksel özelliklerinin incelenebilmesi için uygun bir metal ile kontak haline getirilmeleri gerekmektedir. Kontak, iki maddenin en az dirençle, hatta idealde sıfır dirençle, temas ettirilmesi demektir. İdeal kontakın oluşturulabilmesi için, kontakın yapılacağı yüzeyin temiz ve pürüzsüz olması gerekmektedir. Şekil 2.21’de metal-yarıiletken (MY) kontakın şematik bir yapısı verilmiştir.



Şekil 2.21. Metal-yarıiletken kontağın şematik bir yapısı

İki madde kontak durumuna getirildiklerinde aralarında yük alışverişi olur. Yük alışverişi bitip, denge sağlandığında Fermi enerji seviyeleri eşitlenmiş olacaktır. Metal ile yarıiletken kontak haline getirildiğinde, metallerin iş fonksiyonuna göre, doğrultucu (Schottky) kontak ve omik kontak olarak sınıflandırılır.

2.7. Doğrultucu ve Omik Kontaklar

Elektronlar ve holler bir doğrultuda kolayca hareket ederken, oluşan potansiyel engelden dolayı diğer yönde hareketleri zorlaşır. Bu tür kontaklar doğrultucu kontak olarak adlandırılırlar. Doğrultucu kontaklarda akım, doğru beslemde çok iyi iletilirken, ters beslemde hemen hemen hiç iletilmemektedir. Omik kontaklarda ise elektronlar ve holler bir maddeden diğerine kolayca geçebilmektedir. Kontakın omik ya da doğrultucu oluşu kullanılan metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonuna bağlıdır. İş fonksiyonu, bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli enerji miktarıdır. İş fonksiyonu (ϕ) yarıiletkenler için farklı değerler alır. Yarıiletkenler için Fermi enerji seviyesi katkılanan donör ya da akseptör atomların miktarına bağlıdır.

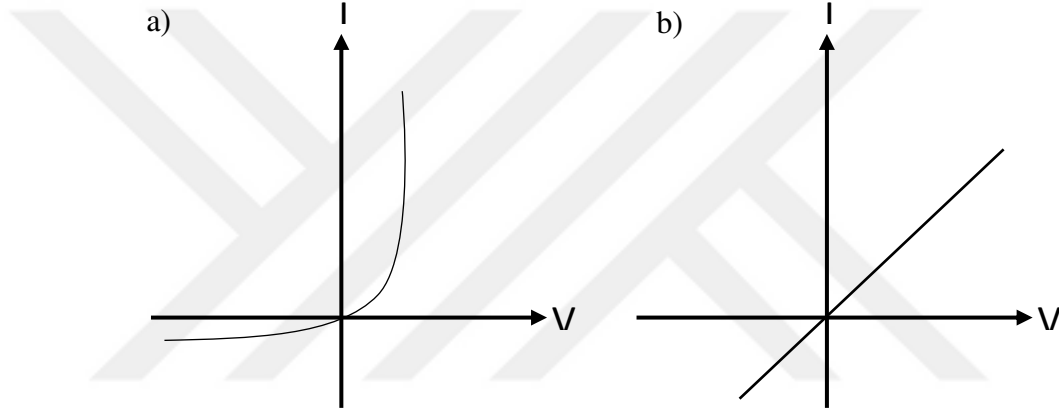
Metal/*n*-tipi yarıiletken kontağında metalin iş fonksiyonu (ϕ_m), yarıiletkenin iş fonksiyonundan (ϕ_s) büyük ise ($\phi_m > \phi_s$), metal ile yarıiletkenin arasında bir potansiyel engeli oluşur. Benzer şekilde, metal/*p*-tipi yarıiletken kontağında $\phi_m < \phi_s$ olduğunda yine metal ile yarıiletken arasında bir potansiyel engeli oluşur. İşte bu engel akımı oluşturan taşıyıcıların bir yönden diğerine geçişlerini kolaylaştırırken, diğer yönde engeller. Böylece yük taşıyıcılarının tek yönlü akışı sağlanmış olur.

Metal/*n*-tipi yarıiletken kontağında $\phi_m < \phi_s$ olması halinde omik kontak oluşur. Benzer şekilde, metal/*p*-tipi yarıiletken kontağında $\phi_m > \phi_s$ olduğunda yine omik kontak oluşacaktır. Bir omik kontak, metal ile yarıiletken arasında her iki yönde iletimi sağlayan düşük dirençli bir eklemdir. Omik kontaklarda akım gerilime bağlı olarak doğrusal olarak artar. Tablo 2.1’de MY kontaklarda malzemelerin iş fonksiyonlarına göre

kontak yapısı verilmiştir. Şekil 2.22.a’da doğrultucu kontağın, 2.22.b’de omik kontağın şematik akım-voltaj (I - V) karakteristiği verilmiştir [67].

Tablo 2.1. Metal-yarıiletken kontaklarda malzemelerin iş fonksiyonlarına göre kontak yapısı

	Yarıiletken	Eklem
$\phi_m > \phi_s$	n -tipi	Doğrultucu
$\phi_m < \phi_s$	p -tipi	Doğrultucu
$\phi_m > \phi_s$	p -tipi	Omik
$\phi_m < \phi_s$	n -tipi	Omik

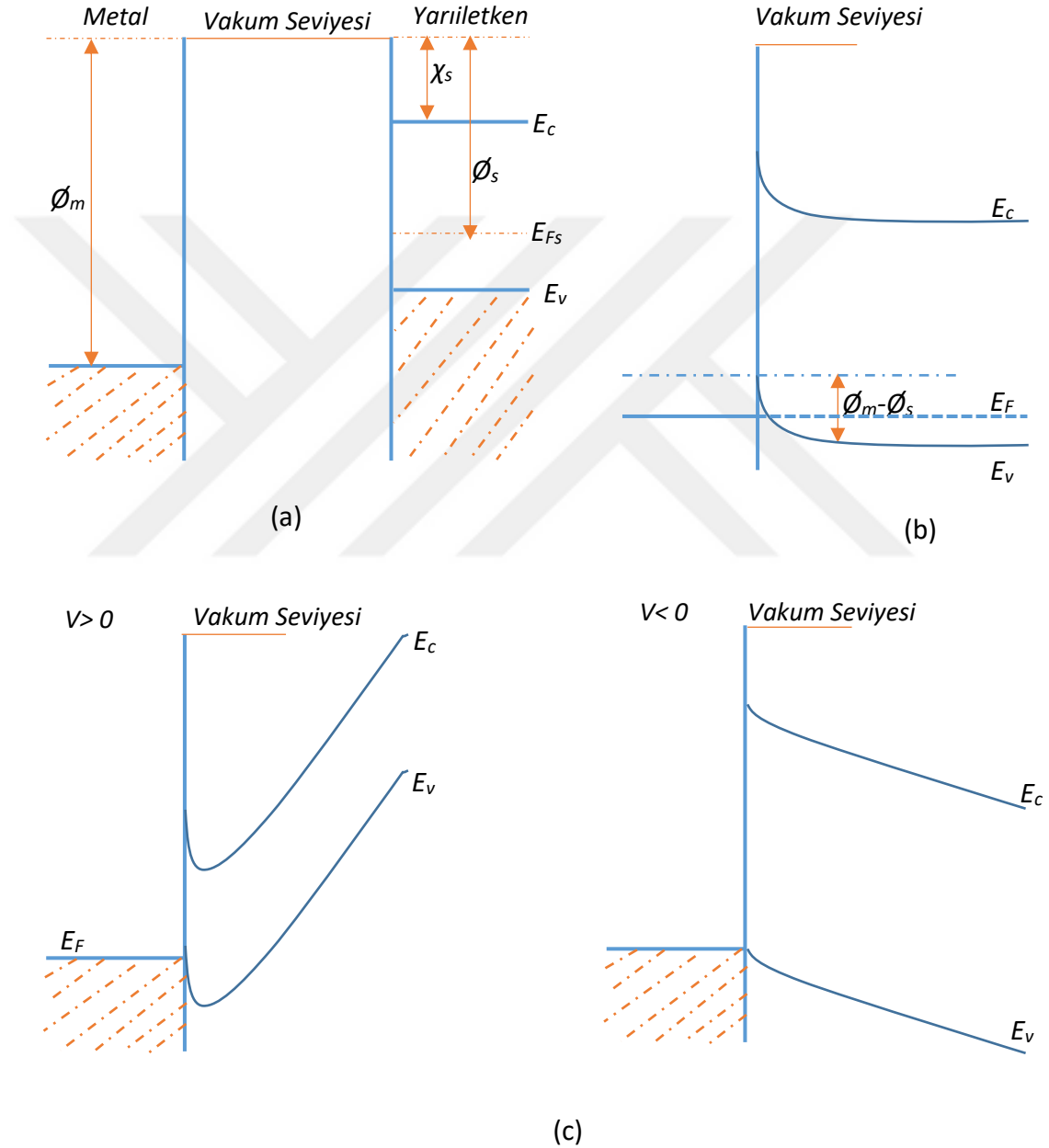


Şekil 2.22.a) Doğrultucu kontağın ve **b)** omik kontağın akım-gerilim karakteristiği

2.7.1. p -tipi yarıiletken/metal omik kontak

Metalin iş fonksiyonu ϕ_m ve yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s olmak üzere, $\phi_m > \phi_s$ olacak şekilde metal ile yarıiletken bir araya getirildiğini düşünelim. Şekil 2.23.a’da görüldüğü gibi yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\phi_m - \phi_s$ kadar yukarıda yer almaktadır. Bu şekilde iş fonksiyonuna sahip olan metal ve yarıiletken bir araya getirildiğinde aralarında Fermi enerji seviyeleri eşitlenene kadar yük alışverişi olacaktır. Yarıiletkende bulunan elektronlar, geride pozitif bir yüzey yükü bırakarak metal tarafına doğru akarlar. Böylece metal tarafında negatif yüzey yükü oluşur. Yük alışverişi sonrası Fermi enerji seviyesi Şekil 2.23.b’de gösterildiği gibi $\phi_m - \phi_s$ kadar bükülecektir. Yarıiletkendeki elektronların metal tarafına geçmesiyle, yarıiletken tarafında hol konsantrasyonu artmış böylece yarıiletkenin yüzeyi daha fazla p -tipi olmuştur. Metalden yarıiletken içinde bulunan boş durumlara elektronlar rahatlıkla

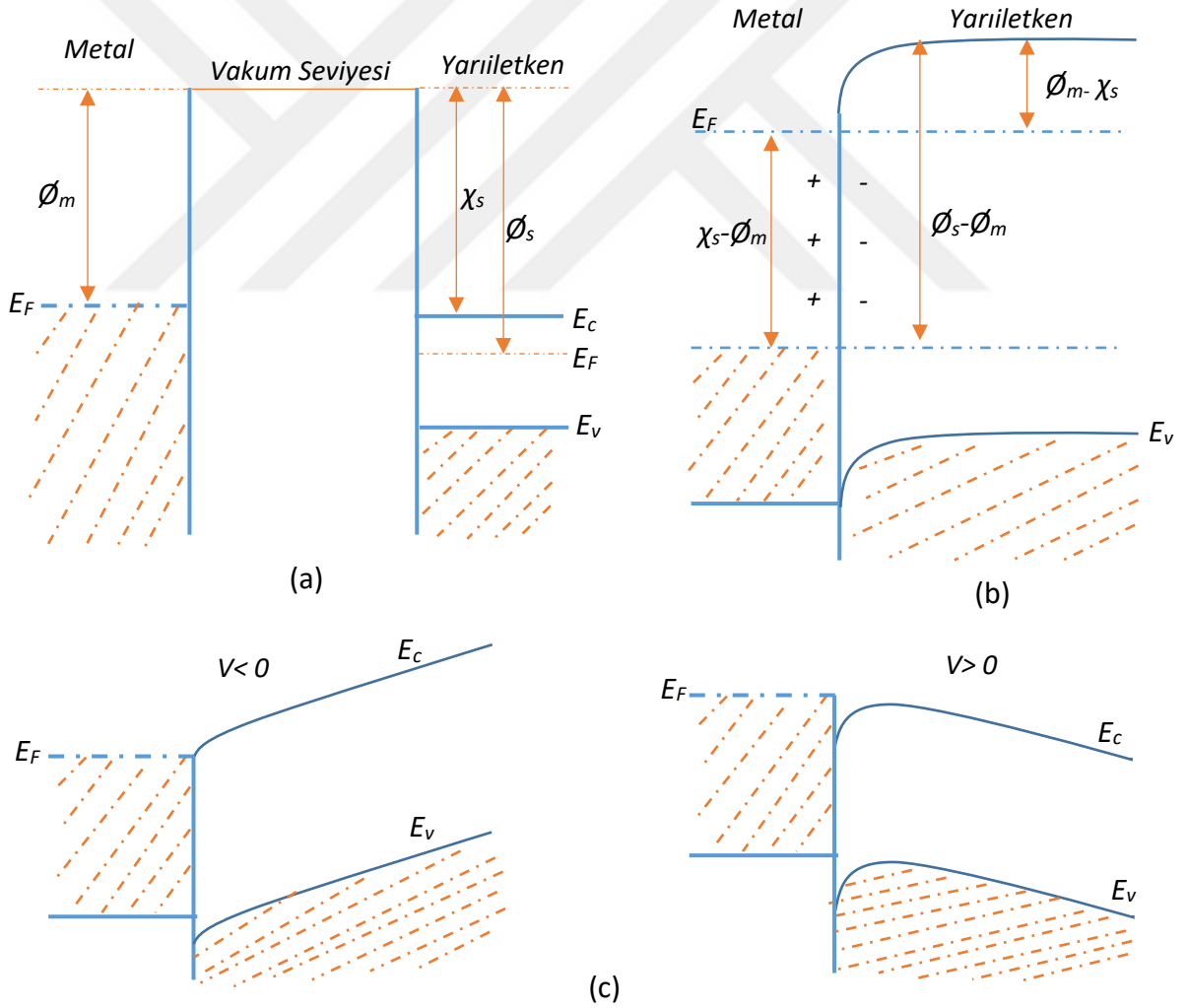
geçebilirler. Söz konusu olan bu yük geçişi, hollerin de yarıiletkenden metale geçmesine denk gelmektedir. Holler, metal tarafına geçtikten sonra hemen nötr duruma gelirler [68]. Ters gerilim uygulandığında, metal tarafında meydana gelen boşluklar da rahatlıkla yarıiletken tarafına geçebilirler. Böylece her iki doğrultuda da akımı kolayca geçirebilen omik kontak elde edilmiş olur [69].



Şekil 2.23.a) Metal ve p-tipi yarıiletken kontak oluşmadan **b)** metal ve p-tipi yarıiletken kontak haline getirildikten sonra **c)** $V \neq 0$ durumundaki enerji bant diyagramları

2.7.2. n-tipi yarıiletken/metal omik kontak

Bu tip kontakta ise metalin iş fonksiyonu olan ϕ_m , yarıiletkenin iş fonksiyonu olan ϕ_s daha büyük değer almaktadır. Kontakta önce yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\phi_s - \phi_m$ kadar aşağıdadır. Bu durum Şekil 2.24.a'da verilmiştir. Metal ile yarıiletken kontak oluşturmak üzere bir araya getirildiğinde elektronlar metalden yarıiletkene doğru akarlar. Fermi enerji seviyesi eşitlenene kadar bu geçiş devam edecektir. Fermi enerji seviyeleri eşitlendiğinde ise bantlarda bükülme olmuştur. Metalden yarıiletkene doğru akan elektronlar metal üzerinde pozitif yüklerin birikmesine sebep olurken, yarıiletken tarafında negatif uzay yükleri birikir. Dengedeki n-tipi yarıiletken/metal omik kontakta yarıiletkenden metale, metalden yarıiletkene kolayca yük akışı gerçekleşir [66].



Şekil 2.24.a) Metal ve n-tipi yarıiletken kontak olmadan b) metal ve n-tipi yarıiletken kontak haline getirildikten sonra c) $V \neq 0$ durumundaki enerji bant diyagramları

Kontaktın sonra oluşın enerji bant diyagramı ise Şekil 2.24.b’de verilmiştir. Şekil 2.24.c’de $V \neq 0$ durumlar için enerji bant diyagramlarının aldığı durum gösterilmiştir. Metale pozitif bir gerilim uygulanırsa, yarıiletkenin metale geçen elektronlar için bir engel olmayacaktır. Bu durumda yük taşıyıcıları rahatlıkla hareket edebilirler. Eğer yarıiletkenin bulunduğu tarafa pozitif bir gerilim uygulanırsa, yarıiletkenin çok katkılı olması nedeniyle, elektronlar için engel yüksekliğı yok denecek kadar az olur ve yine elektronlar yarıiletken tarafına yine rahatlıkla hareket edebilirler. Yük taşıyıcılarının iki tarafa da rahatlıkla hareket edebildiğı bu tip kontakın omik olduğı söylenir [70].

2.8. Yarıiletkenlerin Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi

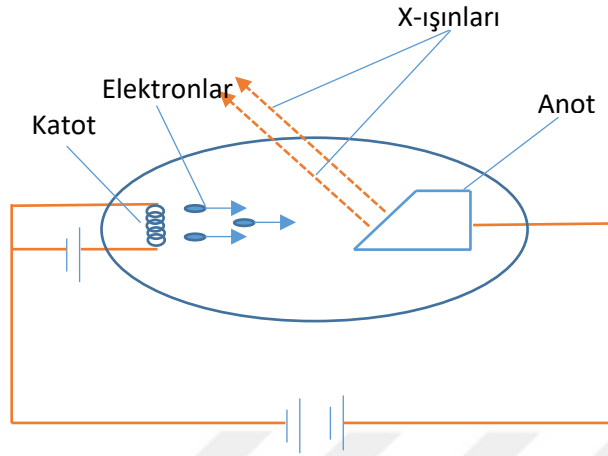
Yarıiletkenlerin yapısal özelliklerinin belirlenmesinde X-ışını ya da diğeri adıyla Röntgen ışınları kullanılır. X-ışınları, Alman fizikçi Wilhelm Conrad Röntgen tarafından 1895 yılında keşfedilmiştir. O zamanlar tam olarak doğası keşfedilemediğinden bilinmeyen anlamında X-ışını adı verilmiştir. Röntgen, cismin bir tarafına X-ışını kaynağı diğeri tarafına ise fotoğraf filmi koymuş; cismin farklı çok yoğun olan kısımları, az yoğun olan bölgelere kıyasla daha az X-ışını geçmesine izin verdiğinden böylelikle bir gölge fotoğraf elde etmiştir. Ardından 1912 yılında Alman fizikçi Max von Laue tarafından, X-ışınlarının bir kristalden kırınımını keşfetmiştir. Bu keşif, X-ışınlarının dalga özelliğı taşıdığını da göstermiş oldu.

X-ışınlarının bir kısmı, atomların iç yörüngelerinde meydana gelen elektron geçişleriyle ya da yüksek enerjiye sahip elektronların yavaşlatılmasıyla oluşan elektromanyetik dalgalar olup, dalgaboyları ise 0,1-100 Å aralığında değişmektedir [71].

X-ışınları, yeterli kinetik enerjiye sahip elektronların metal hedefe çarparak durdurulması sonucu oluşur. Bir X-ışını tüpünde; elektron kaynağı, yüksek hızlandırma gerilimi, metal hedef bulunmaktadır. Anot doğru hızlandırılan elektronların enerjilerinin büyük bir kısmı hedefe çarpma sırasında ısıya dönüştüğünden, anodun erimesini engellemek için soğutma sistemi kullanılır. Ayrıca anot ve katot havası boşaltılmış cam tüp içinde bulunmaktadır. Katot olarak genellikle eşik enerjisi düşük olduğı için tungsten kullanılır. Anot ise genellikle bakır bir bloktan oluşmaktadır.

Şekil 2.25’te bir X-ışını tüpünün yapısına yer verilmiştir. Isıtılan katottan kopan elektronlar yüksek gerilimle anota doğru hızlandırılır, hızlanan elektrınlar anota çarpar ve X-ışını oluşmuştur. Oluşın X-ışınları karakteristik ve sürekli spektrum oluşturlar [72].

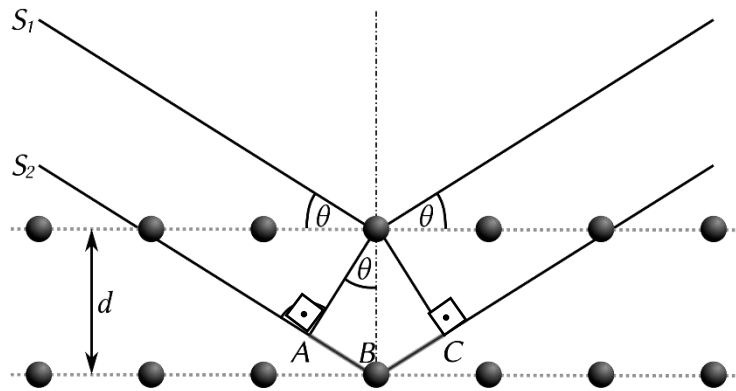
Yapısal özellikler belirlenirken karakteristik X-ışınları kullanılmaktadır. Bu yüzden oluşan X-ışınları süzölmektedir. Böylece tek dalga boylu X-ışınları elde edilmiş olur [73].



Şekil 2.25. X-ışını tüpü

Elde edilen tek dalga boylu X-ışınları, kristal yapı üzerine düşürüldüğünde kristali oluşturan atomların paralel düzlemleri tarafından saçılırlar. Bu durum sadece gelme açısı uygun değerler aldığıında gerçekleşir. Bu değerler, X-ışınının dalga boyuna ve kristalin örgü sabitine bağlıdır. Paralel düzlemlerden yansıtılan ışınlar üst üste geldiklerinde ise kırınım deseni oluştururlar [74].

Bir İngiliz fizikçi olan William Henry Bragg, kristal tarafından kırınıma uğratılan X-ışınları için basit bir açıklama yapmış ve bu açıklaması sayesinde 1915 yılında Nobel Fizik ödülünü almaya hak kazanmıştır.



Şekil 2.26. X-ışınlarının bir kristal tarafından kırınımı

Şekil 2.26’da aralarında d uzaklığı bulunan paralel örgü düzlemleri verilmiştir. X-ışını düzlem ayna gibi davranan paralel örgüler tarafından yansıtılırlar. Yansıyan ışınlar üst üste geldiklerinde aralarındaki yol farkı X-ışını dalgaboyunun tam katı olduğunda, yapıcı girişim meydana gelir.

Bu durumda Bragg yasası,

$$2d\sin\theta = n'\lambda \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (2.14)$$

olarak tanımlanır. Bu eşitlikte d kristal düzlemleri arası mesafe, n' yansımanın mertebesini, θ kırınım açısını ve λ kullanılan X-ışınının dalgaboyunu gösterir. Çoğu deneyde $n' > 1$ olan maksimumlar oldukça zayıftır ve bu nedenle sadece $n'=1$ durumu önemli olur. Deneyde değişen θ değerlerine karşı gözlenen piklerin şiddetlerinden, d değerleri hesaplanmaya çalışılır. 2.14 eşitliği;

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{2d} \quad (2.15)$$

şeklinde yeniden düzenlendiğinde $\lambda \leq 2d$ eşitsizliği bulunur. Bu eşitsizlikten de anlaşılacağı gibi, görünür ışık kristal yapı analizinde kullanılamaz. X-ışını dalga boyu ile, bir kristali oluşturan atomlar arasındaki mesafe aynı mertebededir [75, 76].

Kırınıma uğrayan X-ışınlarının şiddeti, 2θ açısına bağlı olarak çizdirilen XRD spektrumu verileri kullanılarak, ilgili yapının yapılanma katsayısı (TC), kristallenme boyutu (D) ve örgü sabiti (a, b, c) değerleri gibi yapısal parametreleri hesaplanabilir.

TC değerini belirlemek amacıyla 2.16’da verilen eşitlik kullanılmaktadır. Bu eşitlikte $I_{0(hkl)}$, hkl düzleminin standart şiddeti, $I_{(hkl)}$ ise aynı düzlemin gözlenen şiddetini ifade etmektedir. En büyük TC değeri hangi pike ait ise, tercihli yönelimin bu pik için geçerli olduğu söylenir [77].

$$TC = \frac{I_{(hkl)}/I_{0(hkl)}}{(1/N)[\sum N I_{(hkl)}/I_{0(hkl)}]} \quad (2.16)$$

Hekzagonal kristal yapının a ve c örgü parametreleri ile d düzlemler arası mesafe arasındaki ilişki eşitlik 2.17’de verilmiştir [78].

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + l^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.17)$$

Ortalama kristallenme boyutu ise aşağıda verilen Scherrer formülü kullanılarak hesaplanır.

$$D = \frac{0,94\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2.18)$$

Burada; D ortalama kristallenme boyutu, β ilgili kristalin yarıpik genişliği, θ Bragg açısı ve λ kullanılan X-ışınının dalga boyudur [79].

Kristal yapıdaki çizgisel kusurlar (dislokasyon), malzemenin morfolojik özelliklerine ve taneciklerin oluşum ve boyutuna bağlı olup, malzemenin mukavemetini, sertlik ve sünekliliğini doğrudan etkiler [80]. Bu kusurların miktarını belirlemek için, aşağıda verilen dislokasyon yoğunluğu (δ) ifadesi kullanılmaktadır [81].

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (2.19)$$

Kristal yapıdaki deformasyonu (strain)

$$\epsilon_z = \frac{d-d_0}{d_0} \quad (2.20)$$

ifadesi ile verilir [82]. Burada d filme ait, d_0 ($=2,60332\text{\AA}$, ZnO) bulk malzeme için standart düzlemler arası mesafedir. Hekzagonal örgü için, kristal yüzeyine paralel gerilimi (stress, N/m^2):

$$\sigma_c = \left(C_{13} - \frac{C_{33}(C_{11}+C_{12})}{2C_{13}} \right) \epsilon_z \quad (2.21)$$

şeklinde verilir [83]. Burada C_{11} , C_{33} , C_{12} ve C_{13} esneklik sabitleri olup sırasıyla $2,097 \times 10^{11} \text{N/m}^2$, $2,109 \times 10^{11} \text{N/m}^2$, $1,211 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ ve $1,051 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ değerlerindedir [84]. Denklem (2.20)'de esneklik sabitleri yerine yazılırsa σ_c gerilimi,

$$\sigma_c = -2,268 \times 10^{11} \epsilon_z \quad (2.22)$$

şeklinde yazılabilir.

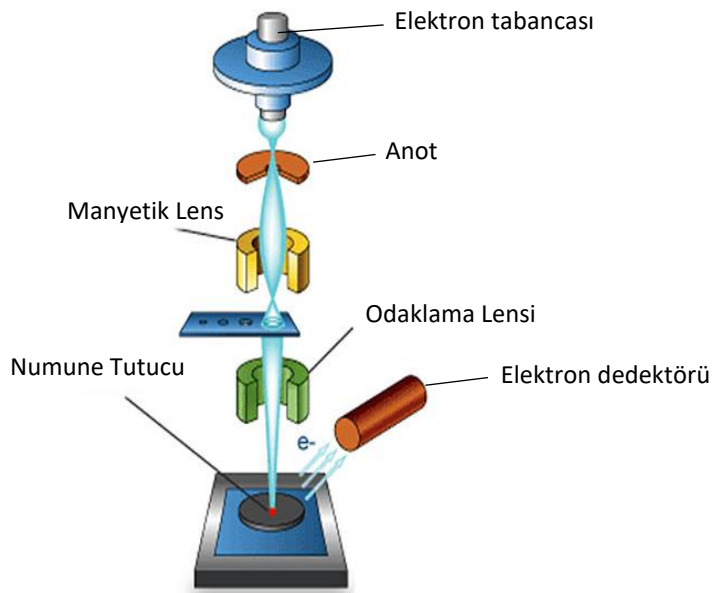
2.9. Yarıiletkenlerin Morfolojik Özelliklerinin Belirlenmesi

İnsanoğlu doğası gereği gözüyle göremediği şeyleri hep merak etmiştir. Bunun için önceleri optik mikroskoplar kullanılmış ancak zamanla optik mikroskoplarda yetersiz kalmaya başlamıştır. Günümüzde atomik yüzeylerin incelenmesinde atomdan daha küçük parçacıklar olan elektronlar kullanılmaya başlanmıştır. Elektronlar kullanılarak görüntü elde edilen bu mikroskoplar taramalı elektron mikroskobu olarak isimlendirilirler. Elektron mikroskobunun ilk örneği 1931 yılında Ruska ve Max Knoll tarafından üretilmiştir [85]. İlk ticari elektron mikroskobu 1965 yılında piyasaya sürülmüştür. Taramalı elektron mikroskobu (SEM); ayırım gücü ve büyütme oranı yüksek, kolay

numune hazırlanması, görüntü sinyallerini sayısal hale çevirerek görüntüdeki ölçüm ve kimyasal analizlerin bilgisayarla yapılabilmesi gibi özelliklere sahip olması nedeniyle gün geçtikçe daha yaygın kullanım alanı bulmaktadır [86].

Yüksek gerilim ile hızlandırılan elektronlar numune üzerine gönderilmesi ve bu elektronların numune atomları ile etkileşmesi sonucu oluşan sinyallerin toplanması ardından katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla görüntü elde edilir [87]. SEM cihazında görüntü oluşumu aşağıda verilen basamaklara göre gerçekleşir.

- i. Elektron Tabancası, demet elektronlarını oluşturur. Elektronların oluşturulması, flamanın kontrollü bir voltajla ısıtılması ile sağlanır. Burada kullanılan flaman çok yüksek sıcaklıklara çıktığından zamanla eskiyecektir. Tel kalınlığı artırılırsa, o zamanda ısıtmak için gerekli akım artacaktır. Bu yüzden teller için ideal kalınlık 0,125mm'dir. Ayrıca oluşturulan elektronların başka hiçbir parçacık ile etkileşmemesi için bütün işlemler vakum ortamında gerçekleştirilir.
- ii. Anot, oluşturulan elektronları hızlandırır. Oluşturulan elektronların tekrar flaman üstüne düşmelerini engellemek için flaman ile anot arasında gerilim uygulanır. Uygulanan gerilimle elektronlar numune üzerine yönlendirilmiş olur.
- iii. Manyetik Lens, hızlandırılan elektron demetini daraltıp yoğunlaştırır. Demet çapı ne kadar küçük olursa elde edilen görüntü o kadar net olur.
- iv. Saptırma Bobinleri, demetin numune yüzeyini taramasını sağlar. Bu bobinler soldan sağa aynı zamanda yukarıdan aşağıya kaydırılabilir.



Şekil 2.27. SEM cihazının ayrıntılı şematik yapısı [88]

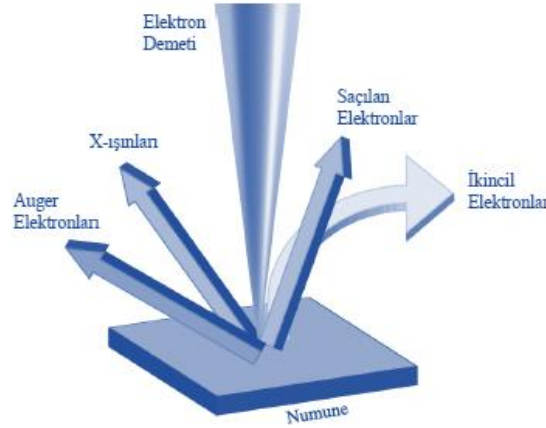
v. Algılayıcı Elektronik devreler, elde edilen sinyalleri değerlendirerek görüntüyü oluşturur. Şekil 2.27’de SEM cihazına ait ayrıntılı şematik yapı verilmiştir [86].

SEM cihazında büyütme tarama bobinleri kullanılarak sağlanabilir. Büyütme oranı arttıkça taranan alan küçülmektedir. Bununla ilgili birkaç örnek Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Büyütme oranı ve taranan alan arasındaki ilişki

Büyütme	Taranan Alan
10x	108mm ²
100x	1,08mm ²
1000x	10800µm ²
10000x	108µm ²

Yüksek gerilim ile hızlandırılan elektron demeti ve numune arasında etkileşimler olmaktadır. Bu etkileşimler şematik olarak Şekil 2.28’de verilmiştir.



Şekil 2.28. Elektron demeti ile numune etkileşimi

Yüksek enerjili elektronlar numune atomlarının dış yörüngesinde bulunan elektronlarla elastik olmayan girişime uğrarlar. Elastik olmayan bu girişimden sonra; bize numune yüzeyi ile ilgili bilgiler veren, düşük enerjiye sahip Auger elektronları meydana gelir. Yine bu etkileşim sonucunda enerjisi azalan demet elektronları yüzeyde toplanırlar ve ikincil elektron olarak adlandırılırlar. Bu elektronlar numune yüzeyinin 10nm ya da daha az derinliğinden geldiği için topografik görüntünün elde edilmesinde kullanılır. Yine bu etkileşimler sonucunda X-ışınları meydana gelmektedir. Bu ışınlar ise numunenin

kimyasal bileşimi ile ilgili bilgilere sahip olmamızı sağlarlar. Numuneye gönderilen elektronlar elastik girişimde de bulunabilirler. Bu girişim sonucunda ortaya çıkan elektronlar geri saçılan elektronlar olarak isimlendirilirler. Geri saçılan bu elektronların miktarı ise numunenin atom numarasıyla ilişkilidir. Geri saçılan elektronlar numunenin daha derinleri hakkında bilgi vermektedir. Derinden geldiği için ayırım gücü düşüktür [89].

2.10. Yarıiletkenlerin Optik Özelliklerinin Belirlenmesi

Yarıiletken bir malzeme üzerine foton gönderilirse, yarıiletkeni oluşturan atomların elektronları ile gönderilen fotonlar etkileşirler. Bu etkileşme sonucu bazı optik olaylar meydana gelmektedir. Foton karşılaştığı yarıiletkeni geçebilir, eğer madde üzerine dik gelmiyorsa kırılabilir, yansiyabilir, saçılabilir veya absorplanabilir [90].

Malzeme üzerine gönderilen fotonun enerjisi elektronu iletim bandına çıkaramayacak kadar azsa, malzeme fotonu absorplayamaz ve foton için saydam davranır. Bu olaya geçirgenlik (transmittance, T') denir. Malzemenin absorpsiyon katsayısı,

$$\alpha = 2,303 \frac{\log(1/T')}{t} \quad (2.23)$$

eşitliği ile verilir. Burada t , malzemenin (filmin) kalınlığıdır. Bir fotonun absorplanması veya geçirilmesi fotonun enerjisine, yarıiletkenin optik bant aralığının büyüklüğüne ve atomların dizilişine bağlıdır.

Geçirgenlik numuneyi geçen ışının şiddetinin (I'), malzemeye gelen ışının şiddetine (I_0') oranı olarak tanımlanır ve

$$T' = \frac{I'}{I_0'} \quad (2.24)$$

eşitliği ile verilir. Geçirgenlik ile absorbans arasındaki ilişki ise,

$$A = -\log T' \quad (2.25)$$

eşitliği ile verilir. Malzemenin absorpsiyon spektrumundan

$$T' = 10^{-A} \quad (2.26)$$

eşitliği ile geçirgenlik bulunur [91].

Malzeme ile fotonun bir diğerk etkileşmesi ise yansımadır (reflektans, R_y). Yansıma malzeme üzerinden yansıyan ışının şiddetinin, malzeme yüzeyine gönderilen ışığın şiddetine oranı olarak tanımlanır. Malzeme yüzeyi düz ve gelen fotonların enerjisi optik bant aralığından küçük ise, fotonların bir kısmı yüzeyden yansır [92].

Malzemeyi geçen ışının şiddeti

$$I' = (1 - R_y)^2 I_0' e^{-\alpha t} \quad (2.27)$$

bağıntısı ile verilir. Geçirgenlik, absorbands ve yansıma arasındaki bağıntı

$$T' = (1 - R_y)^2 e^{-A} \quad (2.28)$$

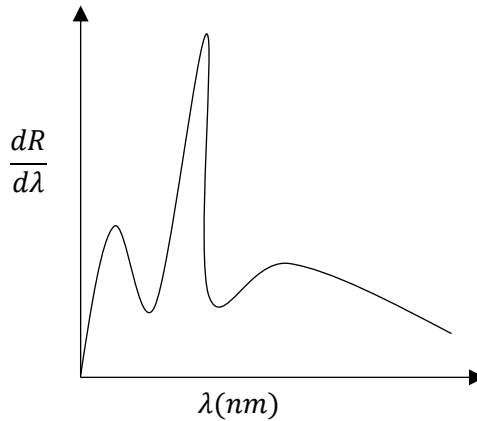
eşitliği ile verilir.

Saydam olmayan filmlerin optik bant aralığını belirlemek için en iyi metotlardan biri difüz yansıma (R) spektrumlarının belirlenmesidir. Difüz yansımalar belirlendikten sonra “diferansiyel yansıma” ya da “Kubelka-Munk Teorisi” yöntemleri kullanılarak E_g değerleri hesaplanabilir.

Diferansiyel yansıma yönteminde, öncelikle elde edilen filmin dalgaboyuna bağlı yansıma spektrumu alınır. Bu spektrumun dalgaboyuna göre birinci türevi alınır. Ardından $dR/d\lambda - \lambda$ grafiğı çizilir (Şekil 2.29). Elde edilen bu grafikten $dR/d\lambda$ 'nın maksimum noktasındaki değere karşı gelen dalgaboyu değeri belirlenir. Belirlenen dalga boyu ile de

$$E_g = \frac{hc^*}{\lambda} \quad (2.29)$$

eşitliği kullanılarak optik bant aralığı olan E_g hesaplanır. Bu eşitlikte, h ve c^* sırasıyla, Planck sabiti ve ışık hızıdır.



Şekil 2.29. $dR/d\lambda$ 'nın dalgaboyuna bağlı grafiğı

E_g değerini belirlemek için kullanılan bir başka yöntem ise Kubelka-Munk teorisidir. Bu yöntemde yansıma değerleri Kubelka-Munk fonksiyonları kullanılarak absorpsiyon değerlerine dönüştürülür. Kubelka-Munk fonksiyonu [93, 94],

$$F(R) = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (2.30)$$

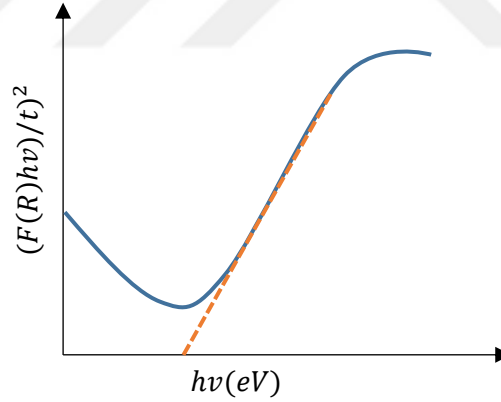
ile tanımlanır. Optik bant aralığının belirlenebilmesi için aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$\left(\frac{F(R)hv}{t}\right)^2 = B(hv - E_g) \quad (2.31)$$

Bu eşitlikte verilen B , enerjiden bağımsız bir sabittir. Buradaki $F(R)$ fonksiyonu aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$F(R) = \frac{\left(1 - \frac{R}{100}\right)^2}{2\frac{R}{100}} \quad (2.32)$$

E_g 'yi belirlemek için $((F(R)hv)/t)^2 - hv$ grafiği çizilir. Bu eğriler ekstrapole edilerek, doğrusal kısımların x eksenini kestiği noktadan E_g değerleri hesaplanır. Şekil 2.30'da örnek bir grafik verilmiştir.



Şekil 2.30. $(F(R)hv)/t)^2 - hv$ grafiği

2.11. Yarıiletken Diyotların Elektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Bir diyotun elektriksel özelliklerini açıklayabilmek, ideale yakınlığını belirleyebilmek için belirlenmesi gereken bazı önemli parametreler vardır. Bu parametreleri hesaplayabilmek için akım ve voltaj arasında bir bağıntı bulunmalıdır. Termiyonik emisyon teorisi (TE) dikkate alınarak akım ve voltaj arasındaki bağıntı elde edilmiştir. Termiyonik emisyon teorisi, sıcak bir yüzeyden termal enerji nedeniyle taşıyıcıların serbest kalması olayıdır. Schottky kontaklarda, elektronların potansiyel engeli üzerinden

taşıması işlemi termiyonik alan emisyonu teorisiyle açıklanır. Taşıyıcılar kazandıkları termal enerji ile birlikte potansiyel engelini atlayarak, metalden yarıiletken ya da yarıiletkenden metale rahatlıkla geçebilirler [95]. Termal denge durumunun etkilenmemesi ve Maxwell-Boltzman yaklaşımının uygulanabilmesi için, TE teorisi oluşturulurken, engel yüksekliği $k_B T$ 'den çok büyük kabul edilir. Ayrıca kıtlık bölgesinde oluşan elektron çarpışmaları da ihmal edilir [69]. TE teorisi dikkate alındığında bir diyottan geçen akımın denklemi,

$$I = A' A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{k_B T}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{nk_B T}\right) - 1\right] \quad (2.33)$$

olarak yazılır. Burada V uygulanan voltaj, e elektronun yükü, n idealite faktörü, k_B Boltzman sabiti ve T sıcaklık, A' doğrultucu kontak alanı, A^* etkin Richardson sabiti ve ϕ_b engel yüksekliğidir.

2.11.1. p - n eklem diyotlarının akım-voltaj karakteristiği

İdeal bir diyot için TE teorisinin etkin olduğu kabul edilmektedir. Denklem (2.33) ile verilen akım denklemi kullanılarak p - n eklemi için önemli parametreler olan idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (ϕ_b) hesaplanabilir. İdealite faktörü diyotun kalitesini belirleyen önemli bir parametre olup, ideal bir diyot için $n = 1$ olmalıdır. n , 1'den büyük değerler almaya başladığında, diyotun ideallikten uzaklaştığı anlamını taşır. n değerini hesaplamak için,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nk_B T}\right) - 1\right] \quad (2.34)$$

denklemi kullanılmaktadır. Bu eşitlik akım ve gerilim arasındaki bir bağıntı kurar. Verilen bu ifade de $qV \gg nk_B T$ olduğu durumda; eşitlikteki 1, üstel terimin yanında ihmal edilir. Bu ihmaliet sonrasında Denklem (2.34) ifadesi,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nk_B T}\right)\right] \quad (2.35)$$

şeklini alır. Denklem (2.35) ile verilen eşitliğin her iki tarafı için önce logaritma alınıp, ardından V 'ye göre türevi alınır,

$$n = \frac{q}{k_B T} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (2.36)$$

ifadesi elde edilir. Bu eşitlik kullanılarak diyotun idealite faktörü hesaplanabilir. Bu hesaplama yapılırken $\ln I - V$ grafiği çizilir. Ardından çizilen grafiğin ileri beslem

kısımının doğrusal kısmından eğim hesaplanır. Hesaplanan bu eğim kullanılarak elde edilen diyotun n değeri bulunur. Yine aynı grafik kullanılarak çizilen doğrunun $V = 0$ 'da düşey eksenini kestiği nokta bulunur. Bu değer I_0 yani doyma akım değerini verir.

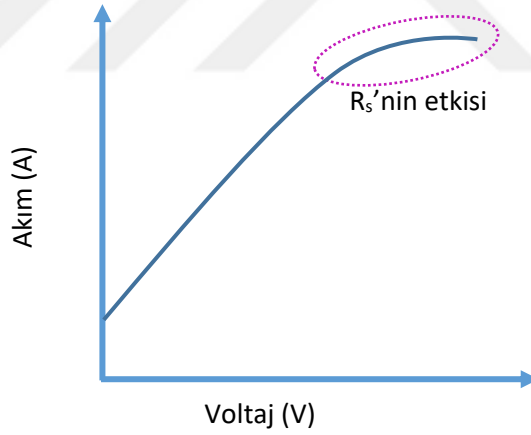
$$I_0 = A' A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{k_B T}\right) \quad (2.37)$$

Denlem (2.37) ile verilen eşitliğin her iki tarafında logaritması alındığında,

$$q\phi_b = k_B T \ln\left(\frac{A' A^* T^2}{I_0}\right) \quad (2.38)$$

elde edilir ve bu eşitlik kullanılarak ϕ_b değeri hesaplanır [96].

Diyot karakteristiğinin belirlenmesinde Cheung fonksiyonları da kullanılmaktadır. Bu fonksiyonlar kullanılarak seri direnç (R_s) ve engel yüksekliği ϕ_b değerleri hesaplanabilir. R_s , kitle bölgesi dışında kalan bölgenin diyot akımına karşı gösterdiği dirençtir. Bu etki yüksek voltaj değerlerinde etkin olmaktadır [97]. Voltaj değeri arttığında akımda bir azalma görülmektedir. Şekil 2.31, R_s etkisi ile akım değerlerindeki azalmayı göstermektedir.



Şekil 2.31. R_s etkisi ile akımdaki değişim

Denklem (2.33)'te verilen ve TE teorisi ile elde edilen akım voltaj arasındaki bağıntıya, gerilimdeki azalma eklenerek yeni bir bağıntı elde edilir.

$$I = A' A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{k_B T}\right) \exp\left(-\frac{q(V-IR_s)}{nk_B T}\right) \quad (2.39)$$

Denklem (2.39) kullanılarak potansiyel fark için,

$$V = \left(\frac{nk_B T}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{A' A^* T^2}\right) + n\phi_b + IR_s \quad (2.40)$$

elde edilir. Bu eşitliğin $\ln I$ 'ya göre türevi alındığında,

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nk_B T}{q} + IR_s \quad (2.41)$$

Elde edilir. Bu eşitlik kullanılarak $dV/d(\ln I)$ 'nın I 'ya göre grafiği çizilir. Çizilen grafiğin eğimi R_s değerini verecektir. Eğim hesaplanırken çizilen doğrunun y eksenini kestiği noktadan n değeri hesaplanabilir [98].

Norde metodu, diyot parametrelerini belirleyebilmek için kullanılan başka bir metottur. Bu metot yardımıyla, aşağıdaki denklem kullanılarak, R_s , Φ_b ve n değerleri hesaplanabilir.

$$F(V) = \frac{V_0}{\gamma} - \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{A^* A T^2} \right) \quad (2.42)$$

Bu denklemde yer alan γ ve $I(V)$ sırasıyla n değerinden büyük olan ilk tamsayı ve I - V grafiğinden elde edilen akım değerleridir. $F(V)$ - V grafiğinin minimum değerinin bulunmasının ardından, engel yüksekliği hesaplanır [99]. engel yüksekliği,

$$\Phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{k_B T}{q} \quad (2.43)$$

ile verilir. Burada $F(V_0)$ ve V_0 değerleri sırasıyla, $F(V)$ değerinin en küçük noktası ve bu en küçük noktaya karşılık gelen voltaj değeridir. Seri direnç;

$$R_s = \frac{k_B T(\gamma - n)}{q I_0} \quad (2.44)$$

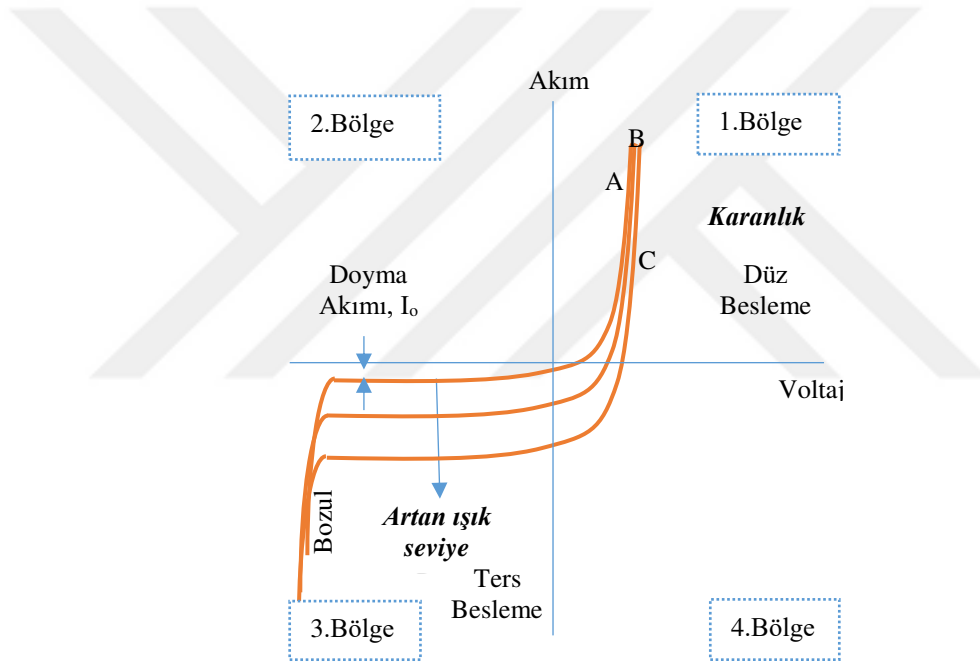
formülü ile bulunur. Denklemde yer alan I_0 ise, $F(V)$ değerinin en küçük noktasındaki akım değerine karşılık gelmektedir.

2.11.2. p - n eklem diyotlarının aydınlatma altında akım-voltaj karakteristiği

Işık etkisiyle ilettime geçen yarıiletken devre elemanlarına fotodiyot denir. Eklem bölgesine ışık geldiği zaman, gelen ışığın enerjisi eğer E_g değerinden büyük değerler alırsa fotonlar soğurulur. Fotonun soğurulmasıyla fazla elektron ve holler oluşur. Oluşan holler ve elektronlar diyotun farklı taraflarında toplanırlar. Bu durumda diyota gerilim uygulanırsa soğurulan fotonların etkisiyle oluşan taşıyıcılarla orantılı olarak bir akım oluşur. Bu şekilde oluşan akıma ise fotoakım denir [100].

Fotodiyotun I - V karakteristiği şekil itibariyle normal bir diyotunkine benzemektedir. Fotodiyot üzerine düşen ışık yoksa üzerinde oluşan akım termal yoldan

oluşan akımdır ve karanlık akım adını almaktadır [101]. Şekil 2.32'deki A eğrisi fotodiyotun karanlık durumdaki, B ve C eğrileri ise fotodiyotun ışık altındaki I - V karakteristiğini göstermektedir. Şekiden görüldüğü gibi bir fotodiyotun I - V karakteristiği dört bölgeden oluşmaktadır. 1. bölgede akım ve voltaj değerleri pozitifdir. Bu bölge, fotodiyot uygulamaları için uygun değildir, çünkü bu bölgede normal diyot gibi davranır. 2. bölgede fotodiyotun ışığa karşı cevabı yoktur. 3. bölgede ise eklem bölgesine gelen ışık şiddeti arttıkça, bu bölgede oluşan eğriler, negatif akım yönünde kaymaya başlarlar. 4. Bölge, diyotun fotovoltaik bölgesidir [102].



Şekil 2.32. Fotodiyotun karanlık ve aydınlatılmış durumlardaki akım-voltaj karakteristikleri

Sonuç olarak, eklem bölgesine ışık düşürüldüğünde, ışık şiddetine bağlı olarak akım miktarında değişim olur. Dolayısıyla I - V karakteristiği incelenen bir diyotun aydınlatma altında I - V karakteristiği incelendiğinde, geri beslem akımında artış gözlenir [103].

Fotodiyotun duyarlılığı, ışığa duyarlılığın bir ölçüsü olup fotoakımın (I_{ph}), verilen dalga boylarında fotodiyotun yüzeyi üzerine düşen ışığın gücüne oranı olarak tanımlanır. Fotoduyarlılık, başka bir ifadeyle ışık gücünün elektrik akıma dönüştürülme etkisinin bir oranıdır. Fotoduyarlılık, fotodiyotun üzerine düşen ışığın dalga boyu, sıcaklık ve

fotodiyota uygulanan ters polarma voltajı ile değişmektedir. Fotodiyotların fotoakım mekanizması

$$I_{ph} = BP^m \quad (2.45)$$

ile analiz edilir. Bağlantıda I_{ph} fotoakım, P gelen ışığın şiddeti, B ve m ise birer sabittir. [104].



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Giriş

Bu bölümde ilk olarak, tez çalışmasına konu olan farklı oranlarda La, Eu ve Er katkısı ile elde edilen ZnO filmlerinin üretim aşamaları hakkında bilgi verilmiştir. Farklı katkılarla elde edilen filmlerin öncelikle yapısal, morfolojik ve optik özellikleri belirlenmiştir. Bu özellikleri belirlerken kullanılan cihazlara da bu bölümde yer verilmiştir. Ardından elde edilen filmler *n*-tipi yarıiletken olarak kullanılarak *Au/p-Si/n-ZnO/Al*, *Au/p-Si/n-ZnO:La/Al*, *Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al* ve *Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al* diyotlarının fabrikasyonu yapılmıştır. Fabrikasyon işlemleri ve bu işlem sonrasında elde edilen heteroeklem diyotların karakterizasyonlarında kullanılan elektriksel ölçüm cihazları da bu bölümde tanıtılmıştır.

3.1.1. Si alttaşı temizliği

Film üretiminde en önemli adımlardan biri kullanılacak alttaştan temizliğidir. Elde edilecek filmin homojen olması ve fiziksel özelliklerinin iyi olması için alttaşların temiz olması şarttır. Ayrıca omik kontak yapılacak yüzeyin temiz olması diyot performansını doğrudan etkilemektedir. Çünkü diyotun deneysel ölçüm sonuçları, büyük ölçüde yüzey temizliğine bağlıdır.

Yapılan deneylerde (100) yönelimli ve 0,1-10 Ωcm öz direnç değerine sahip *p*-Si alttaşlar kullanılmıştır. Üzerine film kaplanacak *p*-Si alttaşlar, uygun boyutlarda ($\sim 1\text{cm} \times 1\text{cm}$) bir elmas kesici yardımıyla kesilmiştir. Alttaşların temizlenmesinde sırasıyla aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

- i. *p*-Si alttaş, üzerindeki tozların temizlenmesi için bir beher içerisindeki deiyonize (DI) suya daldırılmış ve ultrasonik banyoda 10 dakika bekletilmiştir. Bu işlem sırasında Bandelin Sonorex marka ultrasonik titreştirici kullanılmıştır.
- ii. DI sudan çıkarılan alttaşlar, beher içindeki asetona daldırılmış ve ultrasonik banyoda 10 dakika daha bekletilmiştir.
- iii. Aseton içinden çıkarılan *p*-Si alttaşlar azot gazı ile kurutulmuştur.
- iv. Son olarak, Harrick marka plazma temizleyici cihazı kullanılarak argon gazı ortamında alttaşların temizliği tamamlanmıştır.

Temizlenen alttaşlar üzerine film üretimi mümkünse hemen yapılmıştır; değilse, temizlenen alttaşların yüzeylerinin oksitlenmemesi için deneyin yapılacağı zamana kadar alttaşlar plazma temizleyici cihaz içerisinde vakum ortamında muhafaza edilmiştir.

3.1.2. Çözelti hazırlama

Çözelti hazırlamada kullanılan kimyasallar ticari olarak temin edilmiş ve yüksek saflıkta seçilen kimyasallara herhangi bir ön işlem uygulanmamıştır. Çözelti hazırlarken çinko kaynağı olarak çinko asetat dihidrat ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; ZnAc; %99,999; Sigma-Aldrich) kullanılmıştır. 5 ml'lik balon joje içine 0,35M'lık çözelti için 0,3841g ZnAc tuzu konulmuş ve üzerine sabitleyici (stabilizer) olarak 105µl etanolamin ($\text{NH}_2(\text{CH}_2)_2\text{OH}$; EA; $\geq$ %99; Merck) eklenmiştir. Daha sonra 5ml'ye tamamlanacak şekilde 2-metoksietanol ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$; $\geq$ %99,9; Sigma-Aldrich) eklenmiştir. La katkı kaynağı olarak lantan(III) asetat hidrat ($\text{La}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$; LaAc; $\geq$ %99,99; Sigma-Aldrich), Eu katkı kaynağı olarak evropiyum (III) asetat hidrat ($\text{Eu}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$; EuAc; $\geq$ %99,9; Sigma-Aldrich) ve Er katkı kaynağı olarak erbiyum(III) asetat hidrat ($\text{Er}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$; ErAc; $\geq$ %99,9; Sigma-Aldrich) kullanılmıştır. Katkı miktarları kütlece hesaplanmıştır. Belirlenen oranlarda hazırlanan çözelti içine katkı tuzları eklenmiştir. Eklenen katkı miktarları Tablo 3.1'de verilmiştir. Hazırlanan her bir çözelti 60 °C'de 2 saat karıştırılıp 2-4µm'lik süzgeç kağıtları kullanılarak yavaş filtrelenmiştir. Hazırlanan çözeltiler şeffaf ve berrak olmuştur (Görsel 3.1). Çözeltiler hiç bekletilmeden hemen film üretimine geçilmiştir.



Görsel 3.1. Hazırlanan şeffaf ve berrak çözeltiler.

Tablo 3.1. Elde edilen filmlere ait film kodları ve çözeltilerin kütlece katkı miktarları

Film	Film Kodu	ZnAc/LaAc (m_{Zn}/m_{La}); ZnAc/EuAc (m_{Zn}/m_{Eu}); ZnAc/ErAc (m_{Zn}/m_{Er});	Kütlece Katkı Miktarı (mg)
Katkısız ZnO	Z-00	100,0 / 0,0	0
%0,2 La katkılı ZnO	ZLa-02	99,8 / 0,2	0,649338
%0,4 La katkılı ZnO	ZLa-04	99,6 / 0,4	1,298676
%0,6 La katkılı ZnO	ZLa-06	99,4 / 0,6	1,944401
%0,8 La katkılı ZnO	ZLa-08	99,2 / 0,8	2,592535
%1 La katkılı ZnO	ZLa-1	99,0 / 1,0	3,240669
%0,2 Eu katkılı ZnO	ZEu-02	99,8 / 0,2	0,61692
%0,4 Eu katkılı ZnO	ZEu-04	99,6 / 0,4	1,23384
%0,6 Eu katkılı ZnO	ZEu-06	99,4 / 0,6	1,85076
%0,8 Eu katkılı ZnO	ZEu-08	99,2 / 0,8	2,46768
%1 Eu katkılı ZnO	ZEu-1	99,0 / 1,0	3,08460
%0,2 Er katkılı ZnO	ZEr-02	99,8 / 0,2	0,58252
%0,4 Er katkılı ZnO	ZEr-04	99,6 / 0,4	1,16550
%0,6 Er katkılı ZnO	ZEr-06	99,4 / 0,6	1,74756
%0,8 Er katkılı ZnO	ZEr-08	99,2 / 0,8	2,33008
%1 Er katkılı ZnO	ZEr-1	99,0 / 1,0	2,91260

3.1.3. Katkısız ve katkılı filmlerin elde edilmesi

Çözelti hazırlandıktan sonra, temizlenmiş *p-Si* alttaşlar spin kaplama cihazındaki numune tutucusunun üzerine yerleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan programlanabilir Laurel marka spin kaplama cihazının bir fotoğrafı Görsel 3.2’de verilmiştir. Numune tutucuya yerleştirilen alttaşların üzerine, hazırlanan çözelti mikropipet yardımıyla 100µl damlatılmıştır. Çözelti damlatılan alttaşlar 3000rpm döndürme hızında 30s döndürülmüş ve ıslak film elde edilmiştir. Daha sonra 300°C’de 10dk kül fırında (MTI marka KSL-1100X model; Görsel 3.2.b) kurutulmuştur. Bu kaplama/kurutma süreci on kez tekrarlanmıştır. Son olarak, iyi bir kristallenme sağlamak amacıyla, filmler kurutma sıcaklığından daha büyük sıcaklıkta tavlansmıştır. Bunun için kurutma sonrası fırın içindeki filmler çıkarılmadan, sıcaklık 300°C’den 600°C’ye çıkıncaya kadar 20dk fırın içinde tutulmuş, böylece film yüzeyinde oluşabilecek olası çatlaklar engellenmeye çalışılmıştır. Son olarak sıcaklığı 600°C olan fırında filmler 60dk tavlansmış, fırın

soğumaya bırakılmış ve sıcaklığı oda sıcaklığına düştüğünde filmler fırından çıkarılmıştır. Deneyler sonunda elde edilen bütün filmlere ait fotoğraflar Görsel 3.3'te verilmiştir.

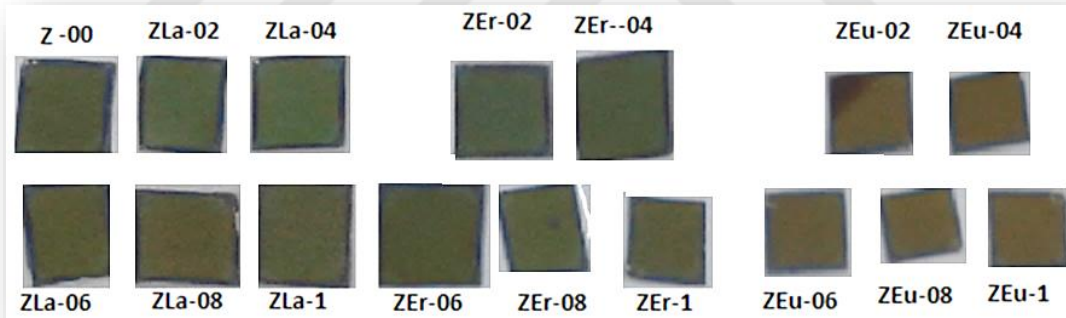


(a)



(b)

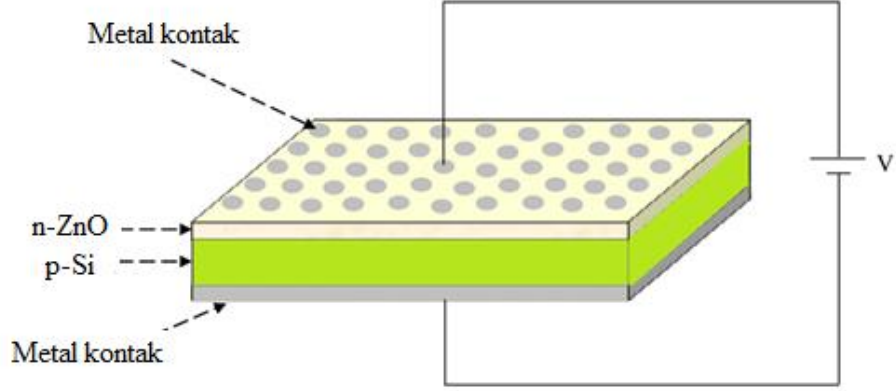
Görsel 3.2.a. Laurell WS-400B-6NPP/LITE spin kaplama cihazı **b.** MTI marka KSL-1100X model kül fırın



Görsel 3.3. Elde edilen filmlerin fotoğrafları

3.1.4. Diyotların fabrikasyonu

Heteroeklem diyotların fabrikasyonu için elde edilen bütün ZnO filmlerinin üst yüzeyine Al kontaklar, *p-Si* alttaşın mat yüzeyine ise Au metal kontaklar yapılarak, sırasıyla alt ve üst omik kontaklar oluşturulmuştur. Omik kontaklar yapılırken hangi metalin kullanılacağına iş fonksiyonlarına bakılarak karar verilmiştir. Elde edilen filmler için kullanılan yarıiletken ve metallere ait iş fonksiyonları sırasıyla; $\Phi_s(p\text{-Si})=4,97\text{eV}$, $\Phi_s(n\text{-ZnO})=4,25\text{eV}$, $\Phi_m(\text{Au})=5,10\text{eV}$ ve $\Phi_m(\text{Al})=4,06\text{eV}$ 'tur. Elde edilen *p-n* Heteroeklem diyotlarının şematik gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir.



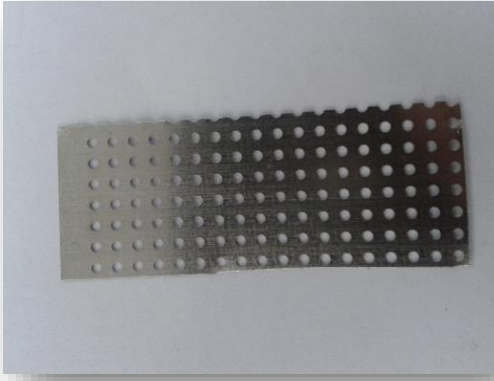
Şekil 3.1. Elde edilen *p-n* heteroeklem diyotlarının şematik gösterimi

Al kontaklar, termal buharlaştırma yöntemiyle yapılmıştır. Metal buharlaştırma işlemi için VAKSİS PVD Handy-MT/101T model metal buharlaştırma ve OLED sistemi (Görsel 3.4) kullanılmıştır.

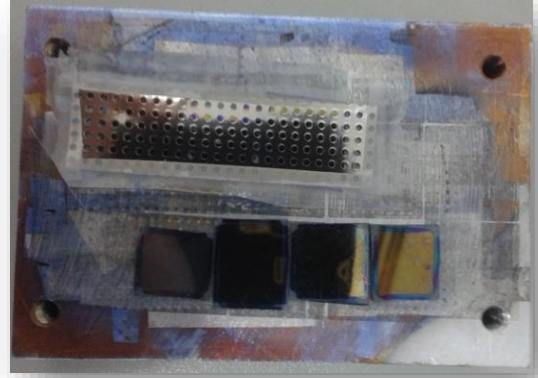


Görsel 3.4. VAKSİS PVD Handy-MT/101T model metal buharlaştırma ve OLED sistemi

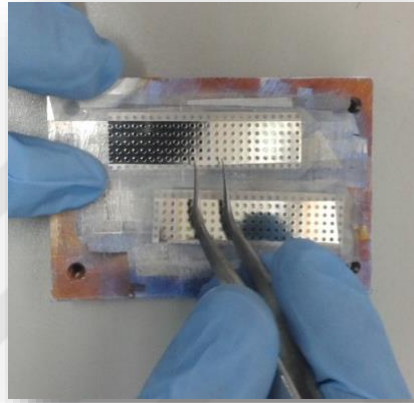
Al metalinin buharlaştırılması birkaç aşamadan oluşmaktadır. Üst omik kontaklar için shadow maskeler (daire yarıçapı 0,5mm) kullanılmıştır (Görsel 3.5.a). Bu maskelerde metal kaplanması istenen yerlerde boşluklar bulunmaktadır. Öncelikle elde edilen filmler numune tutucu üzerine yerleştirilir (Görsel 3.5.b). Daha sonra tüm filmlerin yüzeyi yanmaz bantlar kullanılarak, Görsel 3.5.c'deki gibi maskeler ile kapatılır.



(a)

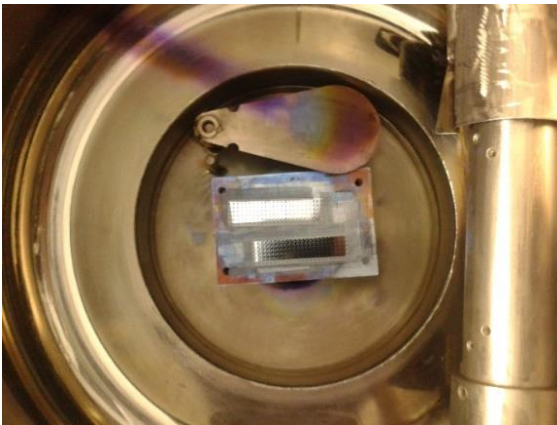


(b)

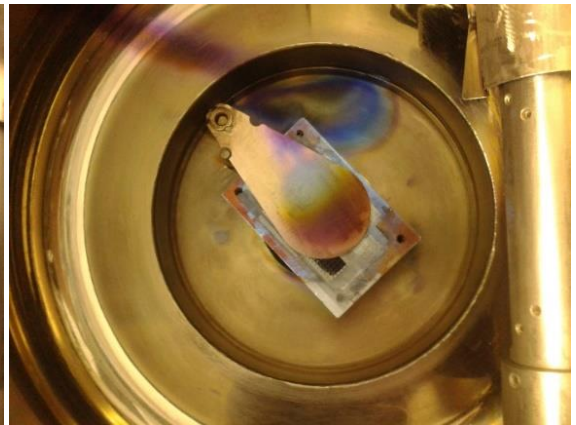


(c)

Görsel 3.5.a. Shadow maske **b.** Numune tutucu üzerine yerleştirilen filmler **c.** Filmler üzerine yerleştirilen shadow maskelerin fotoğrafları



(b)



(b)

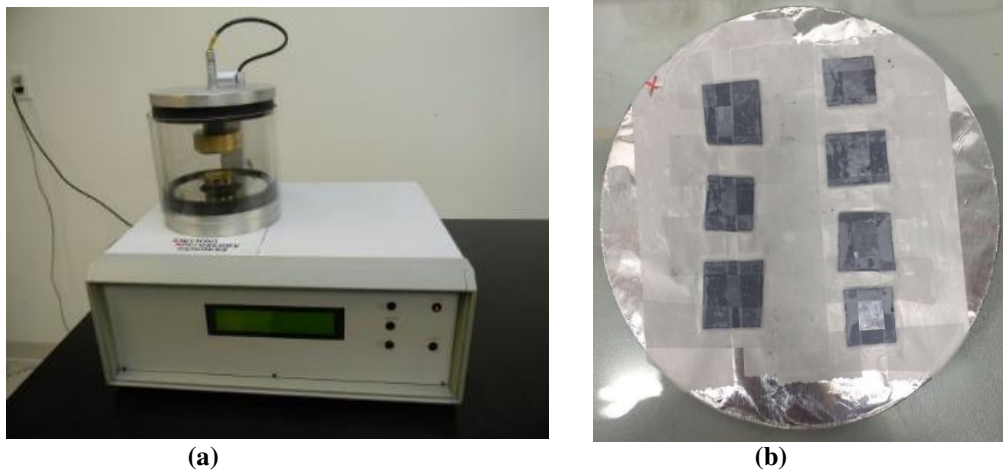
Görsel 3.6.a. Metal buharlaştırma sisteminin üst kısmındaki numune tutucu ve açık konumdaki shutter **b.** Kapalı konumdaki shutter

Maskelenme işlemi tamamlanan filmler, numune odacığına yerleştirilmiş ve shutter kapatılmış, buharlaşma anına kadar da kapalı tutulmuştur. Shutterin kapalı tutulmasının nedeni ise, tam buharlaşma anına kadar numune odacığı içindeki kirlilikten numunelerin etkilenmesini engellemektir. Cihazın numune odacığının iç üst kısmındaki numune tutucu ile açık ve kapalı konumdaki shutter fotoğrafı Görsel 3.6’da verilmiştir.

Vakum sistemi içerisindeki metal-kaynak kısmı, numune odacığının alt kısmında bulunmaktadır (Görsel 3.7.a). Bu kısma yerleştirilen basket pota (Görsel 3.7.b) içine buharlaştırılmak üzere %99,99 saflıktaki Al teller konulmuştur. 5×10^{-5} torr basınçta potadan akım geçirilmeye başlanmıştır. Sistemdeki potadan akım geçerken pota yüksek ısı değerlerine ulaşmış ve sıcaklık yeterli değere geldiğinde alüminyum önce erimeye, daha sonra buharlaşmaya başlamış, buharlaşan alüminyum yarıiletken filmin yüzeyine yapışarak 100nm ince bir metal film tabakası oluşturmuştur.



Görsel 3.7.a. Numune odacığının alt kısmında bulunan metal-kaynak kısmı **b.** Basket pota



Görsel 3.8.a. EMS550X marka kaplama cihazı **b.** Alt omik kontak yapılıırken kullanılan alttaşlar

Alt omik kontaklar ise, *p*-Si alttaşların mat yüzeyine 90nm kalınlığında EMS550X marka kaplama cihazı (Görsel 3.8.a) ile Au metali buharlaştırılarak oluşturulmuştur. Bu aşamada filmler Görsel 3.8.b’de verilen fotoğraftaki gibi yerleştirilip buharlaştırma işlemine başlanmıştır.

Fabrikasyonu yapılan bütün diyotlar kodlanmış ve yapılan kodlamalar Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Elde edilen filmler kullanılarak fabrikasyonu yapılan heteroeklem diyotların kodları

Film	Film Kodu	Diyot Kodu
Katkısız ZnO	Z-00	DZ-00
%0,2 La katkılı ZnO	ZLa-02	DZLa-02
%0,4 La katkılı ZnO	ZLa-04	DZLa-04
%0,6 La katkılı ZnO	ZLa-06	DZLa-06
%0,8 La katkılı ZnO	ZLa-08	DZLa-08
%1 La katkılı ZnO	ZLa-1	DZLa-1
%0,2 Eu katkılı ZnO	ZEu-02	DZEu-02
%0,4 Eu katkılı ZnO	ZEu-04	DZEu-04
%0,6 Eu katkılı ZnO	ZEu-06	DZEu-06
%0,8 Eu katkılı ZnO	ZEu-08	DZEu-08
%1 Eu katkılı ZnO	ZEu-1	DZEu-1
%0,2 Er katkılı ZnO	ZEr-02	DZEr-02
%0,4 Er katkılı ZnO	ZEr-04	DZEr-04
%0,6 Er katkılı ZnO	ZEr-06	DZEr-06
%0,8 Er katkılı ZnO	ZEr-08	DZEr-08
%1 Er katkılı ZnO	ZEr-1	DZEr-1

3.1.5. Elde edilen film ve heteroeklem diyotların karakterizasyonunda kullanılan cihazlar

Elde edilen filmlerin XRD spektrumları Eskişehir Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Yarıiletken Karakterizasyon Laboratuvarında bulunan BRUKER D2 Phaser XRD cihazı (Görsel 3.9.a) kullanılarak $2\theta=30^\circ - 60^\circ$ arasında $0,02$ derece

adımlarla alınmıştır. Tüm ölçümler monokromatik $Cu/K\alpha$ ($\lambda=1,54059\text{\AA}$) ışını ile oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



(a)



(b)

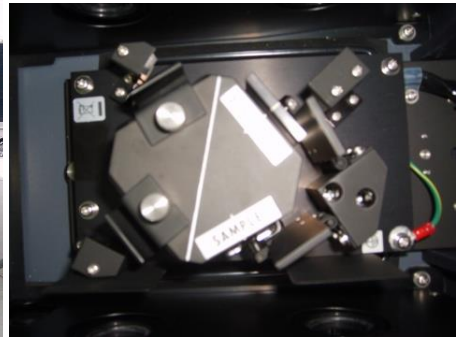
Görsel 3.9.a. BRUKER D2 Phaser XRD cihazı ve b. ZEISS Ultraplus alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM)

Filmlerin yüzey morfolojileri Eskişehir Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi'nde bulunan ZEISS Ultraplus alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) kullanılarak çalışılmıştır (Görsel 3.9.b).

Elde edilen katkısız ve katkılı ZnO filmlerinin diffüz yansıma spektrumları entegre küre ataçmanlı SHIMADZU UV-2450 UV-VIS spektrofotometre cihazı (Görsel 3.10) kullanılarak 200-900nm dalgaboyu aralığında, 0,5nm hassasiyet ile ölçülmüştür. Yansıma ölçümlerinde referans olarak, toz halde baryum sülfat ($BaSO_4$) kullanılmıştır.



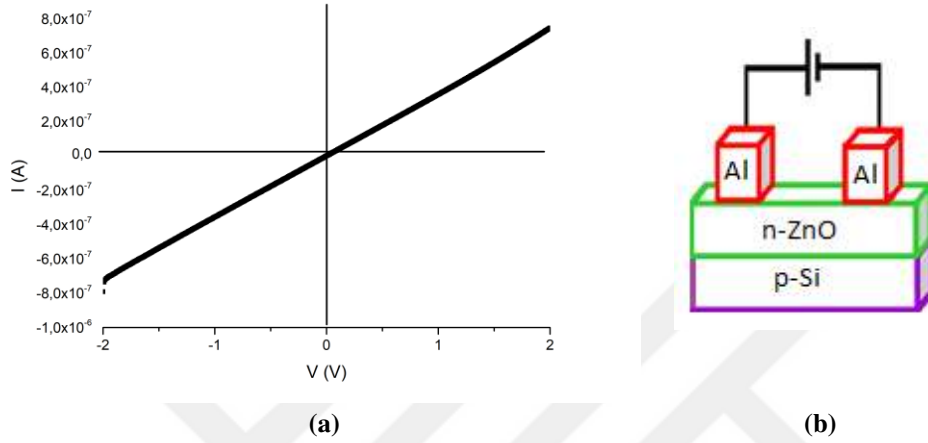
(a)



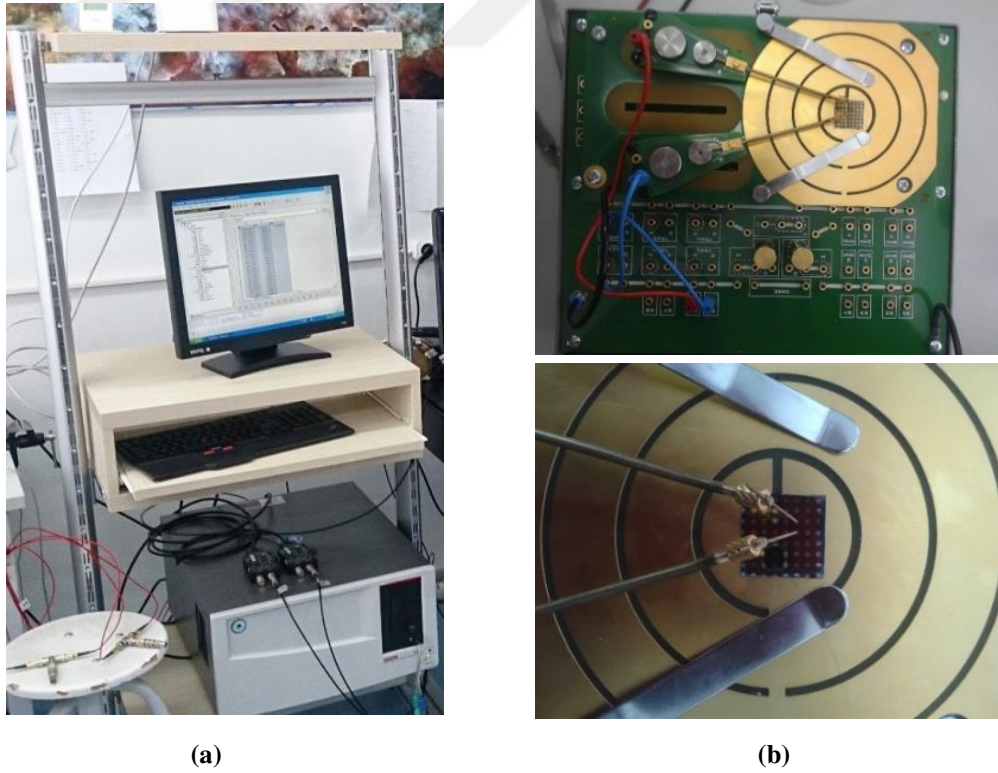
(b)

Görsel 3.10.a. SHIMADZU UV-2450 UV-VIS spektrofotometre cihazı ve b. Entegre küre ataçmanı

Diyot ölçümlerine geçilmeden önce, oluşturulan üst ($n\text{-ZnO}/\text{Al}$) kontaklarının omik kontak olup olmadığı $I\text{-}V$ ölçümleri alınarak kontrol edilmiştir. Bütün diyotların üst kontaklarının omik olduğu görülmüştür. Örnek olarak, $\text{Au}/p\text{-Si}/n\text{-ZnO}/\text{Al}$ diyotuna ait üst kontakların $I\text{-}V$ grafiği Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. $\text{Au}/p\text{-Si}/n\text{-ZnO}/\text{Al}$ heteroeklem diyotuna ait üst kontakların **a.** $I\text{-}V$ grafiği ve **b.** ölçümün şematik gösterimi



Görsel 3.11.a. $p\text{-}n$ heteroeklem diyotların karanlık ortamda $I\text{-}V$ ölçümleri için kullanılan ölçüm sistemi ve **b.** Numune kutusuna yerleştirilen diyot

Hazırlanan $Au/p\text{-Si}/n\text{-ZnO}/Al$, $Au/p\text{-Si}/n\text{-ZnO:La}/Al$, $Au/p\text{-Si}/n\text{-ZnO:Eu}/Al$, ve $Au/p\text{-Si}/n\text{-ZnO:Er}/Al$ heteroeklem diyotların karanlık ortamda I - V ölçümleri için kullanılan KEITHLEY 4200 SCS yarıiletken karakterizasyon ölçüm sisteminin bir fotoğrafı Görsel 3.11.a’da verilmiştir. Diyotların yerleştirildiği numune kutusu ve ölçümü yapılan örnek bir diyot Görsel 3.11.b’de verilmiştir.

$Au/p\text{-Si}/n\text{-ZnO}/Al$, $Au/p\text{-Si}/n\text{-ZnO:La}/Al$, $Au/p\text{-Si}/n\text{-ZnO:Eu}/Al$, ve $Au/p\text{-Si}/n\text{-ZnO:Er}/Al$ heteroeklem diyotların farklı aydınlatma şiddetlerindeki I - V ölçümleri için kullanılan 150W’lık bir ksenon lambaya sahip 1,5AM (air mass) spektral dağılımını veren SCIENCETECH marka SF-150 model solar simülatör ve diyotların yerleştirildiği numune kutusu Görsel 3.12’de verilmiştir. Kullanılan ışığın şiddeti solar güçmetre ile ölçülmüştür. I - V ölçümleri yine KEITHLEY 4200 SCS yarıiletken karakterizasyon ölçüm sistemi ile alınmıştır.



Görsel 3.12. p - n heteroeklem diyotların farklı aydınlatma şiddetlerinde I - V ölçümleri için kullanılan deney düzeneği

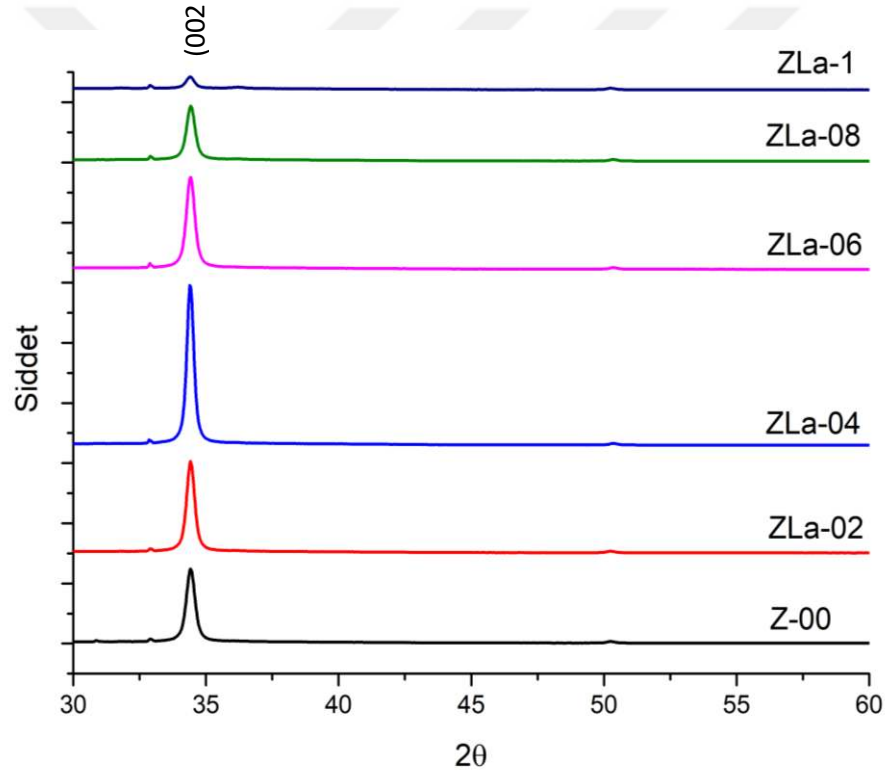
4. DENEYSEL VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Katkısız ve La, Eu, Er Katkılı ZnO Filmlerinin Yapısal Özellikleri

Tez çalışmasının bu bölümünde elde edilen katkısız ve farklı oranlarda La, Eu ve Er katkılı ZnO filmlerinin yapısal karakterizasyonlarına yer verilmiştir. Elde edilen bütün filmlerin XRD spektrumları çekilmiş, spektrum verileri kullanılarak yapısal parametreleri belirlenmiştir.

4.1.1. Katkısız ve La katkılı ZnO filmlerinin yapısal özellikleri

Katkısız ve farklı oranlarda La katkılı ZnO filmlerine ait XRD spektrumları Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Elde edilen katkısız ve La katkılı ZnO filmlerinin XRD spektrumları

Yapılan analiz sonucunda yapının hekzagonal wurtzite ZnO yapısına (JCPDS kart no:036-1451, Zinkit faz) ait tek faz olduğu belirlenmiştir. Katkı miktarı çok düşük düzeylerde olduğundan, La katkı elementi ile ilgili La_2O_3 ya da $\text{La}(\text{OH})_3$ fazlarına ait herhangi bir pik gözlenmemiştir. Spektrumlarda gözlenen (100), (101), (102) ve (110) piklerinin (002) pikinin yanında çok çok küçük şiddete sahip olması nedeniyle (<%1), diğer pikler ihmal edilmiştir. Bu nedenle sadece (002) pikinin gözlemlendiği ve tercihli

yönelimin (002) olduğu söylenebilir. La katkı miktarının artışıyla önce kırınım piklerinin şiddeti artmış (ZLa-04 en şiddetli), daha sonra katkı miktarı arttıkça pik şiddeti azalmıştır. Başka bir deyişle, küçük katkı miktarlarında pik şiddeti artarken, katkının daha da artmasıyla birlikte pik şiddeti azalmaya başlamıştır. Bu sonuçlar literatür ile uyumludur. Xu ve ark. [105] yaptıkları çalışmada farklı oranlarda La katkılı ZnO filmlerini elde etmişlerdir. Artan La katkı miktarı ile pik şiddetinin önce arttığını, katkının daha da artmasıyla birlikte pik şiddetinin azalmaya başladığını rapor etmişlerdir. Elde ettikleri filmlerde tercihli yönelimin (002) düzleminde olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca katkı ile birlikte pik pozisyonlarında önemli bir değişimin olmadığını da gözlemişlerdir. Benzer sonucu Maache ve ark. [23] da yaptıkları bir çalışmada rapor etmişlerdir.

Elde edilen filmlere ait XRD spektrumlarındaki (002) piklerinin β yarıpik genişliği de La katkı miktarı artınca daralmış (ZLa-04 en dar), daha sonra katkı arttıkça β değeri yeniden büyümüştür (Tablo 4.1).

Tablo 4.1. Elde edilen katkısız ve La katkılı ZnO filmlerinin (002) yönelimine ait yapısal parametreleri

Film kodu	2θ (°)	d (Å)	β (°)	D (nm)	δ (m ⁻²) $\times 10^{15}$	c (Å)	$\epsilon_z \times 10^{-5}$	σ_c (Nm ⁻²) $\times 10^7$
Z-00	34,425	2,60311	0,377	21,9	2,09	5,2062	-8,14	1,85
ZLa-02	34,420	2,60349	0,351	23,4	1,82	5,2070	6,41	-1,45
ZLa-04	34,411	2,60410	0,307	26,8	1,39	5,2082	30,00	-6,81
ZLa-06	34,417	2,60370	0,369	22,3	2,01	5,2074	14,60	-3,32
ZLa-08	34,429	2,60282	0,368	22,4	2,00	5,2056	-19,40	4,40
ZLa-1	34,424	2,60321	0,363	22,7	1,94	5,2064	-4,11	0,93

Elde edilen filmlerinin (002) yönelimindeki kristallenme boyutları Denklem (2.18)'de verilen Scherrer formülü kullanılarak ve dislokasyon yoğunlukları ise Denklem (2.19) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 4.1'de verilmiştir. Elde edilen katkısız ve La katkılı ZnO filmlerinin kristallenme boyutları 21-27nm aralığında değişmektedir. En büyük kristallenme boyutu ve en küçük dislokasyon yoğunluğu ZLa-04 filminde oluşmuştur.

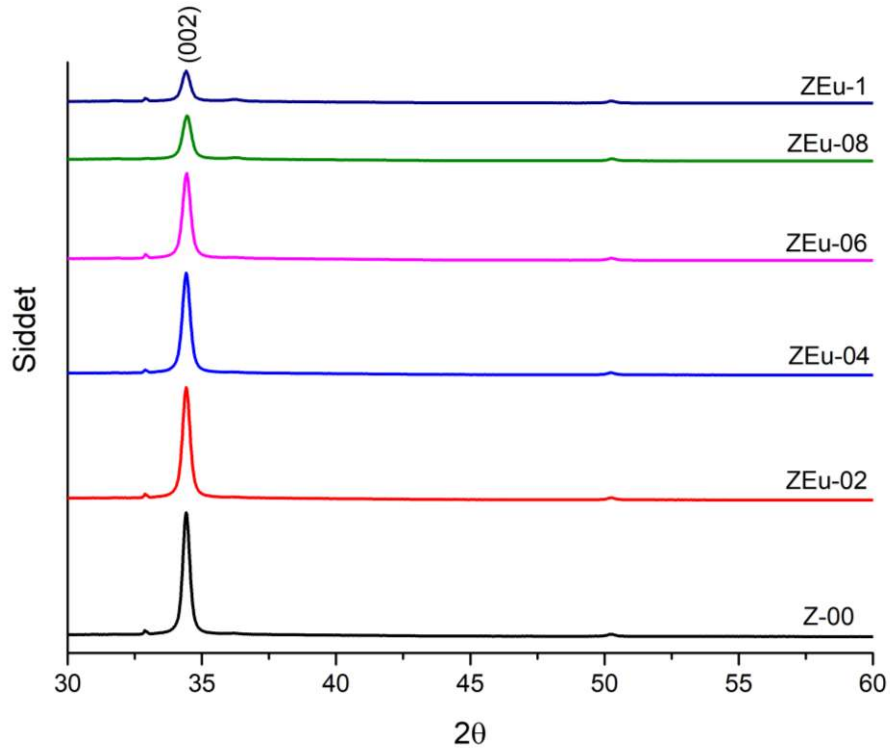
036-1451 numaralı JCPDS kartında verilen ZnO hekzagonal yapıya ait (002) pikine karşı gelen 2θ açısı $34,422^\circ$ olup, örgü sabitleri $a=3,24982$ Å ve $c= 5,20661$ Å değerindedir. Hekzagonal yapıya ait a ve c örgü parametreleri Denklem (2.17) kullanılarak hesaplanabilir. Ancak, elde edilen filmlerin XRD spektrumlarında sadece (002) piki olması nedeniyle, a örgü parametresi hesaplanamamış, sadece c örgü

parametreleri hesaplanabilmiş ve Tablo 4.1’de verilmiştir. En büyük c değeri ZLa-04 filmine aittir. Hesaplanan bu değerler literatür ile uyum içindedir.

Elde edilen filmlerin kristal yapısına ait ϵ_z deformasyonu Denklem (2.20) ve σ_c gerilimi Denklem (2.22) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 4.1’de verilmiştir.

4.1.2. Katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerinin yapısal özellikleri

Katkısız ve farklı oranlarda Eu katkılı ZnO filmlerine ait XRD spektrumları Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Elde edilen katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerinin XRD spektrumları

Elde edilen katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerinin XRD spektrumlarından, filmlerin hepsinde belirgin olarak tek pik göze çarpmaktadır. Bu (002) pikinin hekzagonal wurtzite ZnO yapıya (JCPDS kart no: 36-1451; Zinkit faz) ait olduğu belirlenmiştir. Spektrumlarda gözlenen (100), (101), (102) ve (110) piklerinin, (002) pikinin yanında çok çok küçük şiddete sahip olması nedeniyle (<%1), diğer pikler ihmal edilmiştir. Katkı miktarı çok düşük düzeylerde olduğundan, Eu katkı elementi ile ilgili Eu_2O_3 ya da Eu_3O_4 gibi fazlara ait herhangi bir pik gözlenmemiştir. Artan katkı miktarı ile (002) kırınım piki şiddetinin azaldığı açıkça görülmektedir. Eu katkı miktarı arttıkça, (002) pik şiddeti

azalmıştır. Bulunan bu sonuç literatür ile uyumludur [15, 106]. Katkı ile birlikte pik pozisyonlarında düzenli bir artma ya da azalma olmadığı da görülmüştür.

Elde edilen filmlere ait XRD spektrumlarındaki (002) piklerinin β yarıpik genişliği de Eu katkılanınca daralmış (ZEu-02 en dar), daha sonra katkı miktarı arttırılınca β değeri yeniden büyümüştür (Tablo 4.2).

Elde edilen filmlerinin (002) yönelimindeki ortalama kristallenme boyutları Denklem (2.18)' de verilen Scherrer formülü kullanılarak hesaplanmış Tablo 4.2'de verilmiştir. Bu tablodan görüldüğü üzere, filmlerin kristallenme boyutu 21-25 nm aralığında değişmiş, ZEu-02 kodlu film en büyük kristallenme boyutuna sahiptir.

Elde edilen katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerinin δ dislokasyon yoğunlukları Denklem (2.19) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 4.2'de verilmiştir. En küçük dislokasyon yoğunluğu ZEu-02 filminde oluşmuştur.

Hekzagonal yapıya sahip filmlere ait c örgü parametreleri Denklem (2.17), kristal yapısına ait ϵ_z deformasyonu Denklem (2.20) ve σ_c gerilimi Denklem (2.22) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 4.2'de verilmiştir.

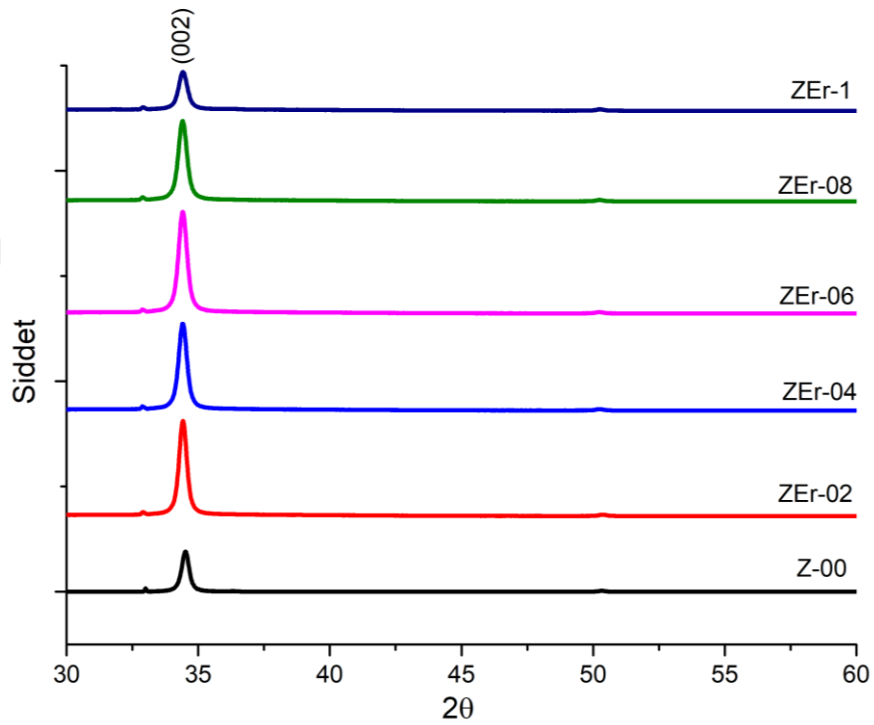
Tablo 4.2. Elde edilen katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerinin (002) yönelimine ait yapısal parametreleri

Film kodu	2θ (°)	d (Å)	β (°)	D (nm)	δ (m ⁻²) x10 ¹⁵	c (Å)	ϵ_z x10 ⁻⁵	σ_c (Nm ⁻²) x10 ⁷
Z-00	34,425	2,60311	0,377	21,9	2,09	5,2062	-8,14	1,85
ZEu-02	34,418	2,60365	0,325	25,3	1,56	5,2073	12,80	-2,90
ZEu-04	34,424	2,60320	0,339	24,3	1,69	5,2064	-4,72	1,07
ZEu-06	34,442	2,60189	0,342	24,0	1,73	5,2038	-54,8	12,40
ZEu-08	34,417	2,60199	0,369	22,3	2,00	5,2040	-51,2	11,60
ZEu-1	34,407	2,60444	0,351	23,4	1,82	5,2089	42,9	-9,74

4.1.3. Katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerinin yapısal özellikleri

Katkısız ve farklı oranlarda Er katkılı ZnO filmlerine ait XRD spektrumları Şekil 4.3'te XRD verilmiştir. Elde edilen bütün filmlerde yine sadece (002) pikine rastlanmıştır (JCPDS kart no:036-1451; Zinkit faz). Er katkı miktarı çok düşük düzeylerde olduğundan, XRD spektrumlarında katkı elementi ile ilgili Er₂O₃ ya da Er(OH)₃ gibi fazlara ait herhangi bir pik gözlenmemiştir. Ayrıca, yine spektrumlarda gözlenen (002) pikinin dışındaki diğer (100), (101), (102) ve (110) piklerinin çok çok küçük şiddete sahip olması nedeniyle (<0%1), bu pikler hesaplamalarda ihmal edilmiştir. Er katkı miktarının artışıyla önce (002) kırınım pikinin şiddeti artmış (ZEr-06 en şiddetli), katkı miktarı daha

da artırıldığında bu pik şiddeti azalmıştır. Bu trend literatür ile uyumludur. Kumari ve ark. [31] yaptıkları çalışmada, katkısız ve %0,2, %0,4, %0,6 Er katkılı ZnO filmlerini elde etmişlerdir. Elde ettikleri bu filmlerin XRD spektrumlarından, elde ettikleri filmlerin hekzagonal yapıda ve (002) tercihli yönelimine sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Er katkısı ile önce pik şiddetinin arttığını (en yüksek %0,4 Er katkılı ZnO filminde), katkının daha da artmasıyla pik şiddetinin yeniden azaldığını ve kristal yapının bozulduğunu gözlemlemişlerdir. Choi ve Ma [107] katkısız ve %1, %2, %3 Er katkılı ZnO filmlerini püskürtme metodunu kullanarak MgO alttaşlar üzerine elde etmişlerdir. Filmlerin XRD spektrumlarından, ZnO filmine %1 Er katkılандığında pik şiddetinin arttığını, katkı oranının artırılmasıyla pik şiddetinde azalma olduğunu rapor etmişlerdir. Ayrıca, Er katkısına ait fazla ilgili herhangi bir pike rastlanmadığını da belirtmişlerdir. Elde ettikleri tüm filmlerin tercihli yöneliminin (002) düzleminde olduğunu ifade etmişlerdir.



Şekil 4.3. Elde edilen katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerinin XRD spektrumları

Elde edilen filmlere ait XRD spektrumlarındaki (002) piklerinin β yarıpik genişliği Er katkı miktarı artınca önce daralmış (ZEr-02 en dar), daha sonra katkı arttıkça β değeri yeniden büyümüştür (Tablo 4.3).

Elde edilen katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerinin (002) yönelimindeki kristallenme boyutları Denklem (2.18)' de verilen Scherrer formülü kullanılarak ve

dislokasyon yoğunlukları ise Denklem (2.19) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 4.3'te verilmiştir. Elde edilen filmlerinin kristallenme boyutları 21-24nm aralığında değişmektedir. En büyük kristallenme boyutu ve en küçük dislokasyon yoğunluğu ZEr-02 filminde oluşmuştur.

Elde edilen filmlerin XRD spektrumlarında sadece (002) piki olması nedeniyle, a örgü parametresi hesaplanamamış, sadece c örgü parametreleri Denklem (2.17) kullanılarak hesaplanabilmiş ve hesaplanan değerler Tablo 4.3'te verilmiştir. En büyük c değeri ZEr-02 filmine aittir.

Elde edilen filmlerin kristal yapısına ait ϵ_z deformasyonu Denklem (2.20) ve σ_c gerilimi Denklem (2.22) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Elde edilen katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerinin (002) yönelimine ait yapısal parametreleri

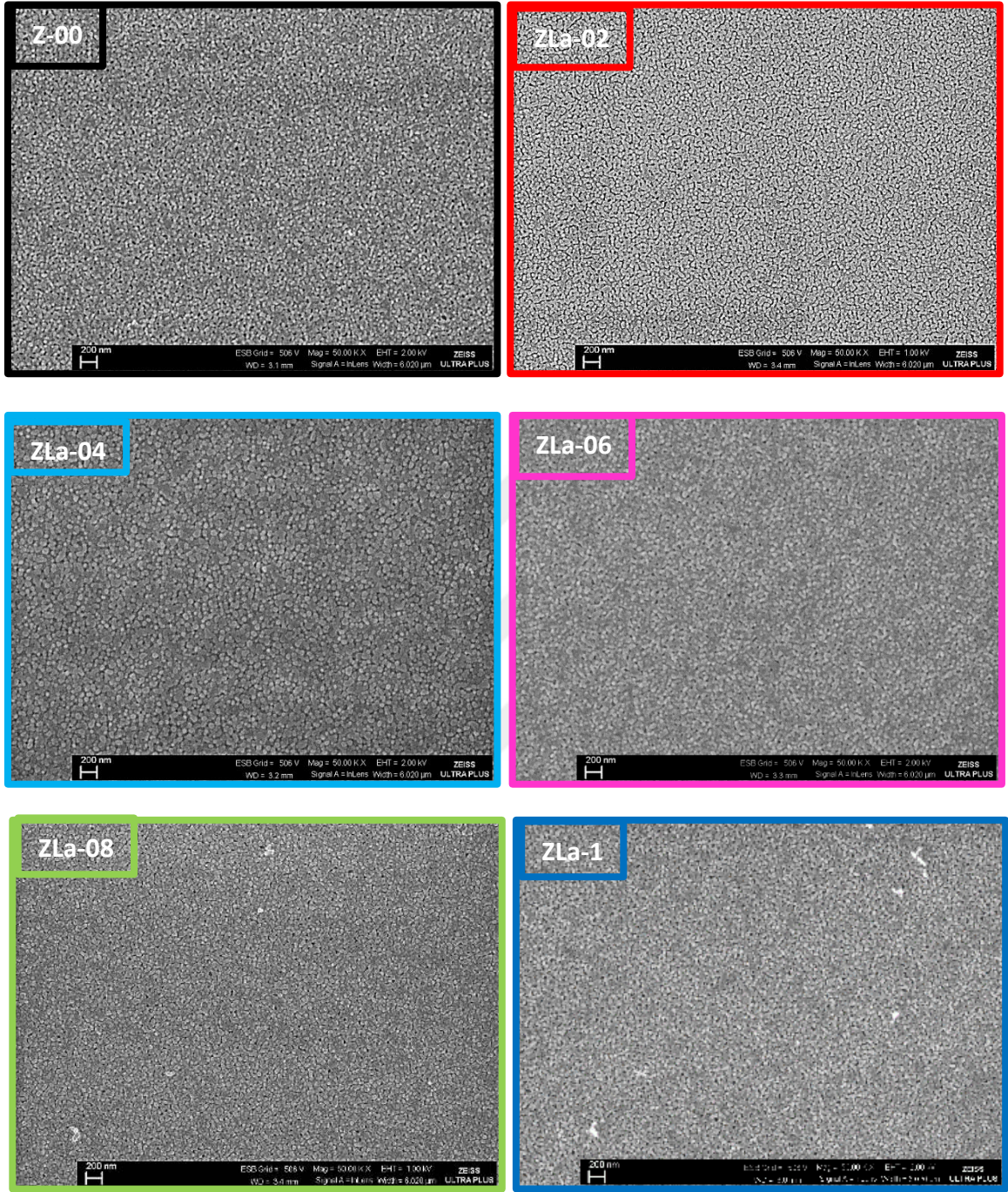
Film kodu	2θ (°)	d (Å)	β (°)	D (nm)	δ (m ⁻²) x10 ¹⁵	c (Å)	ϵ_z x10 ⁻⁵	σ_c (Nm ⁻²) x10 ⁷
Z-00	34,425	2,60311	0,377	21,9	2,09	5,2062	-8,14	1,85
ZEr-02	34,418	2,60361	0,342	24,1	1,72	5,2072	11,00	-2,49
ZEr-04	34,425	2,60313	0,350	23,5	1,81	5,2063	-7,30	1,66
ZEr-06	34,425	2,60313	0,357	23,0	1,88	5,2063	-7,18	1,63
ZEr-08	34,421	2,60342	0,376	21,9	2,08	5,2068	3,80	-0,86
ZEr-1	34,426	2,60300	0,384	21,4	2,17	5,2060	-12,2	2,77

4.2. Katkısız ve La Eu, Er Katkılı ZnO Filmlerinin Morfolojik Özellikleri

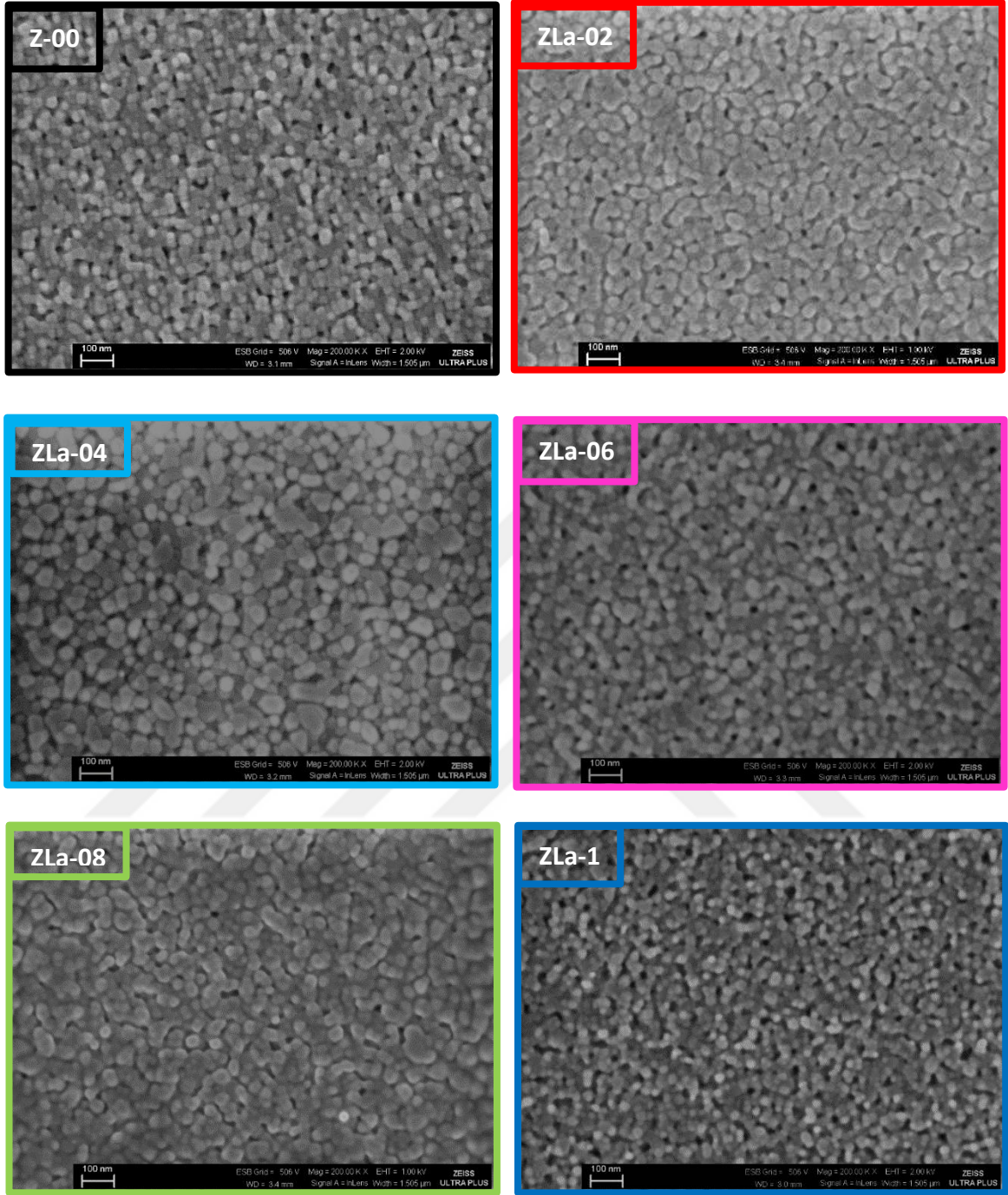
Tez çalışmasının bu bölümünde katkısız ve farklı oranlarda La, Eu ve Er katkısı ile elde ZnO filmlerinin yüzey morfolojileri araştırılmıştır. Elde edilen bütün filmlerin SEM görüntüleri çekilmiştir. Filmlerin yüzey durumları hakkında bilgi edinmek amacıyla, görüntüler iki farklı büyütmede alınmıştır. Ayrıca bu görüntüler ImageJ 1,46r analiz programı yardımıyla analiz edilmiş, yüzey haritaları çizilmiş, tane sınırları belirlenerek ortalama tane boyutu hesaplanmıştır.

4.2.1. Katkısız ve La katkılı ZnO filmlerinin morfolojik özellikleri

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te katkısız ve farklı oranlarda La katkılı ZnO filmlerinin sırasıyla x50k ve x200k büyütmelerde çekilen SEM görüntüleri verilmiştir. Elde edilen filmlerin düşük büyütmedeki SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 4.4), film yüzeylerinin çatlak, boşluk ve gözenekler olmadan düzgün ve homojen olarak sürekli bir yapıda olduğu, *p*-Si alttaşların iyi bir şekilde kaplandığı görülmektedir. Yüksek büyütmedeki SEM görüntülerinden (Şekil 4.5) ise, bütün elde edilen filmlerin yüzeylerinin şekilsel olarak birbirinden farklı olmayıp, nanoyapılı dairesel tanelerden olduğu daha belirgin olarak görülmektedir. Diğer bir deyişle, La katkısı ile ZnO filminin yüzeyini oluşturan nanotanelerin şekilsel olarak yapısının değişmediği, sadece boyutlarının değiştiği, yani bütün film yüzeylerinin dairesel yapıdaki tanelerden olduğu gözlenmiştir. Ilıcan ve Ilgu [20] ve Xu ve ark [108] sol jel dip kaplama metoduyla, Bouznit ve ark. [109] püskürtme metoduyla ve Aroutiounian ve ark. [110] magnetron sıçratma metoduyla elde ettikleri La katkılı ZnO filmlerinin SEM fotoğrafları, bu çalışmada elde edilen filmlerin yüzey morfolojisine benzemektedir.



Şekil 4.4. Katkısız ve La katkılı ZnO filmlerine ait x50k büyütme oranındaki SEM görüntüleri



Şekil 4.5. Katkısız ve La katılı ZnO filmlerine ait x200k büyütme oranındaki SEM görüntüleri

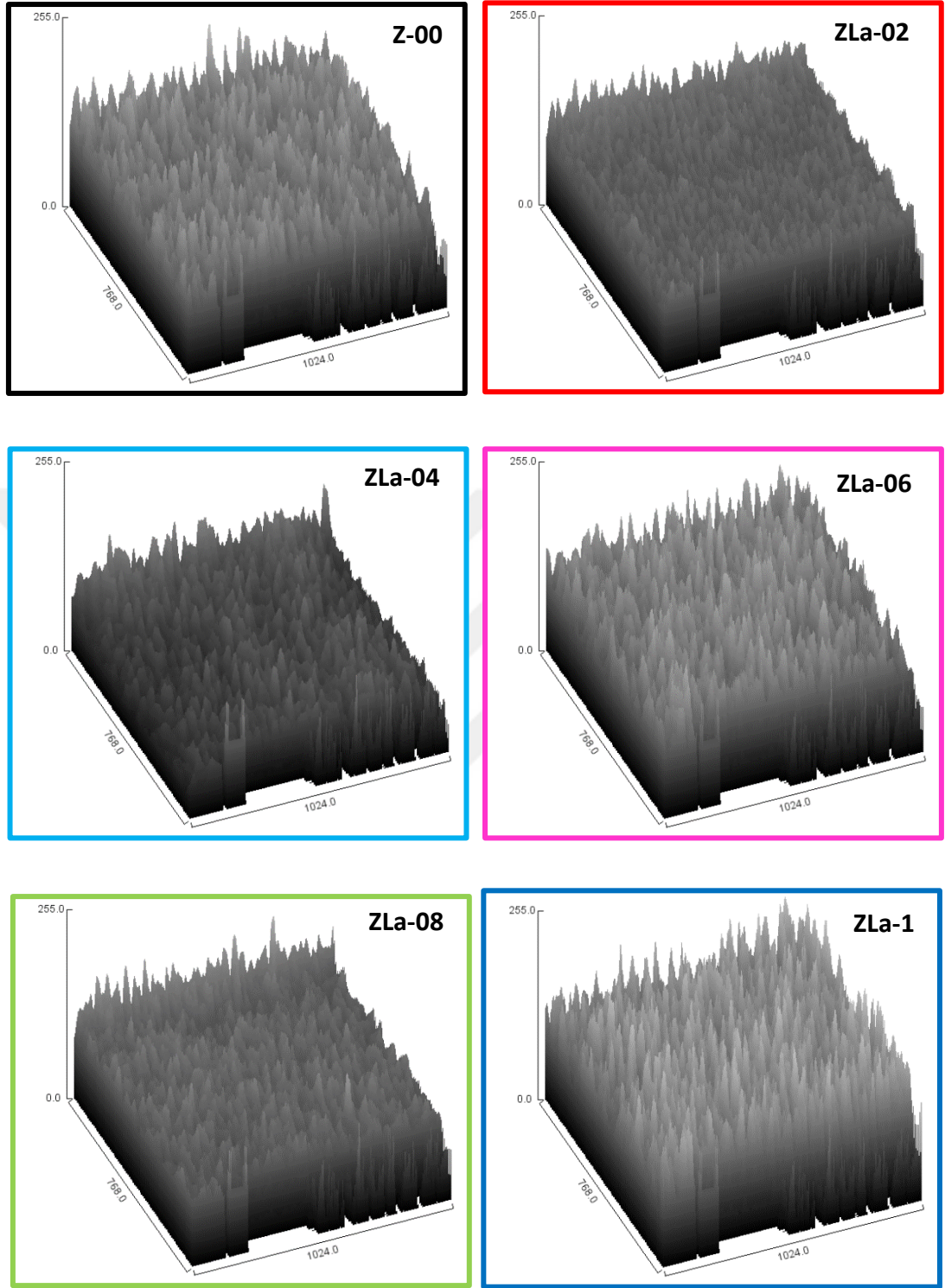
Yüksek büyütmede çekilen (x200k) SEM görüntüleri kullanılarak ImageJ analiz programı yardımıyla ortalama tane boyutları ($\bar{D}$) hesaplanmış ve Tablo 4.4’de verilmiştir. En büyük ortalama tane boyutu ZLa-04 filmine, en küçük tane boyutu ise ZLa-1 filmine aittir. Artan katkı ile tane boyutları önce büyürken, katkı miktarının daha da artmasıyla yapıda bozulmalar olmaya başlamış ve tane boyutları küçülmüştür. Bu durum XRD sonuçları ile uyum içersindedir.

Şekil 4.6’da katkısız ve La katkılı ZnO filmlerinin yüzey haritaları (8bit gri görüntü; $2^8=256$; 0 siyah, 255 beyaz) verilmiştir. Yüzey haritaları incelendiğinde, yüzey pürüzlülük oranlarının değiştiği görülmektedir. Minimum (0) ve maksimum (255) değerleri arasında yeralan yükseltelerin ortalama $\bar{Y}$ değerleri Tablo 4.4’de verilmiştir. En küçük pürüzlülüğe sahip olan film ZLa-04 filmidir ($\bar{Y}=66,0$).

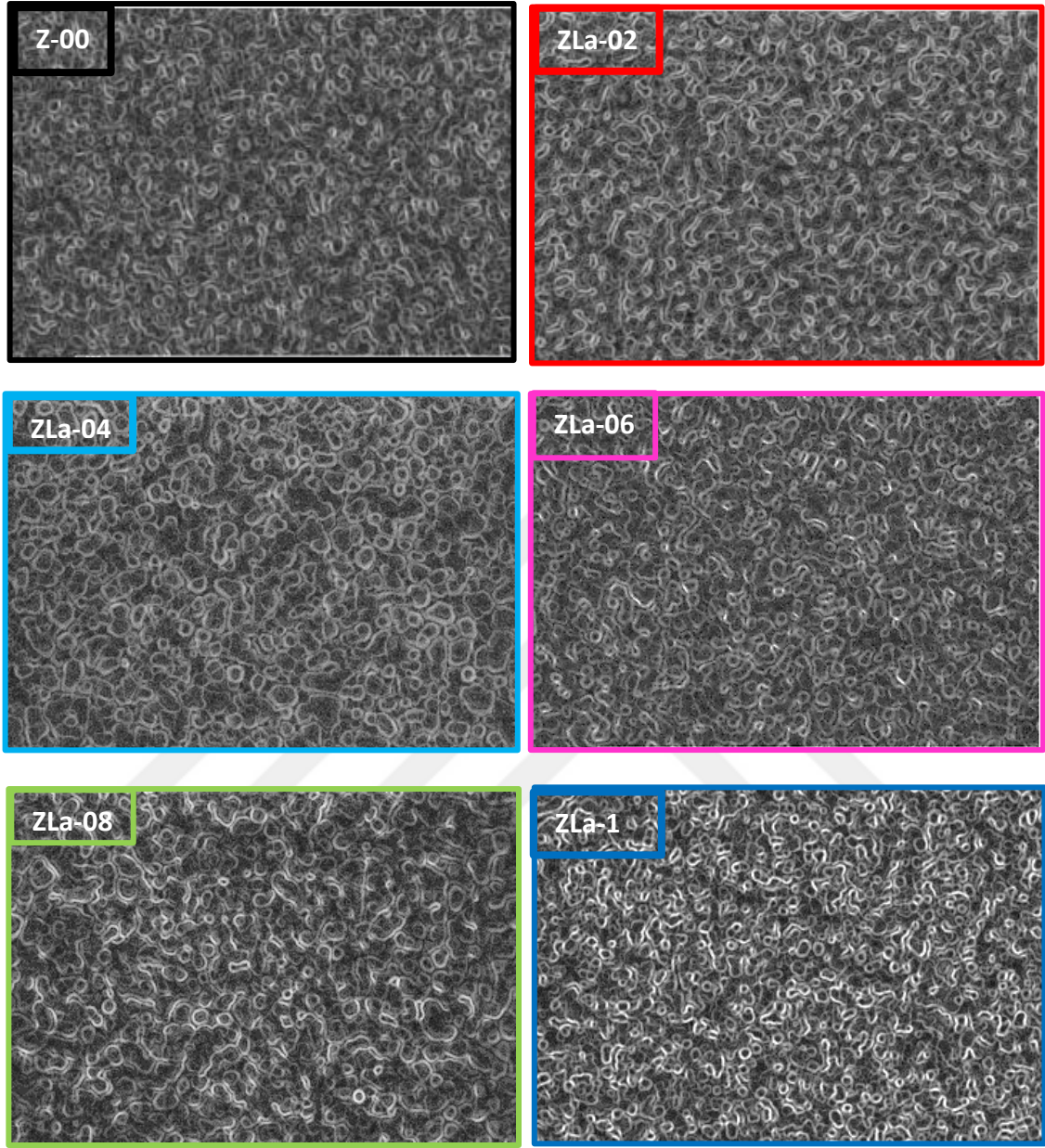
Tablo 4.4. Elde edilen katkısız ve La katkılı ZnO filmlerinin ortalama tane boyutları ve ortalama yükselti değerleri

Film kodu	$\bar{D}$ (nm)	$\bar{Y}$
Z-00	21,3	106,4
ZLa-02	28,0	91,1
ZLa-04	31,5	66,0
ZLa-06	27,0	109,4
ZLa-08	24,4	91,6
ZLa-1	20,3	118,0

Şekil 4.7’de katkısız ve La katkılı ZnO filmlerinin tane sınırları verilmiştir. Şekilsel olarak birbirinden çok farklı yüzeylerin oluşmadığı, yani katkı ile birlikte ZnO film yüzeyindeki tanelerin benzer yapıda oldukları, sadece tane sınırlarının boyutlarının değiştiği görülmektedir.



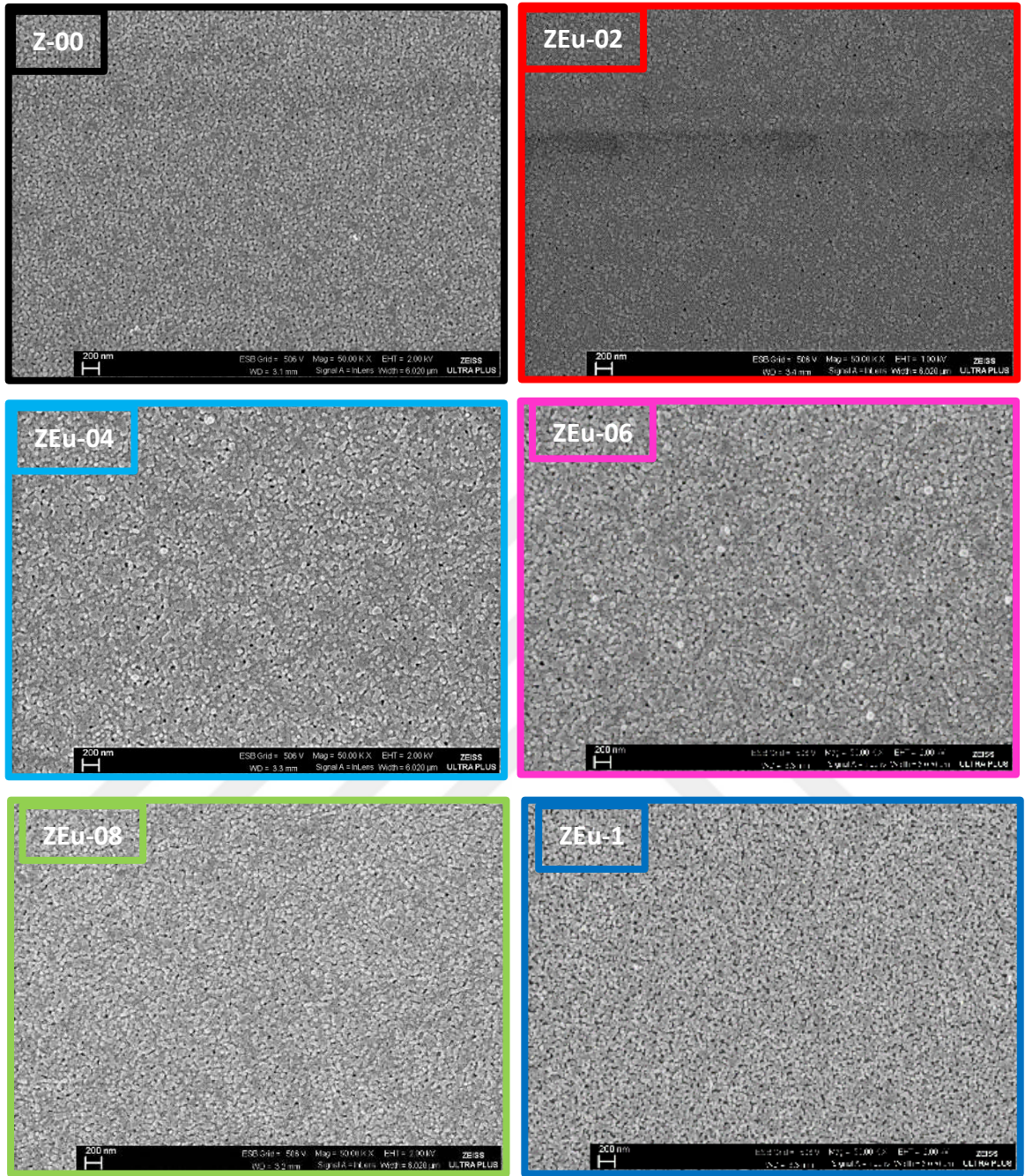
Şekil 4.6. Katkısız ve La katkılı ZnO filmlerine ait yüzey haritaları (x200k büyütme oranında çekilen SEM görüntüleri kullanılmıştır)



Şekil 4.7. *Katkısız ve La katkılı ZnO filmlerinin tane sınırları (x200k büyütme oranında çekilen SEM görüntüleri kullanılmıştır)*

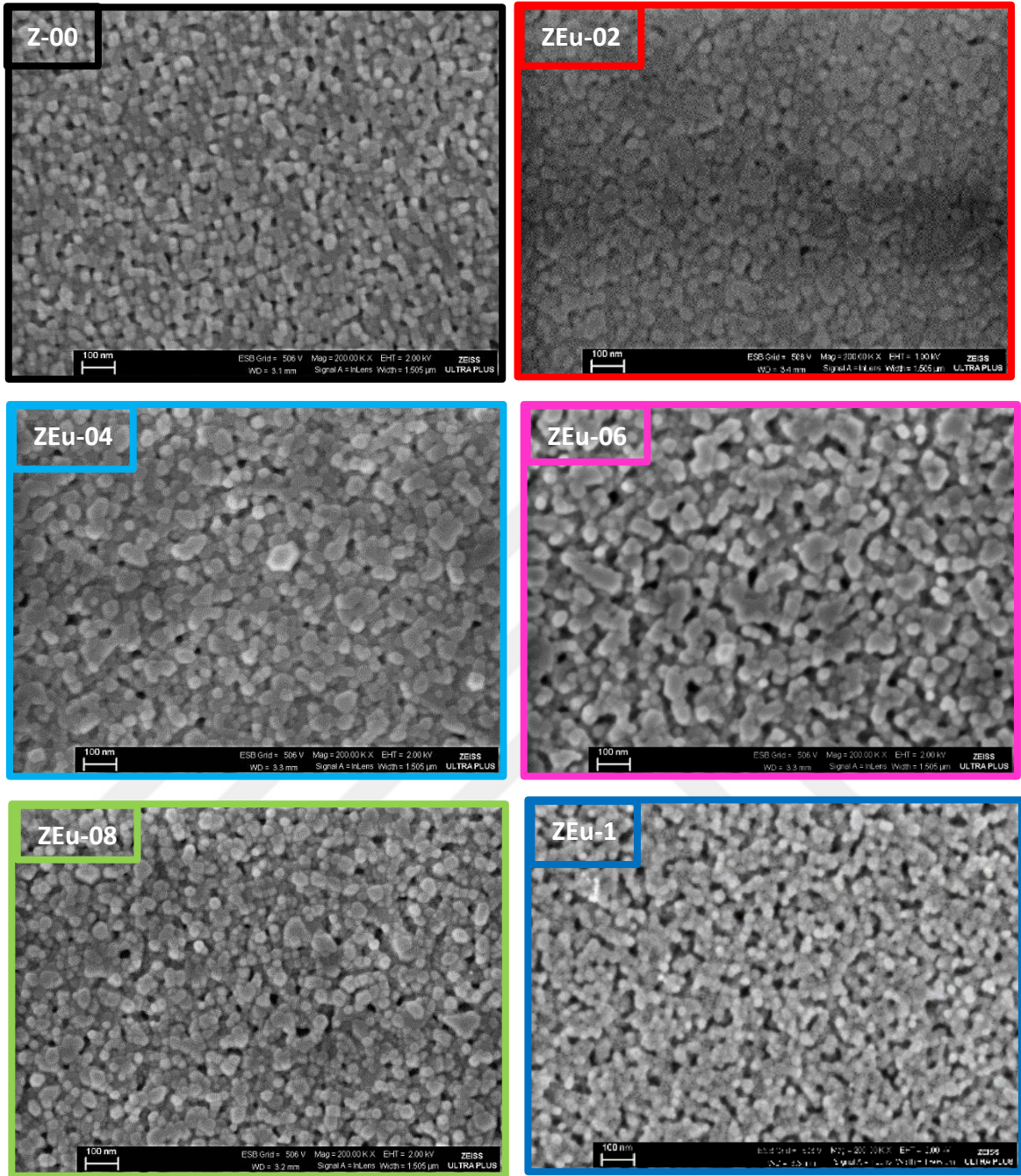
4.2.2. Katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerinin morfolojik özellikleri

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da katkısız ve farklı oranlarda Eu katkılı ZnO filmlerinin sırasıyla x50k ve x200k büyütme oranlarında çekilen SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.8’deki SEM görüntüleri incelendiğinde, film yüzeylerinde çatlak, boşluk ve gözeneklerin oluşmadığı, düzgün ve homojen olarak alttaşın kaplandığı görülmektedir.



Şekil 4.8. Katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerine ait x50k büyütme oranındaki SEM görüntüleri

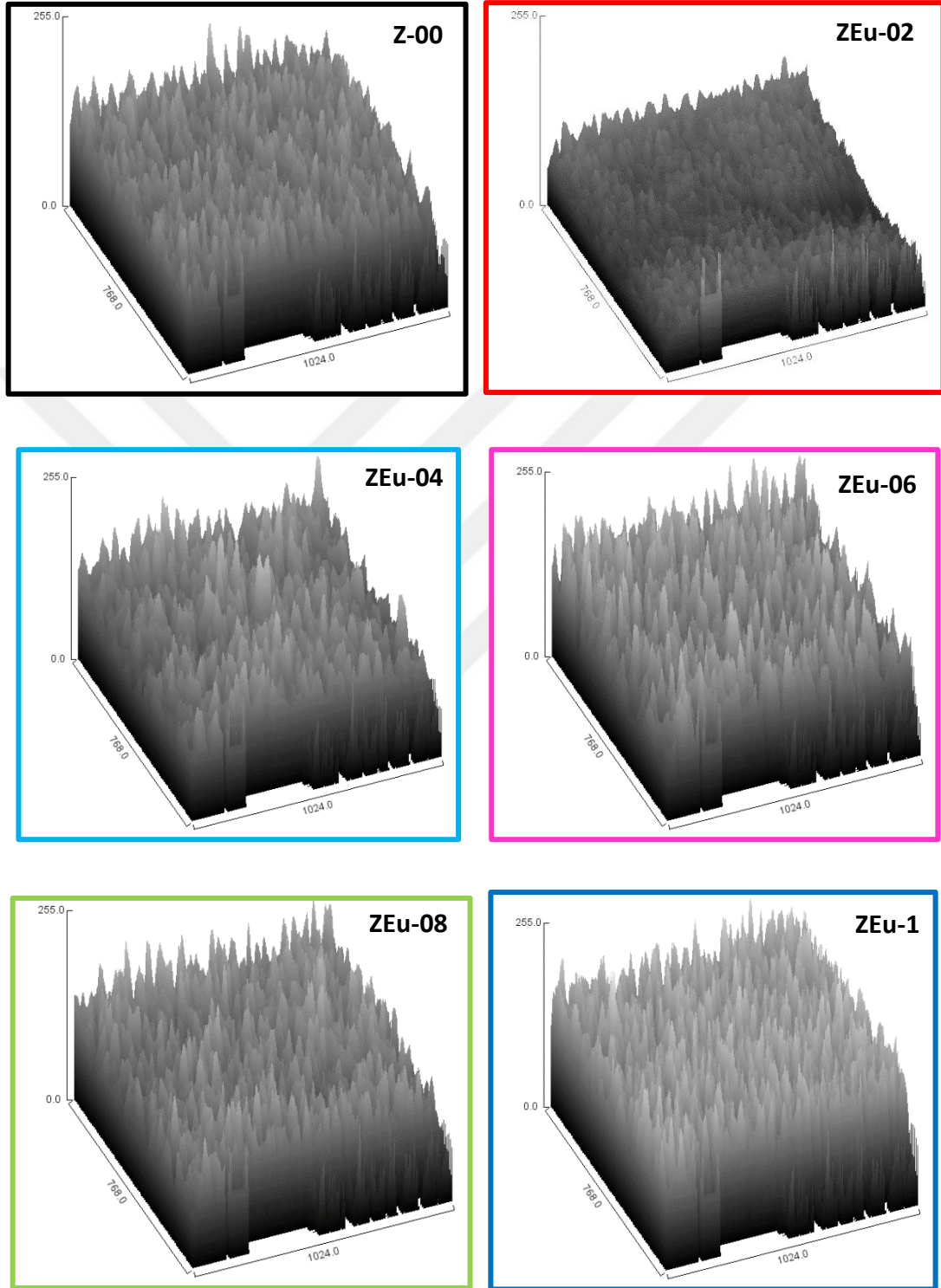
Şekil 4.9'daki SEM görüntülerinden, elde edilen bütün filmlerin yüzeylerinin nanoyapılı dairesel tanelerden oluştuğu daha belirgin olarak görülmektedir. Diğer bir deyişle, Eu katkısı ile ZnO filminin yüzeyini oluşturan nanotanelerin dairesel yapısının değişmediği, ancak tane boyutlarının değiştiği gözlenmiştir. Bu durum literatür ile uyumludur [24, 26].



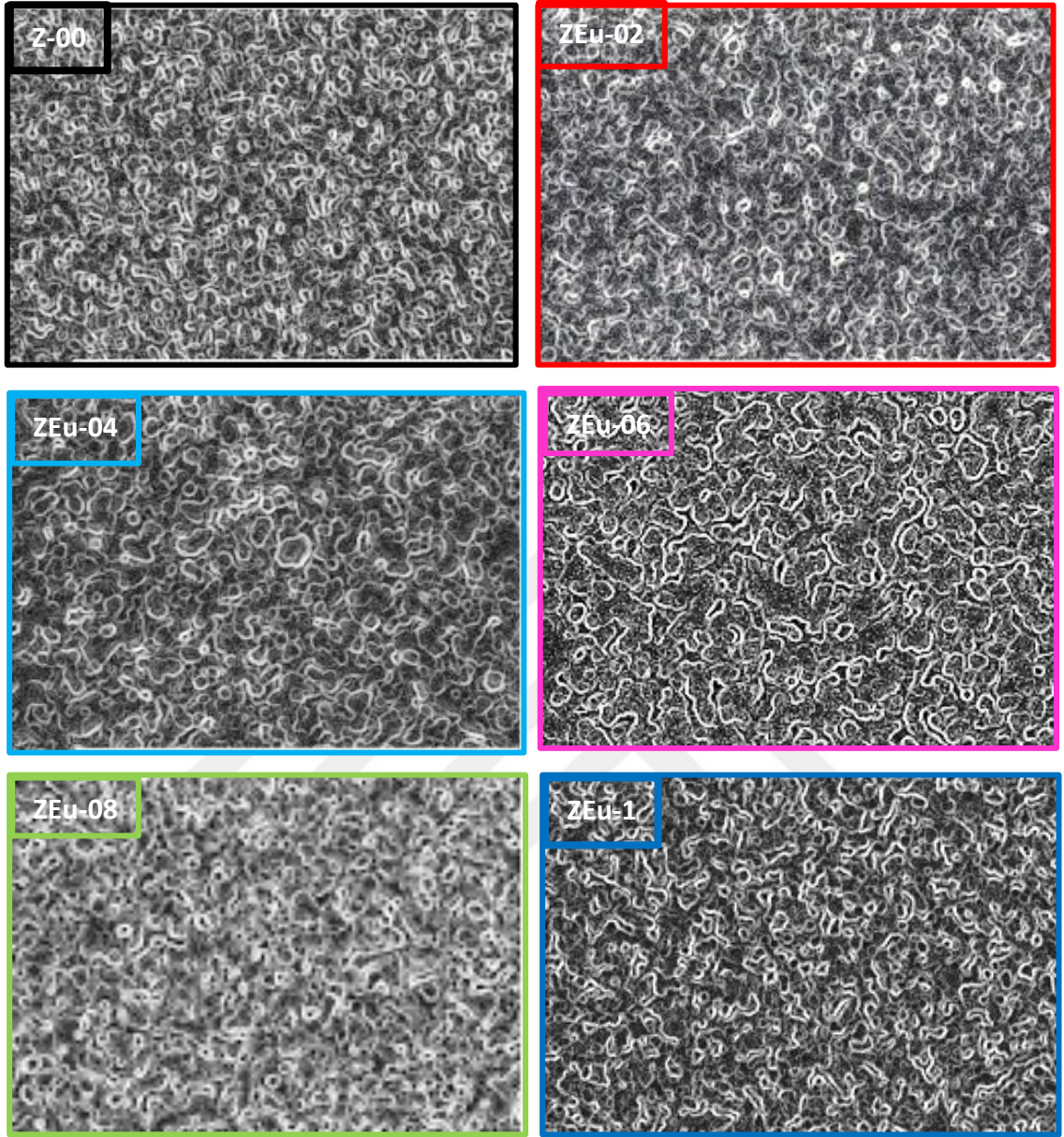
Şekil 4.9. Katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerine ait x200k büyütme oranındaki SEM görüntüleri

Katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerinin yüksek büyütmede çekilen (x200k) SEM görüntüleri ImageJ analiz programı yardımıyla analiz edilerek $\bar{D}$ değerleri hesaplanmış ve bu değerler Tablo 4.5'te verilmiştir. En büyük ortalama tane boyutu ZEu-02 filmine aittir. ZnO filmine Eu katkılanması ile tane boyutu önce artmış, katkı miktarının daha da

artmasıyla tane boyutları küçülmüş yani, yapıda bozulmalar olmaya başlamıştır. Bu durum XRD sonuçları ile uyumludur.



Şekil 4.10. Katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerine ait yüzey haritaları (x200k büyütme oranında çekilen SEM görüntüleri kullanılmıştır)



Şekil 4.11. Katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerinin tane sınırları ($\times 200k$ büyütme oranında çekilen SEM görüntüleri kullanılmıştır)

Şekil 4.10’da katkısız ve farklı oranlarda Eu katkılı ZnO filmlerinin yüzey haritaları 8bit gri ölçekte verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere, yüzey pürüzlülük oranları değişmiştir. ImageJ analiz programı yardımıyla hesaplanan yükseltelerin ortalama $\bar{Y}$ değerleri Tablo 4.5’te verilmiştir. En küçük pürüzlülüğe sahip olan film ZEu-02 filmi ($\bar{Y}=59,7$) olup, diğer filmlerde bu değerin çok daha büyük olduğu görülmektedir.

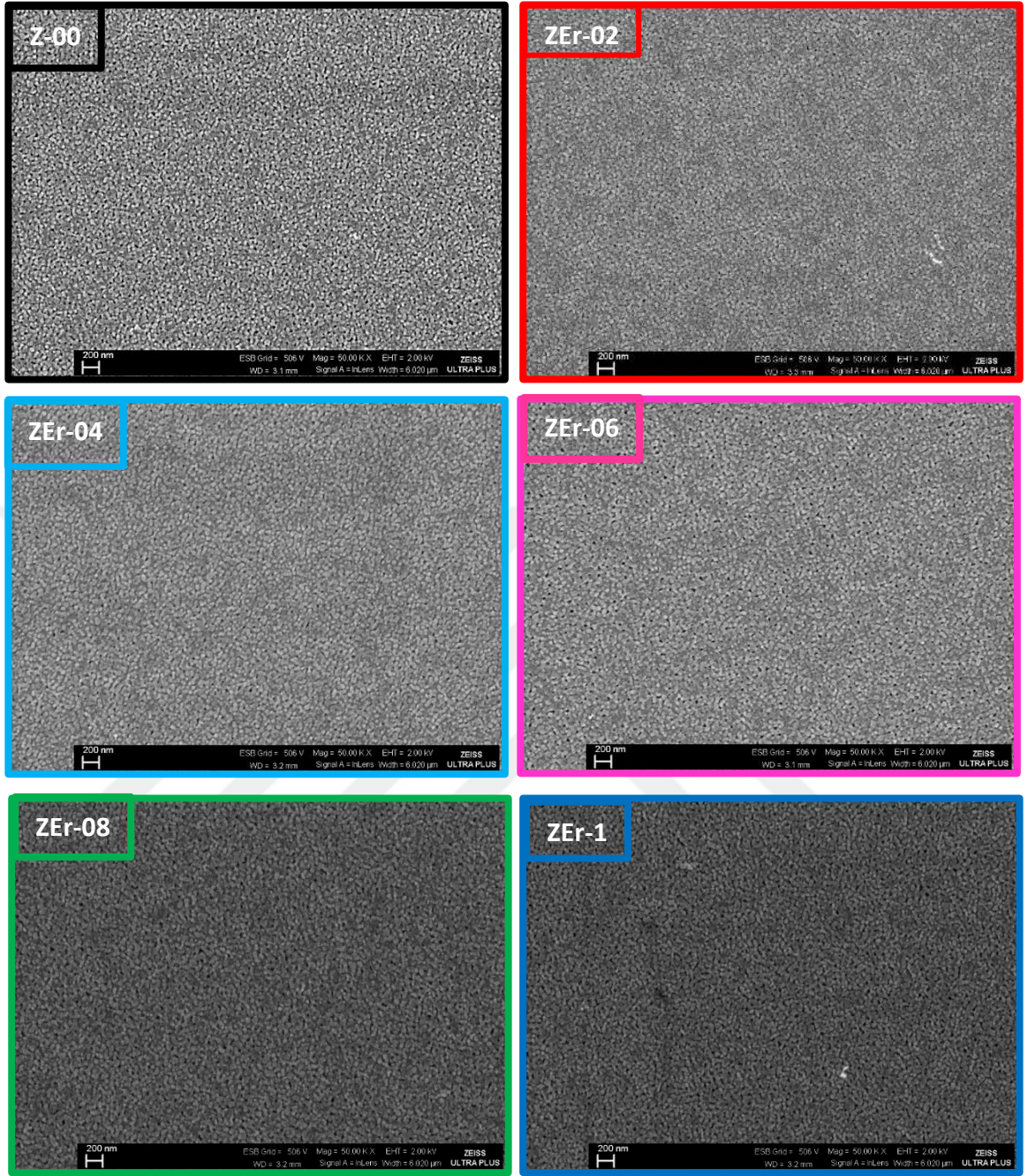
Şekil 4.11’de katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerinin tane sınırları verilmiştir. Film yüzeyindeki tanelerin benzer yapıda olduğu ve tane sınırlarının çok belirgin olduğu göze çarpmaktadır. Ayrıca, tane sınırlarının boyutlarının değiştiği görülmektedir.

Tablo 4.5. Elde edilen katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerinin ortalama tane boyutları ve ortalama yükselti değerleri

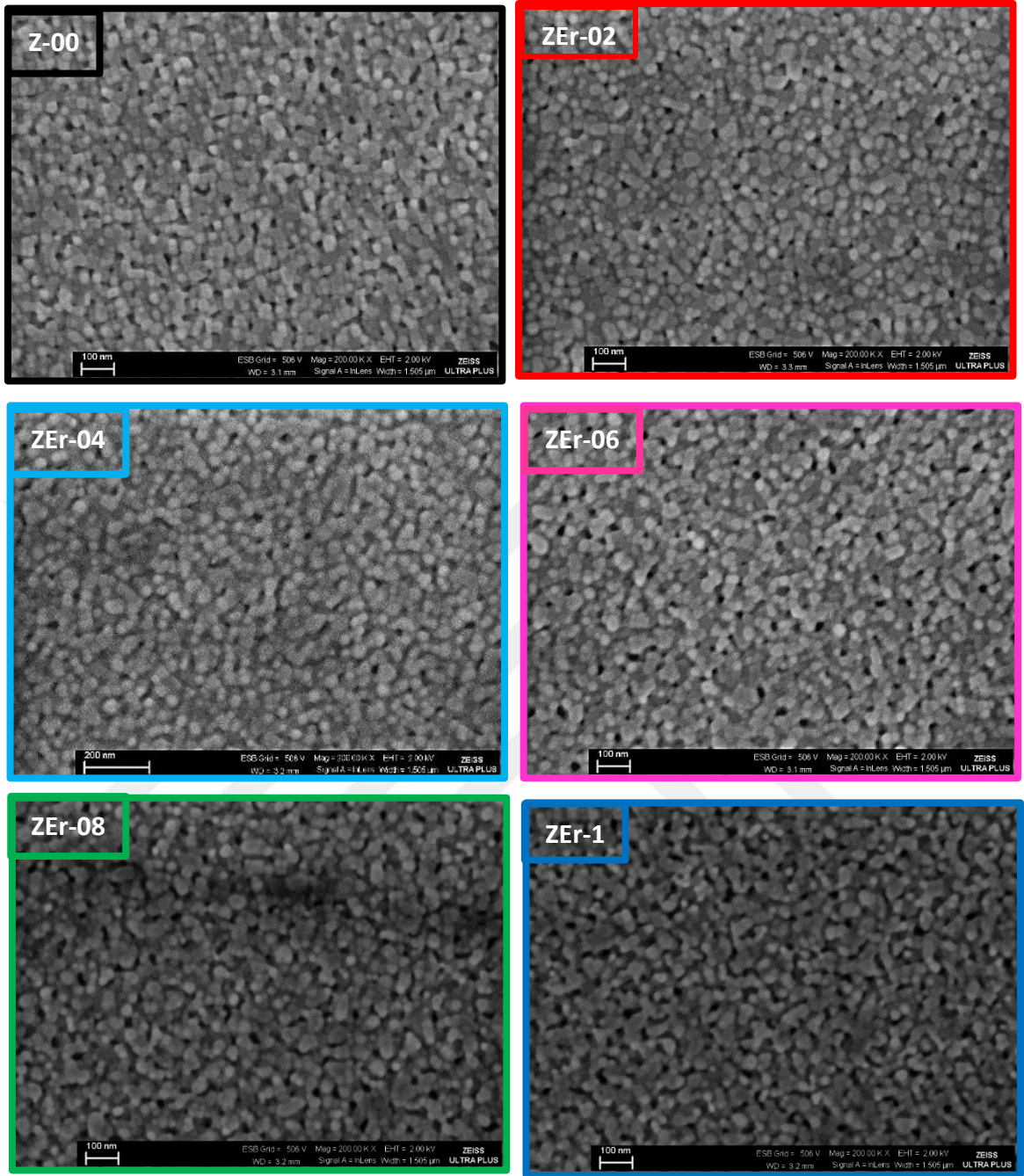
Film kodu	$\bar{D}$ (nm)	$\bar{Y}$
Z-00	21,3	106,4
ZEu-02	28,4	59,7
ZEu-04	27,1	108,3
ZEu-06	25,9	110,1
ZEu-08	24,0	107,8
ZEu-1	22,4	128,3

4.2.3. Katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerinin morfolojik özellikleri

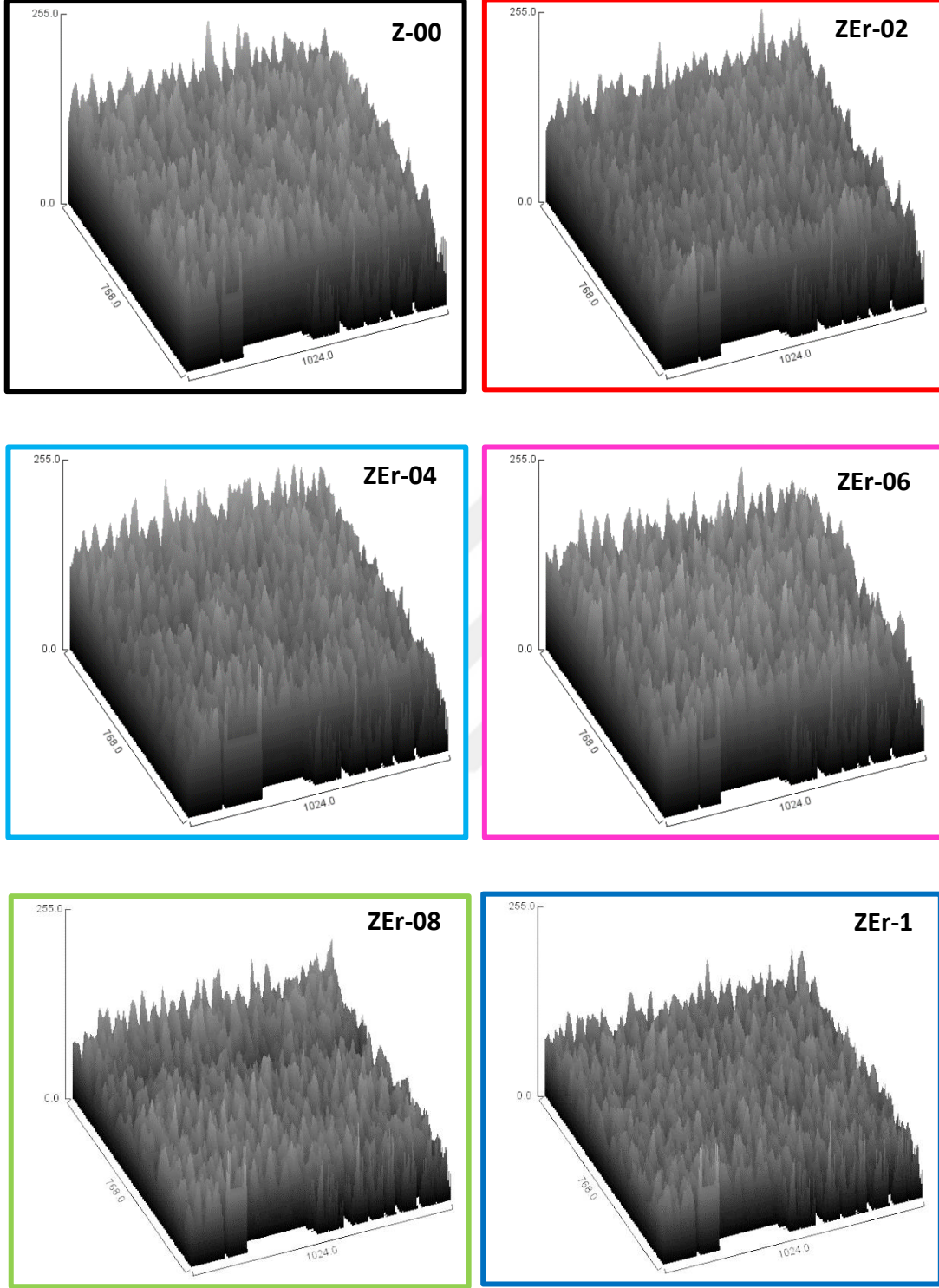
Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’te katkısız ve farklı oranlarda Er katkılı ZnO filmlerinin sırasıyla x50k ve x200k büyütmelemlerde çekilen SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.12’de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde, film yüzeylerinin çatlak, gözenek ve boşluklar oluşmaksızın, düzgün ve homojen olarak sürekli bir yapının olduğu, alttaşın iyi bir şekilde kaplandığı görülmektedir. Şekil 4.13’te verilen SEM görüntülerinden, elde edilen katkısız ve Er katkılı ZnO film yüzeylerinin nanoyapılı dairesel tanelerden olduğu belirgin bir şekilde görülmektedir. Er katkısı ile ZnO filminin yüzeyini oluşturan nanotanelerin dairesel yapısının değişmediği, ancak tane boyutlarının değiştiği gözlenmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda da, bu çalışmada elde edilen katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerinin yüzey morfolojilerine benzer SEM görüntüleri rapor edilmiştir [31, 111].



Şekil 4.12. Katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerine ait x50k büyütme oranındaki SEM görüntüleri



Şekil 4.13. Katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerine ait x200k büyütme oranındaki SEM görüntüleri



Şekil 4.14. Katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerine ait yüzey haritaları (x200k büyütme oranında çekilen SEM görüntüleri kullanılmıştır)

Şekil 4.13'te verilen filmlerin SEM görüntüleri ImageJ analiz programı yardımıyla analiz edilerek $\bar{D}$ değerleri hesaplanmış ve bu değerler Tablo 4.6'da verilmiştir. En büyük ortalama tane boyutu ZEr-02 filmine aittir. ZnO filmine Er katkılanması ile tane boyutu önce artmış, katkı miktarının daha da artmasıyla tane boyutları küçülmüş yani, yapıda bozulmalar olmaya başlamıştır. Bu durum XRD sonuçları ile uyumludur.

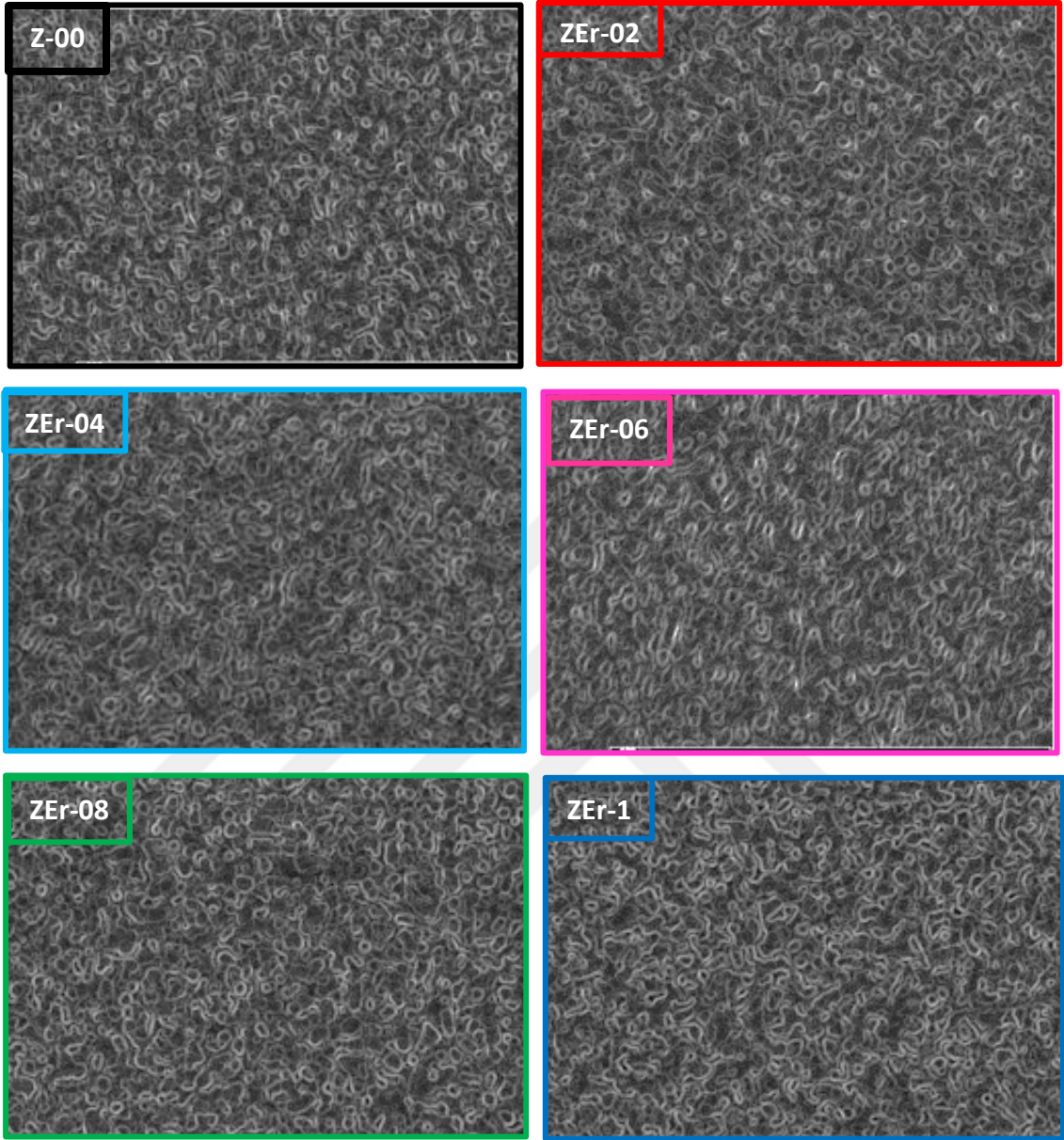
Şekil 3.16'da katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerinin yüzey haritaları verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere, yüzey pürüzlülük oranları değişmiştir. ImageJ analiz programı yardımıyla hesaplanan yükseltelerin ortalama $\bar{Y}$ değerleri Tablo 4.6'da verilmiştir. En küçük pürüzlülüğe sahip olan film ZEr-1 filmi ($\bar{Y}=63,5$) olup, katkıya bağlı bir düzen görülmemiştir.

Tablo 4.6. Elde edilen katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerinin ortalama tane boyutları ve ortalama yükselti değerleri

Film kodu	$\bar{D}$ (nm)	$\bar{Y}$
Z-00	21,3	106,4
ZEr-02	28,2	96,0
ZEr-04	24,0	99,9
ZEr-06	22,8	103,3
ZEr-08	21,0	65,4
ZEr-1	19,3	63,5

Şekil 4.15'te katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerinin tane sınırları verilmiştir. Film yüzeyindeki tanelerin benzer yapıda olduğu ve tane sınırlarının çok belirgin olduğu göze çarpmaktadır. Ayrıca, tane sınırlarının boyutlarının değiştiği görülmektedir.

Kumari ve ark. [31] elde ettikleri Er katkılı ZnO filmlerinin yüzey morfolojilerini SEM görüntülerini çekerek incelemişler, Er katkı miktarının film yüzeyinde değişikliklere sebep olduğunu rapor etmişlerdir. Tane boyutlarının katkı miktarına bağlı olarak 30 nm ile 60 nm arasında değiştiğini ve en büyük tanelerin %0,4 Er katkılı ZnO filminde oluştuğunu ifade etmişlerdir. Katkı konsantrasyonun daha fazla artışı ile birlikte yapıda bozulmalar olduğunu ve tane boyutunun küçülmeye başladığını gözlemlemişlerdir.



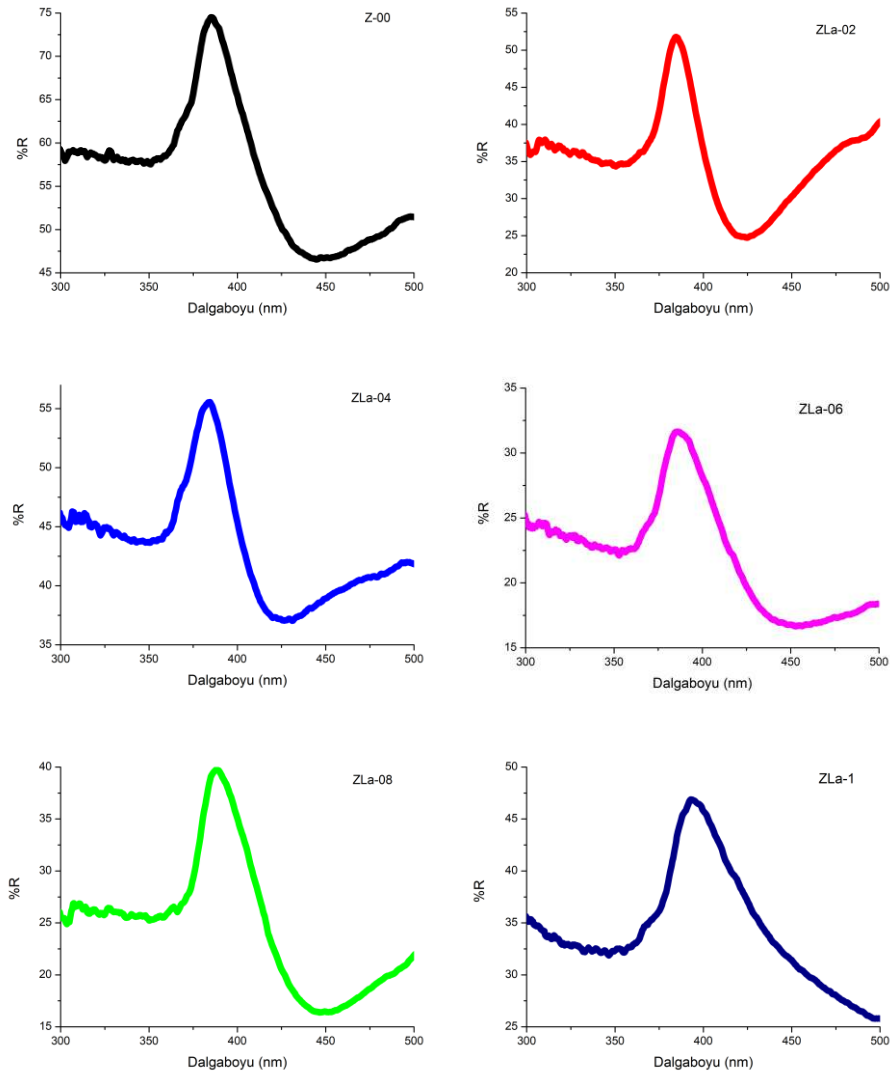
Şekil 4.15. Katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerinin tane sınırları (x200k büyütme oranında çekilen SEM görüntüleri kullanılmıştır)

4.3. Katkısız ve La, Eu, Er Katkılı ZnO Filmlerinin Optik Özellikleri

Tez çalışmasının bu bölümünde katkısız ve farklı oranlarda La, Eu ve Er katkısı ile elde edilen ZnO filmlerinin optik özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Elde edilen opak filmlerin çekilen difüz yansımalar spektrumları kullanılarak, “diferansiyel yansımalar” ve “Kubelka-Munk teorisi” kullanılarak iki farklı yöntemle filmlerin E_g optik band aralıkları hesaplanmış ve bölüm içinde ayrıntılı olarak bu hesaplamalara yer verilmiştir.

4.3.1. Katkısız ve La katkılı ZnO filmlerinin optik özellikleri

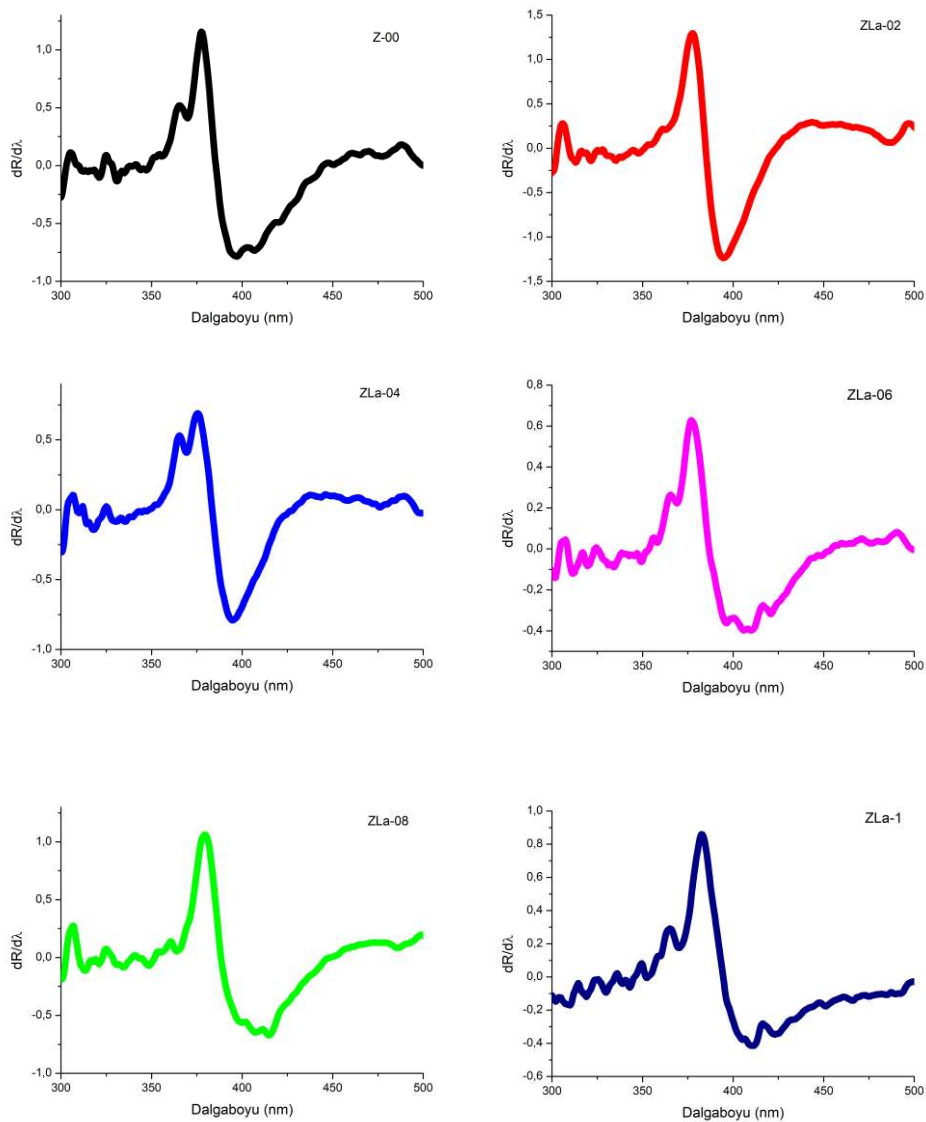
Katkısız ve farklı oranlarda La katkısı ile elde edilen ZnO filmlerinin E_g değerlerini belirleyebilmek için difüz yansımalar spektrumlarından yararlanılmıştır. Katkısız ve farklı oranlarda La katkılı ZnO filmlerinin 300-500nm aralığındaki difüz yansımalar spektrumları Şekil 4.16’da verilmiştir.



Şekil 4.16. Katkısız ve farklı oranlarda La katkılı ZnO filmlerinin difüz yansımalar spektrumları

Filmlerin difüz yansımaya spektrumları incelendiğinde, 350-450nm dalgaboyu aralığında geniş bir pik göze çarpmaktadır. Pikin pozisyonu La katkısı ile değişmektedir. Bu da filmlerin optik band aralıklarının La katkı miktarı ile değiştiğini göstermektedir. Ayrıca katkı ile beraber filmlerin maksimum yansımaya değerleri de %35 ile %75 arasında değişim göstermiştir.

Elde edilen filmlerin E_g değerini belirleyebilmek için kullanılan diferansiyel yansımaya yönteminde, diffüz yansımaya spektrumunun dalgaboyuna karşı birinci türevi ($dR/d\lambda$) alınmıştır. Elde edilen bu türev değerleri ile dalgaboyuna karşılık bir grafik çizilmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. Katkısız ve farklı oranlarda La katkılı ZnO filmlerinin dalgaboyuna karşı çizilen $dR/d\lambda$ grafikleri

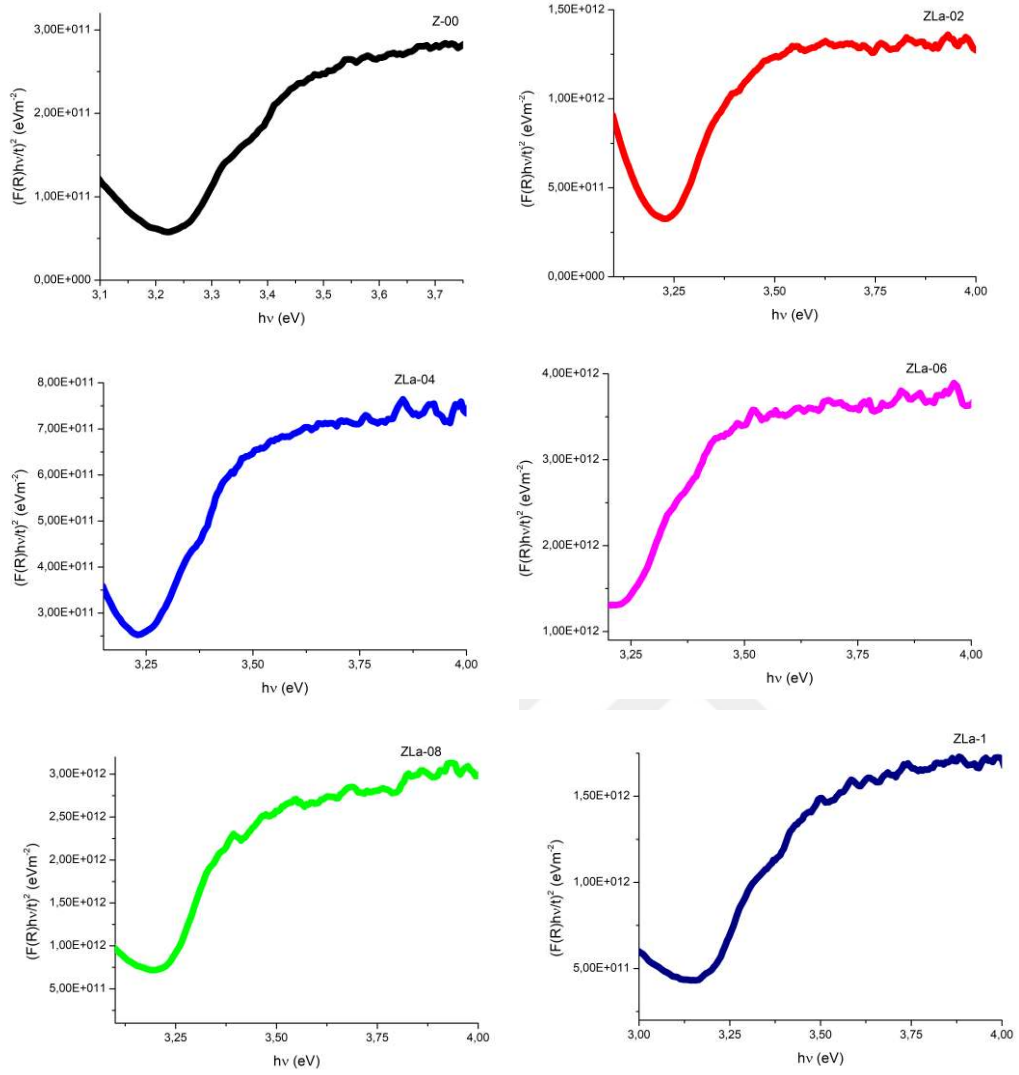
Şekil 4.17'deki eğrilerin maksimum noktalarına karşılık gelen dalgaboyu değerleri sırasıyla 378,0nm, 377,5nm, 375,5nm, 377,0nm, 379,5nm, 382,5nm'dir. Bu dalgaboylarına karşılık gelen enerji değerleri de o filmin E_g değerine karşı gelmektedir. Elde edilen katkısız ve La katkılı ZnO filmleri için E_g değerleri Denklem (2.29) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.7. Elde edilen katkısız ve La katkılı ZnO filmlerinin diferansiyel yansıma ve Kubelka-Munk teorisi kullanılarak hesaplanan E_g değerleri

Film kodu	E_g (eV) $dR/d\lambda$	E_g (eV) Kubelka-Munk
Z-00	3,286	3,213
ZLa-02	3,290	3,239
ZLa-04	3,308	3,263
ZLa-06	3,294	3,250
ZLa-08	3,273	3,196
ZLa-1	3,247	3,173

Spektrumlardaki yansıma değerleri, Denklem (2.30) ile verilen $F(R)$ Kubelka-Munk fonksiyonu yardımıyla absorpsiyon değerlerine dönüştürülmüştür. Elde edilen bu değerler kullanılarak Denklem (2.31) ile katkısız ve La katkılı ZnO filmlerinin E_g değerlerini belirleyebilmek için $(F(R)h\nu)/t^2 - h\nu$ grafiği (Kubelka-Munk grafikleri) çizilmiş ve Şekil 4.18'de verilmiştir. Bu eğriler ekstrapole edilerek, doğrusal kısımların $h\nu$ eksenini kestiği noktadan E_g değerleri hesaplanmış ve Tablo 4.7'de verilmiştir.

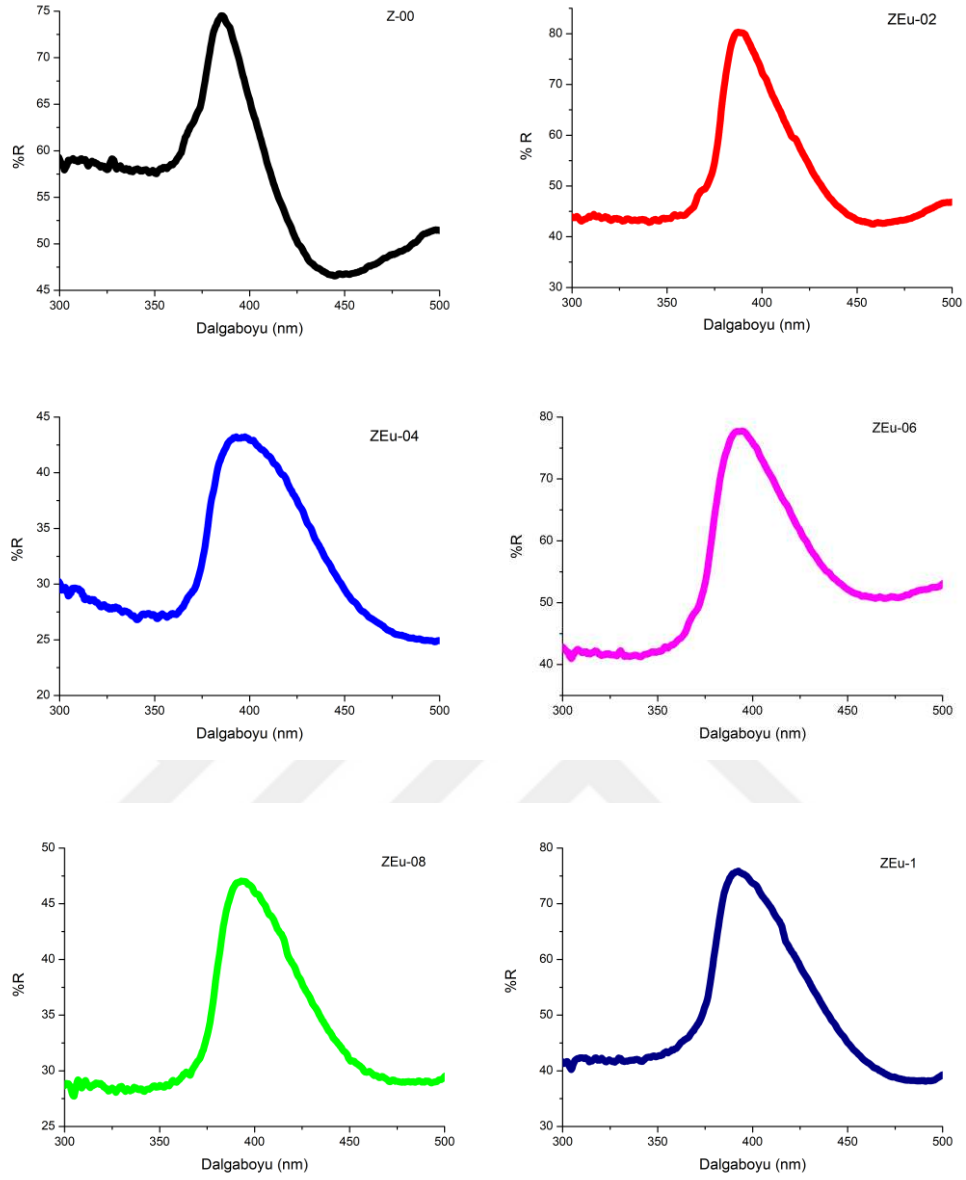
Her iki yöntemle de hesaplanan E_g değerleri incelendiğinde katkı ile beraber E_g değerinin önce arttığı (22meV, 61meV), daha sonra yeniden azaldığı (50meV, 90meV) görülmüştür. Her iki yöntemde de ZLa-04 filmi en yüksek E_g değerine sahip filmidir. En küçük E_g değeri, en yüksek La katkısı yapılan ZnO filmde (ZLa-1) elde edilmiştir. Bu azalmanın nedeni, katkı atomlarının optik band aralığı içine yerleşerek, bant kuyruklarının oluşmasına sebep olmasına atfedilebilir. Elde edilen E_g değerleri literatür ile uyum içerisinde [112, 113].



Şekil 4.18. Katkısız ve farklı oranlarda La katkılı ZnO filmlerinin Kubelka-Munk grafikleri

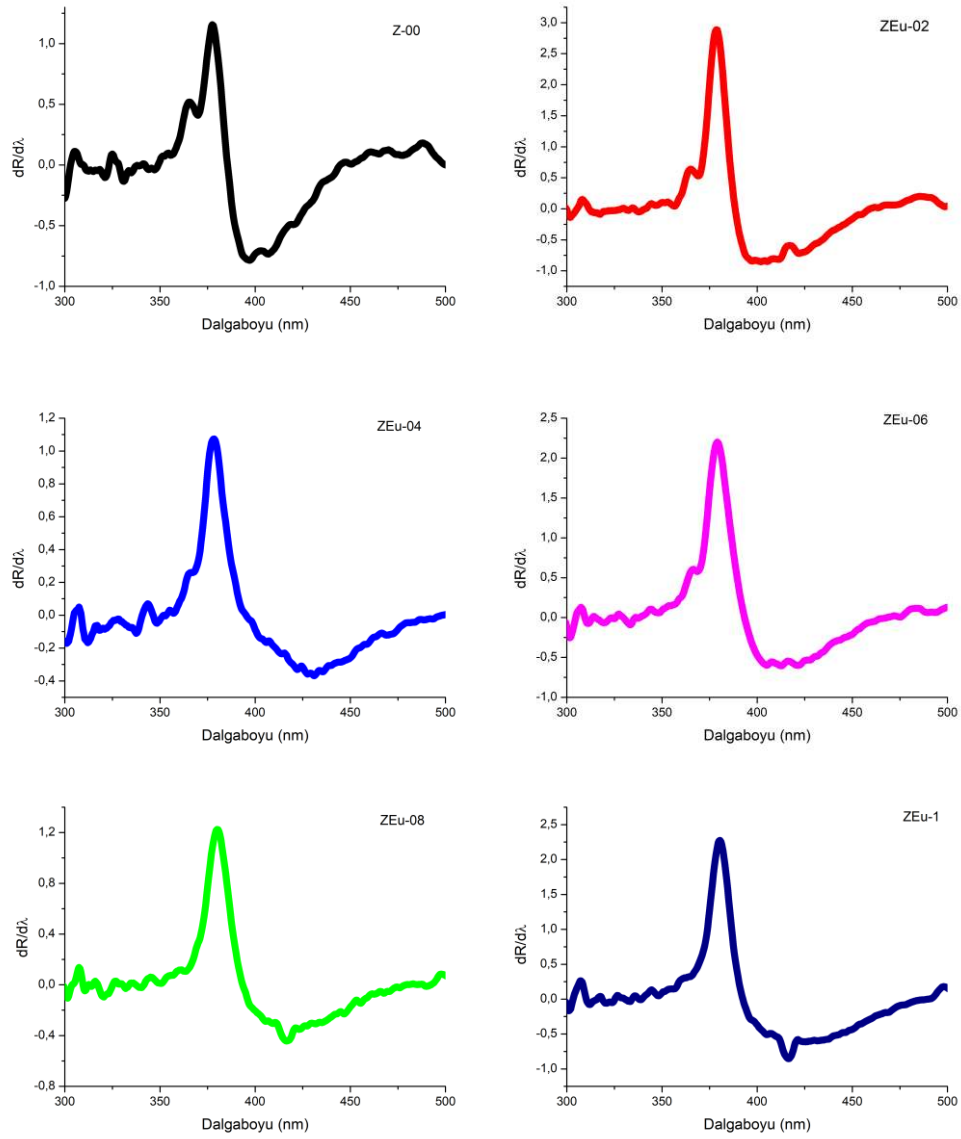
4.3.2. Katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerinin optik özellikleri

Katkısız ve farklı oranlarda Eu katkılı ZnO filmlerinin difüz yansım spekturumları Şekil 4.19’da verilmiştir. Filmlerin yansım spekturumları incelendiğinde 350-450nm dalga boylarında yayvan bir pik göze çarpmaktadır. Piken pozisyonunun Eu katkı miktarı ile değiştiği görülmektedir. Ayrıca katkı ile beraber yansım piklerinin maksimum değerleri %45 ile %80 arasında değişim göstermektedir.



Şekil 4.19. Katkısız ve farklı oranlarda Eu katkılı ZnO filmlerinin difüz yansıma spektrumları

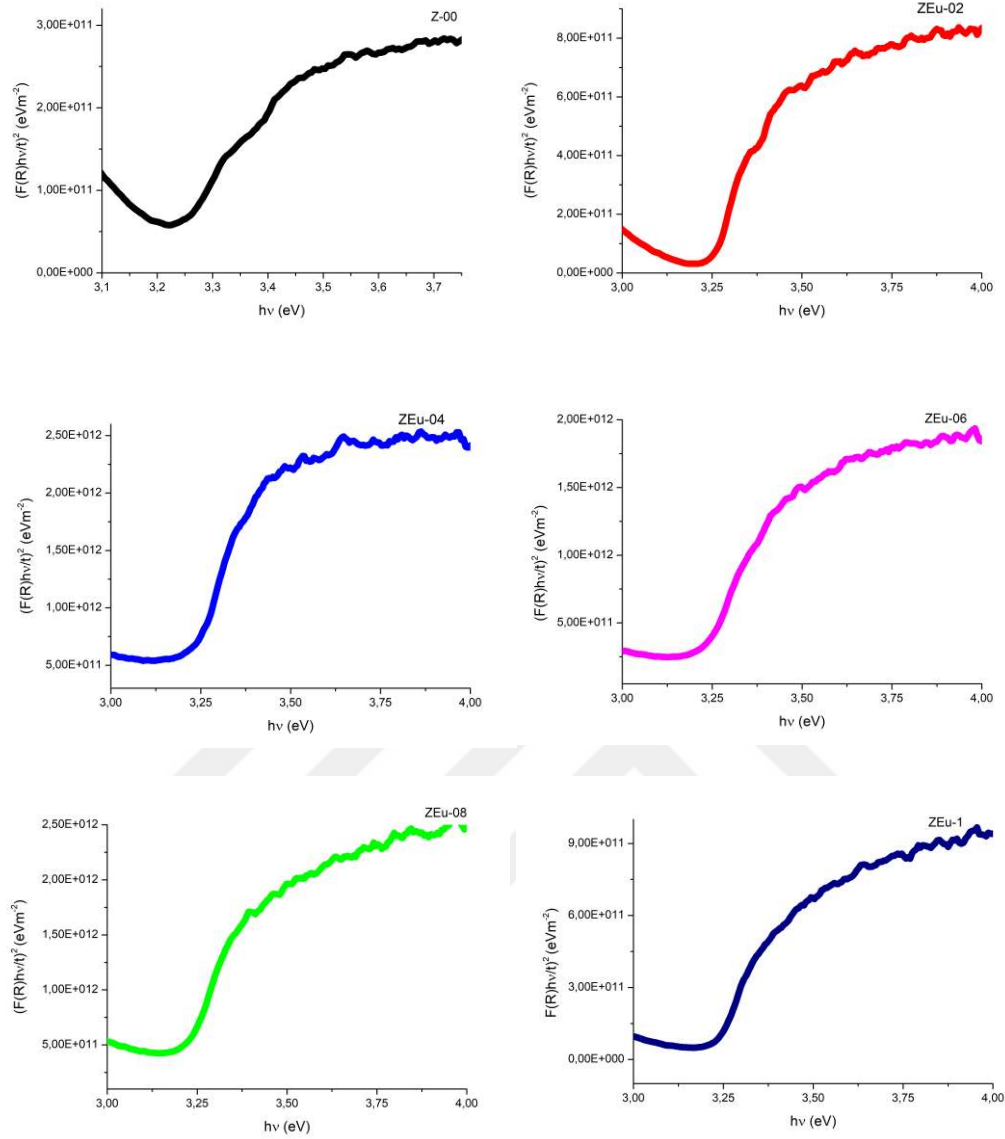
Katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerinin difüz yansıma spektrumlarının dalgaboyuna göre birinci türevleri ($dR/d\lambda$) alınmış ve $dR/d\lambda - \lambda$ grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.20). Bu eğrilerin maksimum noktalarına karşılık gelen dalgaboyu değerleri sırasıyla 378nm, 378,5nm, 378,5nm, 379nm, 380nm, 380,5nm'dir. Elde edilen katkısız ve Eu katkılı ZnO filmleri için E_g değerleri Denklem (2.29) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 4.8'de verilmiştir. Hesaplanan E_g değerlerinin katkı ile beraber azaldığı görülmektedir. Optik band aralığındaki daralma miktarı toplam 22meV değerindedir.



Şekil 4.20. Katkısız ve farklı oranlarda Eu katkılı ZnO filmlerinin dalgaboyuna karşı çizilen $dR/d\lambda$ grafikleri

Tablo 4.8. Elde edilen katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerinin diferansiyel yansıma ve Kubelka-Munk teorisi kullanılarak hesaplanan E_g değerleri

Film kodu	E_g (eV) $dR/d\lambda$	E_g (eV) Kubelka-Munk
Z-00	3,286	3,213
ZEu-02	3,281	3,243
ZEu-04	3,281	3,220
ZEu-06	3,277	3,205
ZEu-08	3,268	3,198
ZEu-1	3,264	3,176

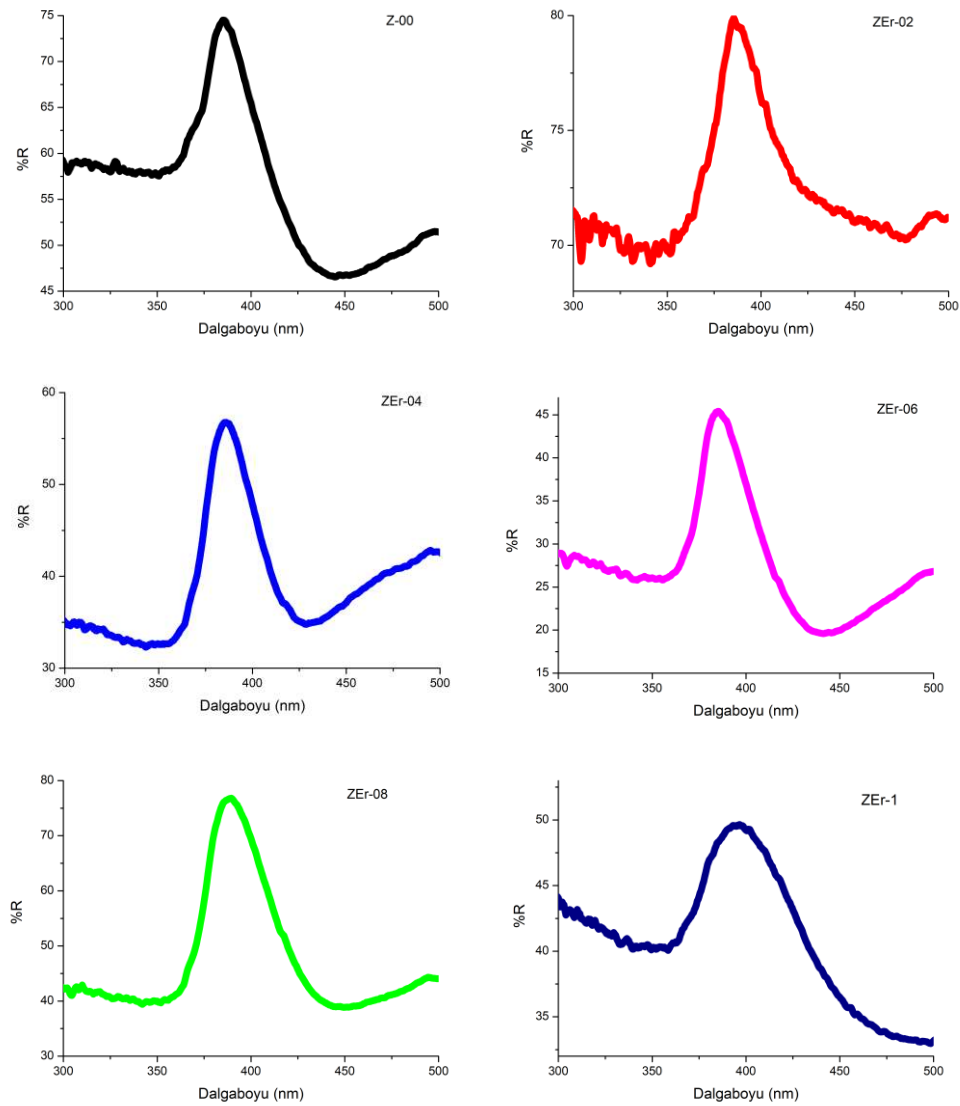


Şekil 4.21. Katkısız ve farklı oranlarda Eu katkılı ZnO filmlerinin Kubelka-Munk grafikleri

Denklem (2.30) ile verilen Kubelka-Munk fonksiyonu yardımıyla difüz yansıma değerleri absorpsiyon değerlerine dönüştürülmüştür. Elde edilen bu değerler kullanılarak Denklem (2.31) ile katkısız ve Eu katkılı ZnO filmlerinin E_g değerlerini belirleyebilmek için $(F(R)hv/t)^2 - h\nu$ grafiği çizilmiş ve Şekil 4.21’de verilmiştir. Bu eğriler ekstrapole edilerek, doğrusal kısımların $h\nu$ eksenini kestiği noktadan E_g değerleri hesaplanmış ve Tablo 4.8’de verilmiştir. Hesaplanan E_g değerlerinin katkı ile beraber önce arttığı (30meV), sonra yeniden azaldığı (67meV) görülmektedir.

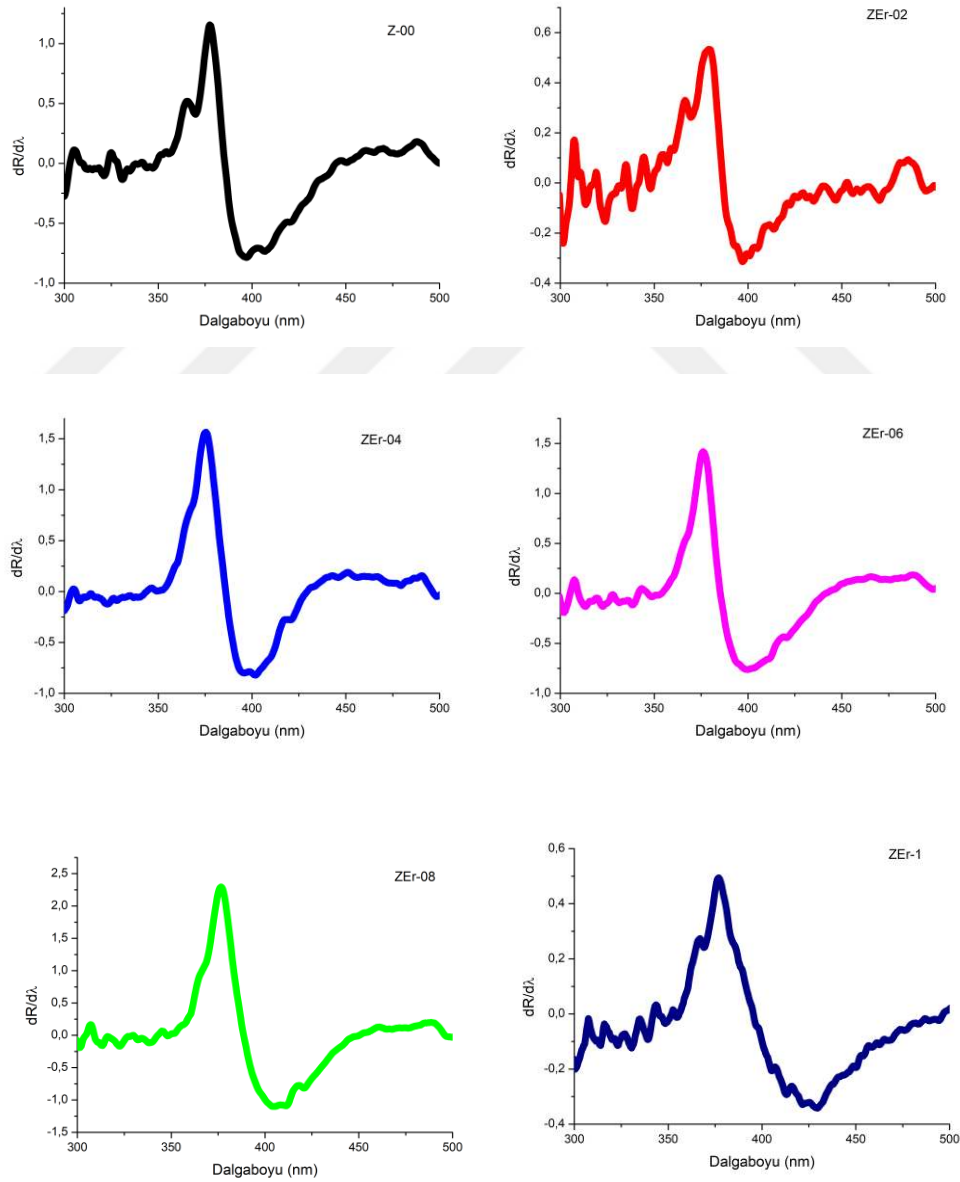
4.3.3. Katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerinin optik özellikleri

Katkısız ve farklı oranlarda Er katkılı ZnO filmlerinin difüz yansıma spektrumları Şekil 4.22’de verilmiştir. Filmlerin yansıma spektrumlarında 350-450nm dalgaboylarında yayvan bir pik göze çarpmaktadır. Pikin pozisyonu Er katkısı ile değişmektedir. Bu da ZnO filmlerinin optik band aralıklarının Er katkı miktarı ile değiştiğini göstermektedir. Ayrıca katkı miktarı ile yansıma değerlerinin maksimumları da %45 ile %80 arasında değişim göstermektedir.



Şekil 4.22. Katkısız ve farklı oranlarda Er katkılı ZnO filmlerinin difüz yansıma spektrumları

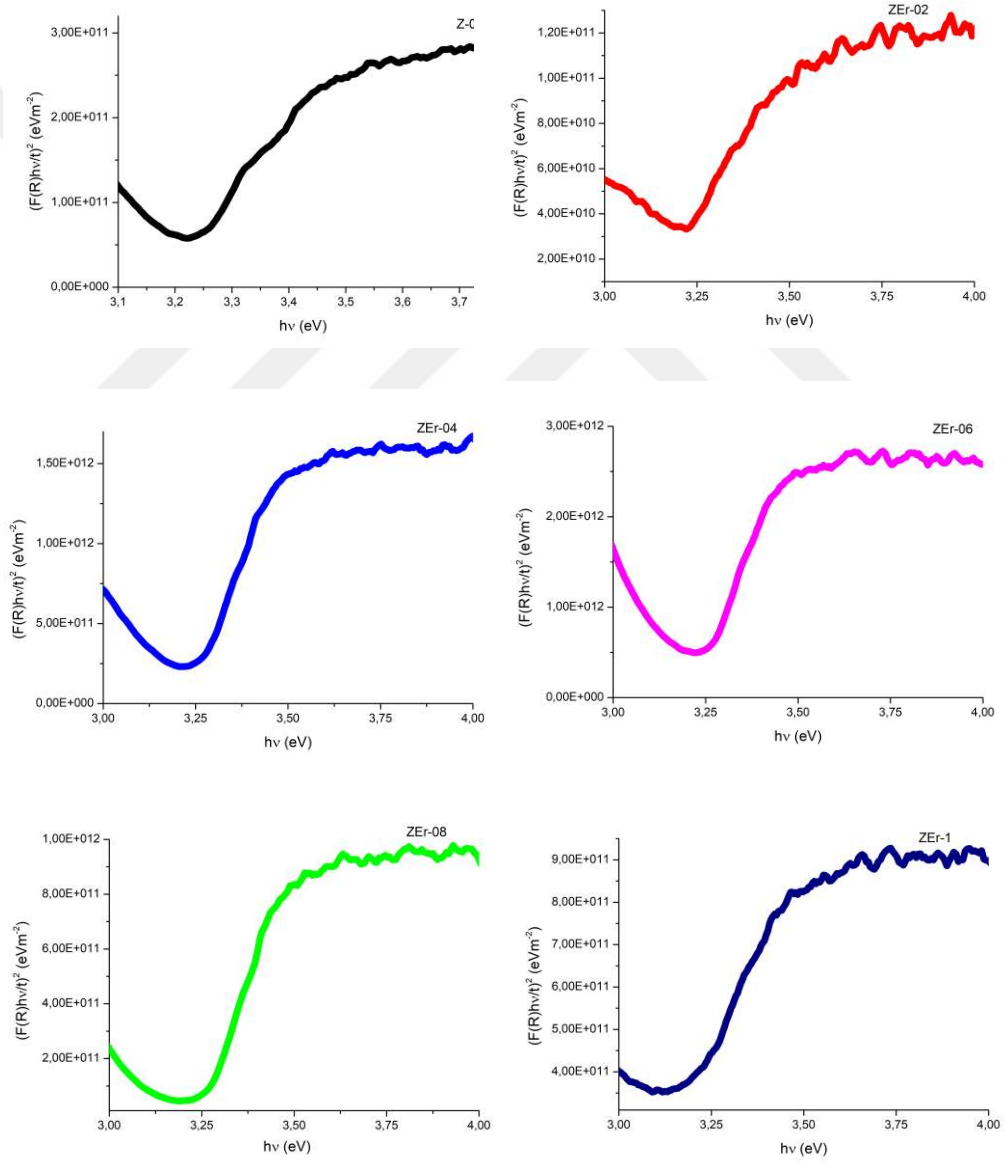
Elde edilen filmlerin E_g değerini belirleyebilmek için kullanılan diferansiyel yansıma yönteminde, diffüz yansıma spektrumunun dalgaboyuna karşı birinci türevi ($dR/d\lambda$) alınmıştır. Elde edilen bu türev değerleri ile dalgaboyuna karşılık bir grafik çizilmiştir (Şekil 4.23). Bu eğrilerin maksimum noktalarına karşılık gelen dalgaboyu değerleri sırasıyla 378nm, 379nm, 375,5nm, 376nm, 376,5nm, 377nm'dir. Bu dalgaboylarına karşılık gelen enerji değerleri Denklem (2.29) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 4.9'da verilmiştir. Hesaplanan E_g değerlerinin katkı ile düzensiz bir şekilde azalıp arttığı görülmektedir. En yüksek E_g değerine sahip film ZEr-04 filmidir.



Şekil 4.23. Katkısız ve farklı oranlarda Er katkılı ZnO filmlerinin dalgaboyuna karşı çizilen $dR/d\lambda$ grafikleri

Tablo 4.9. Elde edilen katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerinin diferansiyel yansıma ve Kubelka-Munk teorisi kullanılarak hesaplanan E_g değerleri

Film kodu	E_g (eV) $dR/d\lambda$	E_g (eV) Kubelka-Munk
Z-00	3,286	3,213
ZEr-02	3,277	3,217
ZEr-04	3,308	3,269
ZEr-06	3,303	3,233
ZEr-08	3,299	3,256
ZEr-1	3,294	3,221



Şekil 4.24. Katkısız ve farklı oranlarda Er katkılı ZnO filmlerinin Kubelka-Munk grafikleri

Diğer yöntemde ise, Denklem (2.30) ile verilen Kubelka-Munk fonksiyonu yardımıyla difüz yansıma değerleri absorpsiyon değerlerine dönüştürülmüştür. Elde edilen bu değerler kullanılarak Denklem (2.31) ile katkısız ve Er katkılı ZnO filmlerinin E_g değerlerini belirleyebilmek için $(F(R)hv)/t^2 - hv$ grafiği çizilmiş ve Şekil 4.24’de verilmiştir. Bu eğriler ekstrapole edilerek, doğrusal kısımların hv eksenini kestiği noktadan E_g değerleri hesaplanmış ve bu değerler Tablo 4.9’da verilmiştir. Hesaplanan E_g değerlerinin katkı ile düzensiz bir şekilde azalıp arttığı görülmektedir. En yüksek E_g değerine sahip film ZEr-04 filmidir.



4.4. *Au/p-Si/n-ZnO/Al*, *Au/p-Si/n-ZnO:La/Al*, *Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al* ve *Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al* Heteroeklem Diyotlarının Elektriksel Karakterizasyonları

Tez çalışmasının bu bölümünde -2V ile +2V aralığında I - V ölçümleri alınan *Au/p-Si/n-ZnO/Al*, *Au/p-Si/n-ZnO:La/Al*, *Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al* ve *Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al* heteroeklem diyotlarının elektriksel özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Öncelikle, tüm diyotlar için üst metal elektrot (Al) ile ZnO arasında omik kontak kontrolü yapılmış ve I - V eğrilerinin lineer davranış sergilediği yani üst kontağın omik olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Bkz. Şekil 3.2). I - V ölçüm verileri kullanılarak idealite faktörü (n), engel yüksekliği (ϕ_b) ve seri direnç (R_s) gibi diyot parametreleri, geleneksel termiyonik (TE) teori, Cheung fonksiyonları ve Norde metodu kullanılarak hesaplanmış ve detaylı olarak karşılaştırılması yapılmıştır. Ayrıca bu heteroeklem diyotların farklı aydınlatma şiddetlerinde (20-100mW/cm²) I - V ölçümleri alınmış ve veriler analiz edilmiştir.

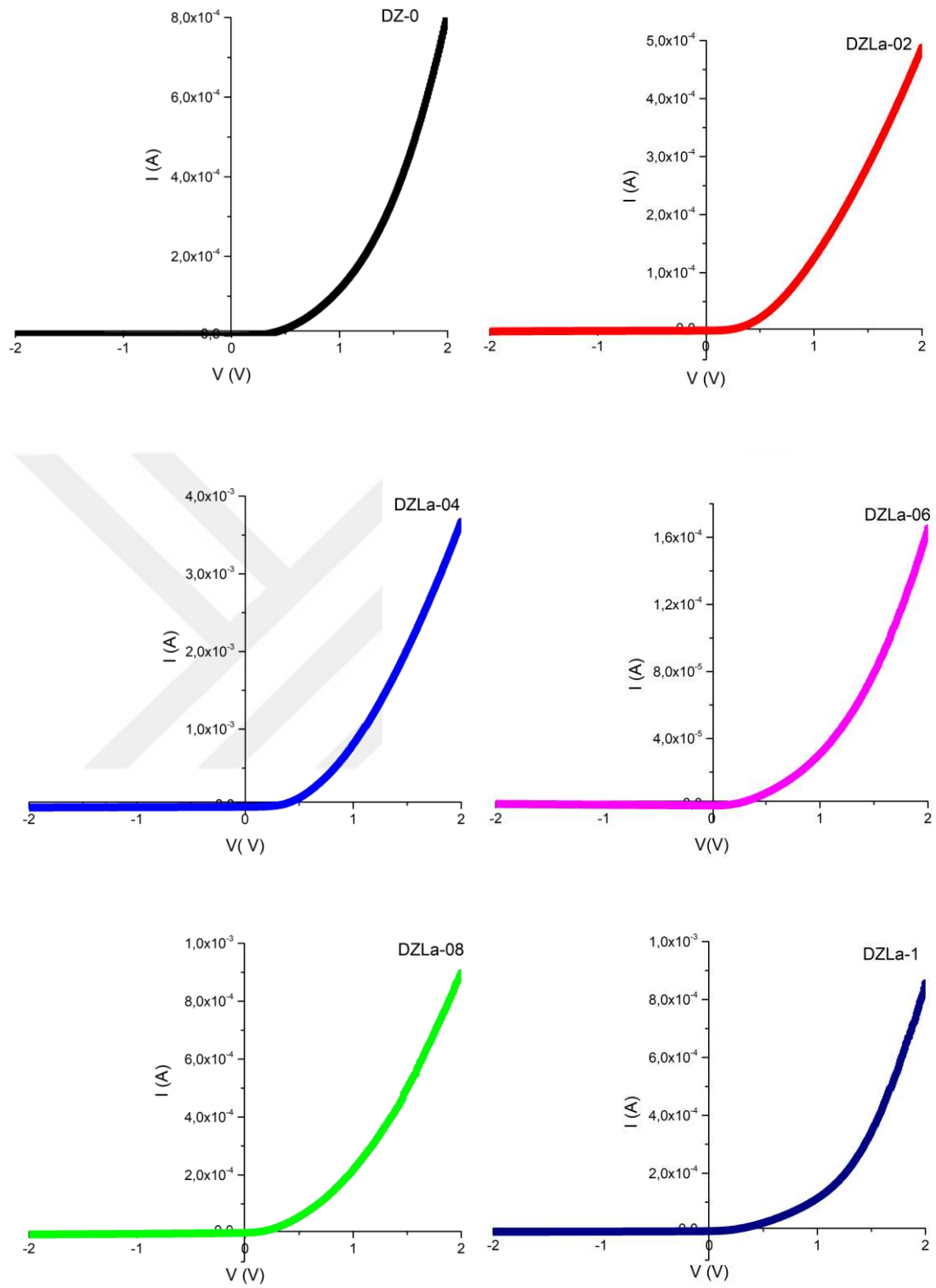
4.4.1. *Au/p-Si/n-ZnO:La/Al* heteroeklem diyotlarının I - V grafikleri ve diyot parametreleri

Fabrikasyonu yapılan *Au/p-Si/n-ZnO:La/Al* heteroeklem diyotlarının I - V grafikleri Şekil 4.25’de verilmiştir. Bu grafiklere göre, p - n heteroeklemleri doğrultucu özellik göstermektedir. Bu ölçüm sonuçları kullanılarak farklı yöntemlerle diyot parametreleri hesaplanmıştır.

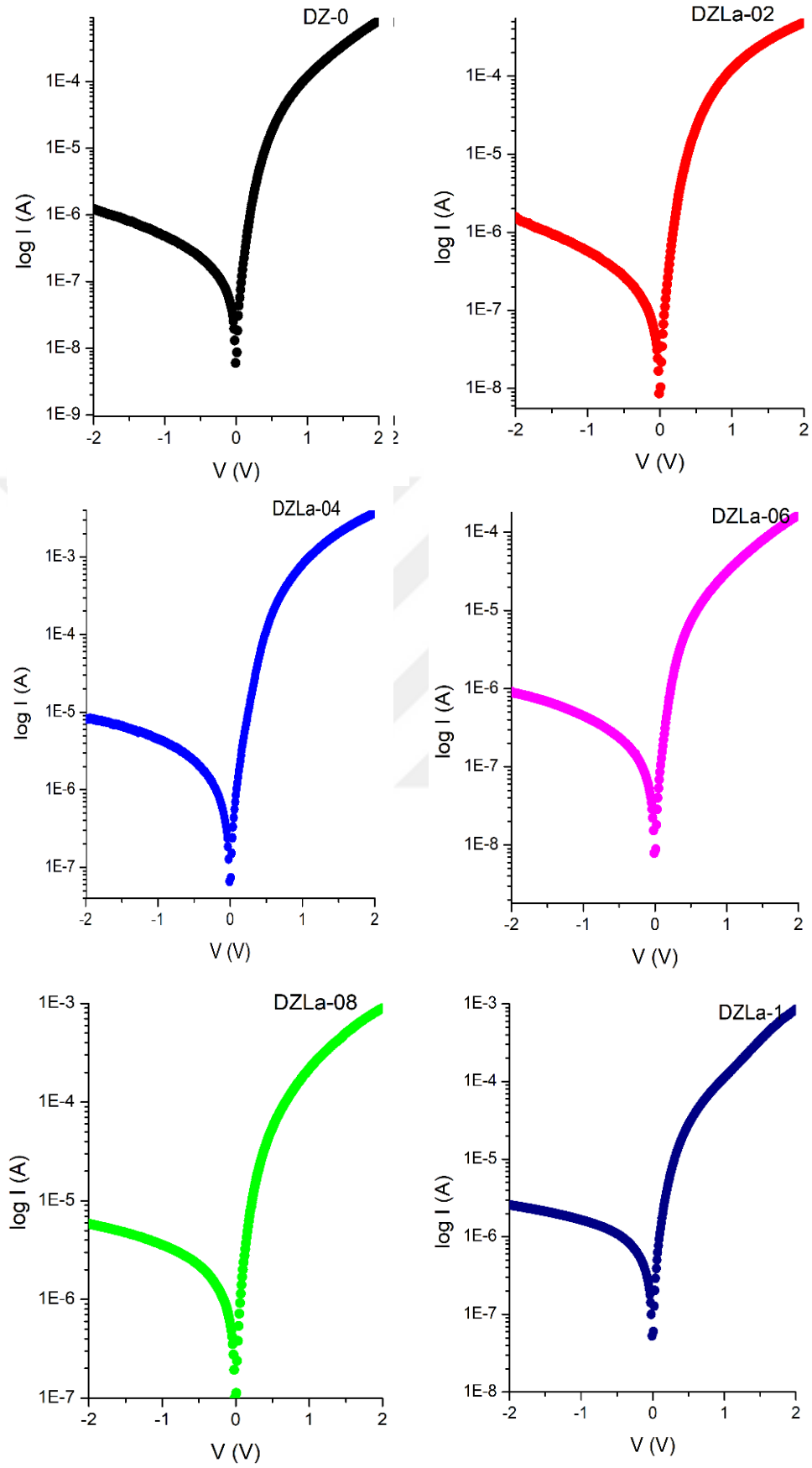
Geleneksel TE teori kullanılarak elde edilen yarılogaritmik I - V grafikleri çizilmiş ve Şekil 4.26’da verilmiştir. Çizilen eğrilerin eğim ve düşey eksen kesim noktası belirlenmiş, diyotların n ve ϕ_b değerleri sırasıyla, Denklem (2.36) ve (2.38) kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu diyot parametreleri Tablo 4.10’da verilmiştir.

Au/p-Si/n-ZnO:La/Al diyotlarının ölçülen I - V verileri kullanılarak Cheung fonksiyonları yardımıyla $dV/d\ln(I)$ - I grafikleri çizilmiş ve bu grafikler Şekil 4.27’de verilmiştir. Bu eğrilerin eğim ve düşey eksen kesim noktalarından, Denklem (2.41) kullanılarak, R_s ve n diyot parametreleri hesaplanmıştır. Hesaplanan parametreler Tablo 4.10’da verilmiştir.

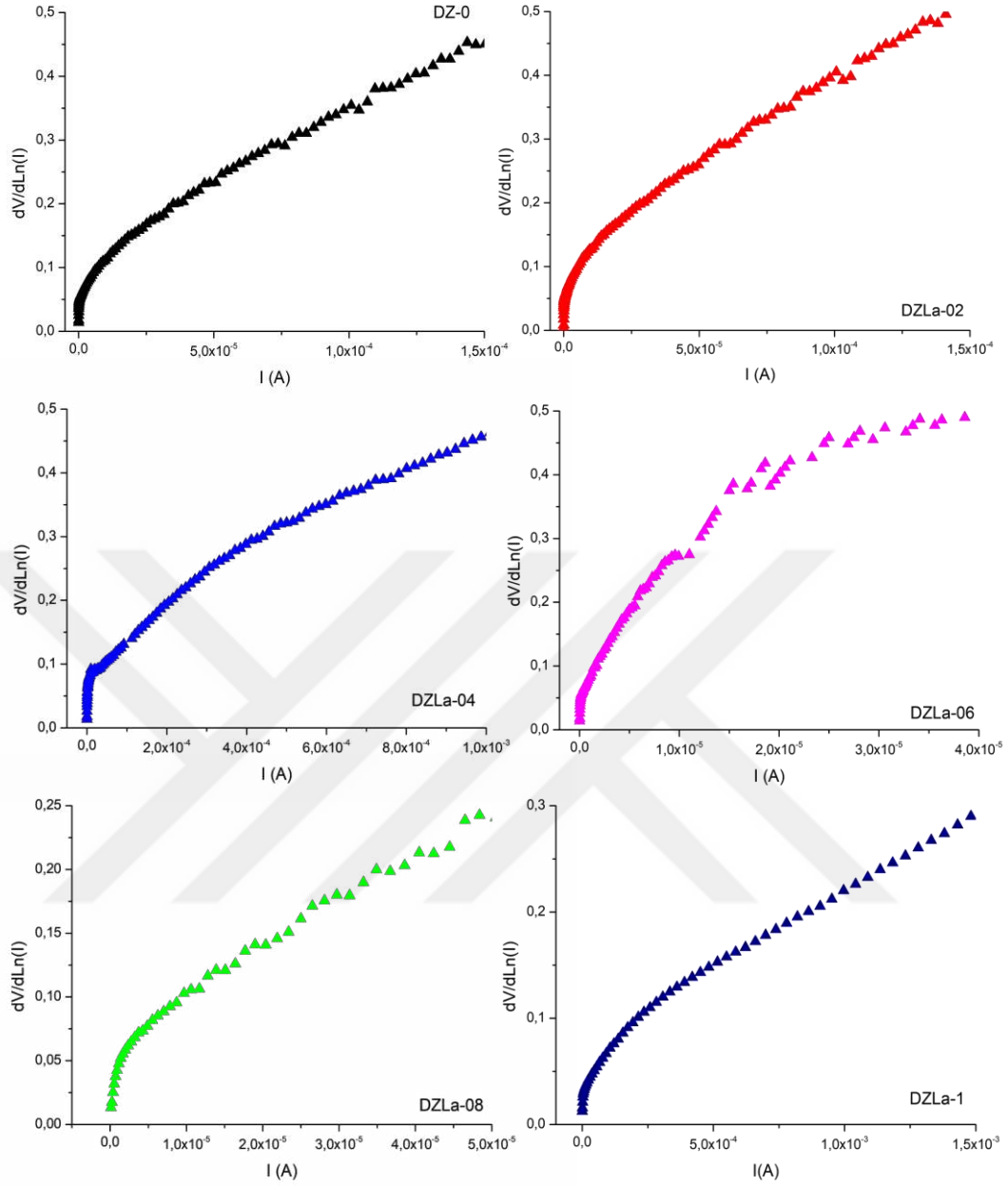
Norde yöntemi yardımıyla, diyotların I - V verileri kullanılarak çizilen $F(V)$ - V grafikleri Şekil 4.28’de verilmiştir. Bu grafiklerden, *Au/p-Si/n-ZnO:La/Al* diyotlarının ϕ_b ve R_s diyot parametreleri sırasıyla Denklem (2.43) ve (2.44) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.25. Au/p-Si/n-ZnO:La/Al heteroeklem diyotlarının I-V grafikleri



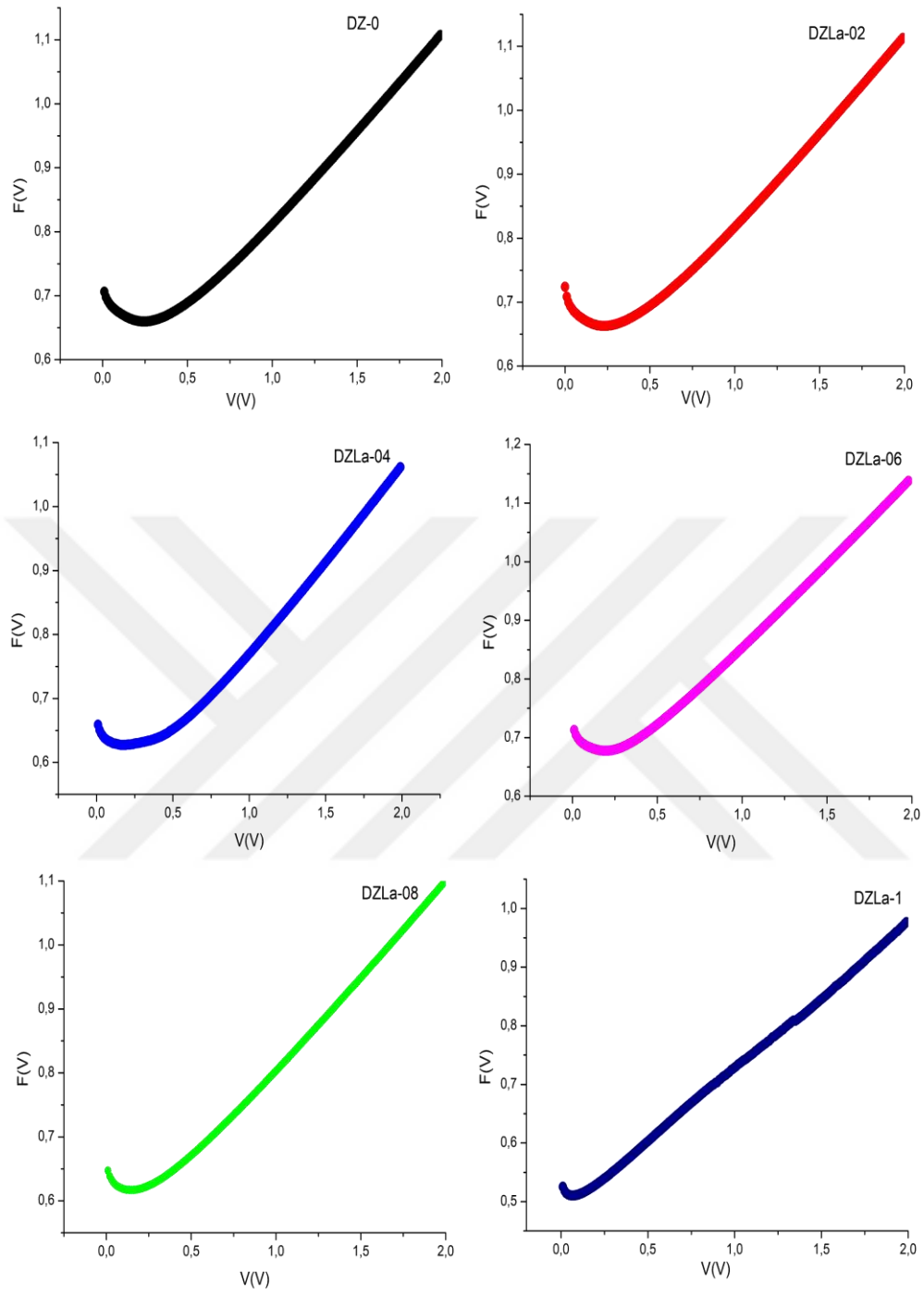
Şekil 4.26. Au/p-Si/n-ZnO:La/Al heteroeklem diyotlarının yarılogaritmik I-V karakteristikleri



Şekil 4.27. Au/p-Si/n-ZnO:La/Al heteroeklem diyotlarının $dV/d\ln(I)$ - I grafikleri

Tablo 4.10. Au/p-Si/n-ZnO:La/Al heteroeklem diyotları için farklı yöntemlerle hesaplanan diyot parametreleri

Diyot Kodu	Kullanılan Yöntem					
	TE		Cheung		Norde	
	n	ϕ_b (eV)	n	R_s (k Ω)	ϕ_b (eV)	R_s (k Ω)
DZ-0	2,11	0,69	2,11	7,11	0,72	7,62
DZLa-02	2,38	0,68	2,35	6,60	0,72	6,85
DZLa-04	2,50	0,64	2,55	2,47	0,67	3,01
DZLa-06	2,92	0,68	3,89	18,83	0,72	2,65
DZLa-08	2,54	0,63	2,63	3,68	0,65	2,39
DZLa-1	2,48	0,65	2,34	0,19	0,66	5,80



Şekil 4.28. Au/p-Si/n-ZnO:La/Al heteroeklem diyotlarının $F(V)$ - V grafikleri

Hesaplanan diyot parametreleri incelendiğinde, geleneksel TE teori kullanılarak elde edilen Φ_b değeri ile Norde yöntemi kullanılarak elde edilen Φ_b değerlerinin birbiri ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Engel yüksekliğinin oluşmasının nedeni, p -Si ile n -ZnO arasındaki iş fonksiyonu farkıdır. $\Phi_s(p\text{-Si})=4,97\text{eV}$, $\Phi_s(n\text{-ZnO})=4,25\text{eV}$ olup, bu iki değer arasındaki fark $0,72\text{eV}$ 'tur. Hesaplanan sonuçlar incelendiğinde, Φ_b

değerinin teorik değer ile uyumlu olduğu görülmüştür. Benzer şekilde literatürde p -Si/ n -ZnO diyotuna ait ϕ_b değeri 0,60-0,82eV aralığında hesaplanmıştır [114-119]. Bu çalışmalardan Chaabouni ve ark. [116] p -Si/ n -ZnO heteroeklem diyotlarını elde etmişler ve ϕ_b değerini yaklaşık olarak 0,70eV olarak hesaplamışlardır. Kullandıkları yarıiletkenlerin iş fonksiyonları farkından yola çıkarak elde ettikleri bu sonucun literatür ile uyumlu olduğunu rapor etmişlerdir.

Ayrıca geleneksel yöntem ve Cheung fonksiyonları kullanılarak elde edilen n değerleri de birbiri ile uyumludur. Artan La katkı miktarına bağlı olarak önce artmış, daha sonra azalmıştır. Bu trend literatürdeki diğer katkılı ZnO filmler ile elde edilen p - n heteroeklem diyotları için de rapor edilmiştir [120-122].

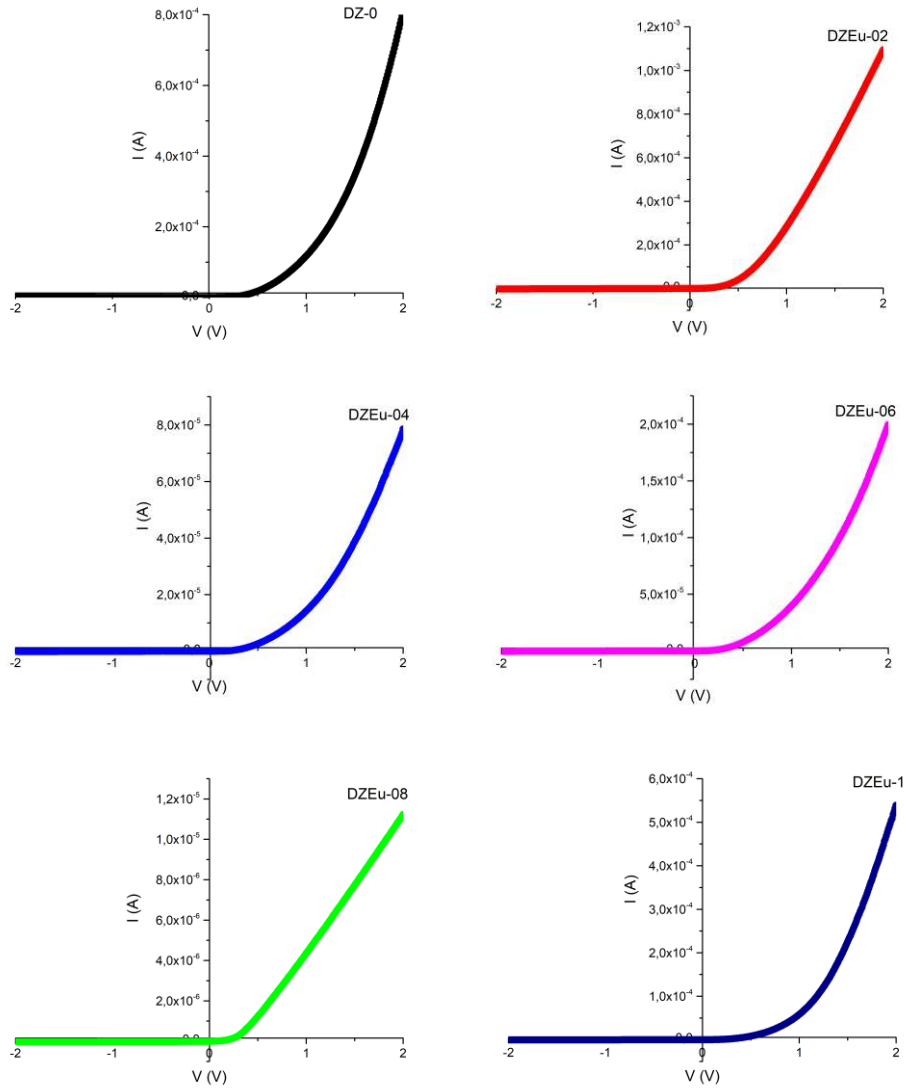
Katkılı filmler kullanılarak elde edilen p -Si/ n -ZnO:La heteroeklem diyotları arasında en düşük n değeri DZLa-04 diyotuna aittir. n değerinin 1'den büyük değerler alması, metal ile yarıiletken arasındaki ara yüzey tabakasının varlığı ile açıklanabilir. Ayrıca, R_s 'nin varlığı da n değerini etkilemektedir.

Cheung fonksiyonları ve Norde yöntemiyle hesaplanan R_s değerlerinin hepsi k Ω mertebesinde. Her iki yöntemle bulunan R_s değerleri birbirinden farklı bulunmuştur. Bunun nedeni ise, Cheung modelinde hesaplama yapılırken yüksek voltaj bölgesi kullanılırken, Norde modelinin tüm voltaj bölgesine uygulanmasıdır. Yöntemler arasındaki bu farklılık, elde edilen sonuçları da küçük oranlarda etkilemiştir. Literatürde katkılı ZnO filmler ile elde edilen p - n heteroeklem diyotları için iki farklı yöntem ile hesaplanan R_s değerleri arasında farklılık olduğu rapor edilmiştir [119-121].

4.4.2. Au/ p -Si/ n -ZnO:Eu/Al heteroeklem diyotlarının I - V grafikleri ve diyot parametreleri

Fabrikasyonu yapılan Au/ p -Si/ n -ZnO:Eu/Al heteroeklem diyotlarının I - V grafikleri Şekil 4.29'da verilmiştir. Fabrikasyonu yapılan p - n heteroeklemlerin doğrultucu özellik gösterdikleri bu grafiklerden görülmektedir. I - V ölçüm sonuçları kullanılarak, farklı yöntemlerle diyot parametreleri hesaplanmıştır.

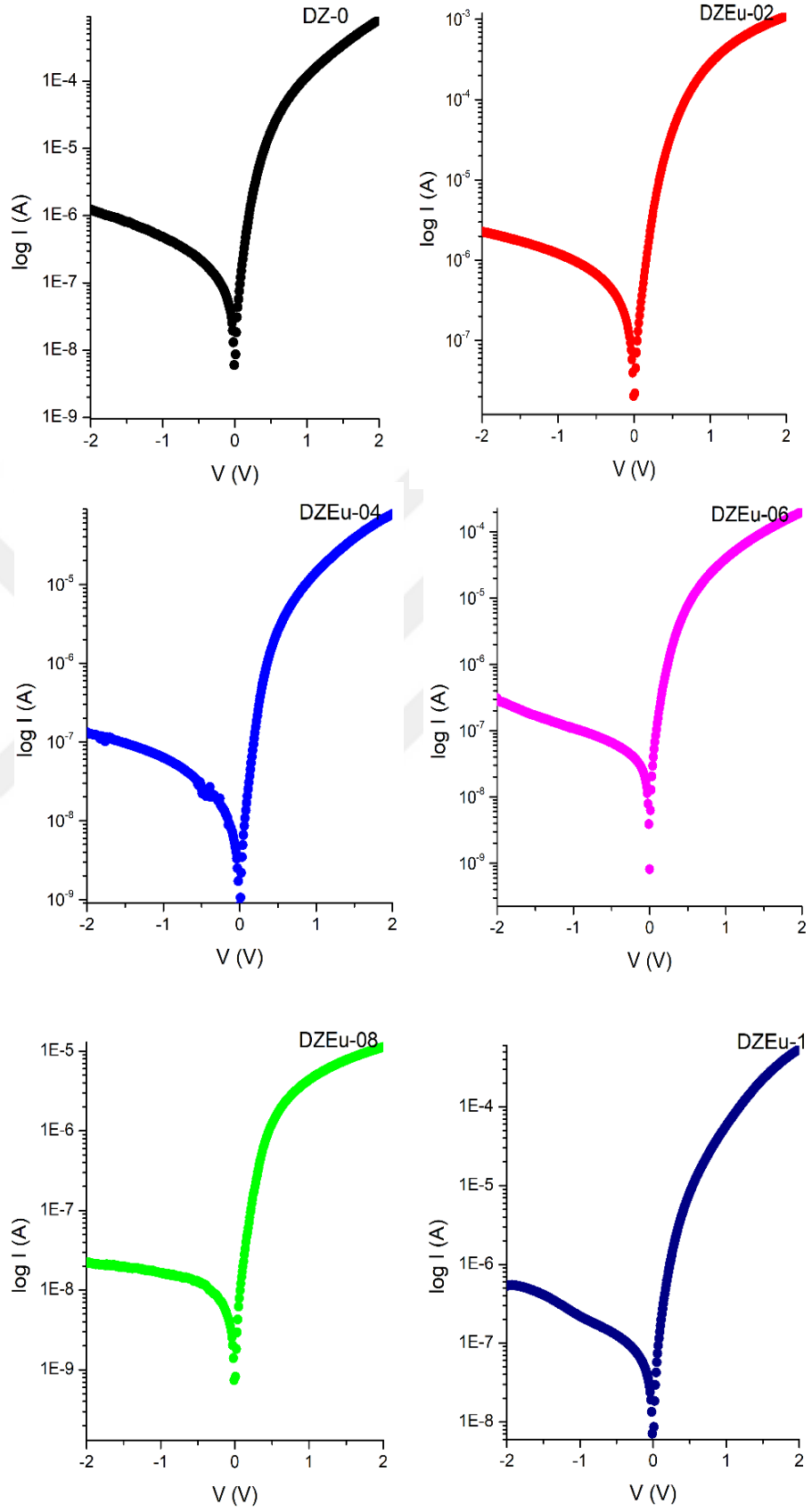
Geleneksel TE teori kullanılarak elde edilen yarılogaritmik I - V grafikleri Şekil 4.30'da verilmiştir. Çizilen bu eğrilerin eğim ve düşey eksen kesim noktası belirlenerek, Au/ p -Si/ n -ZnO:Eu/Al diyotlarına ait n ve ϕ_b değerleri sırasıyla, Denklem (2.36) ve (2.38) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.29. *Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al* heteroeklem diyotlarının *I-V* grafikleri

Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al heteroeklem diyotlarının *I-V* verileri kullanılarak, Cheung fonksiyonları yardımıyla $dV/d\ln(I) - I$ grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.31). Bu eğrilerin eğim ve düşey eksen kesim noktalarından, Denklem (2.41) kullanılarak, R_s ve n değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan diyot parametreleri Tablo 4.11’de verilmiştir.

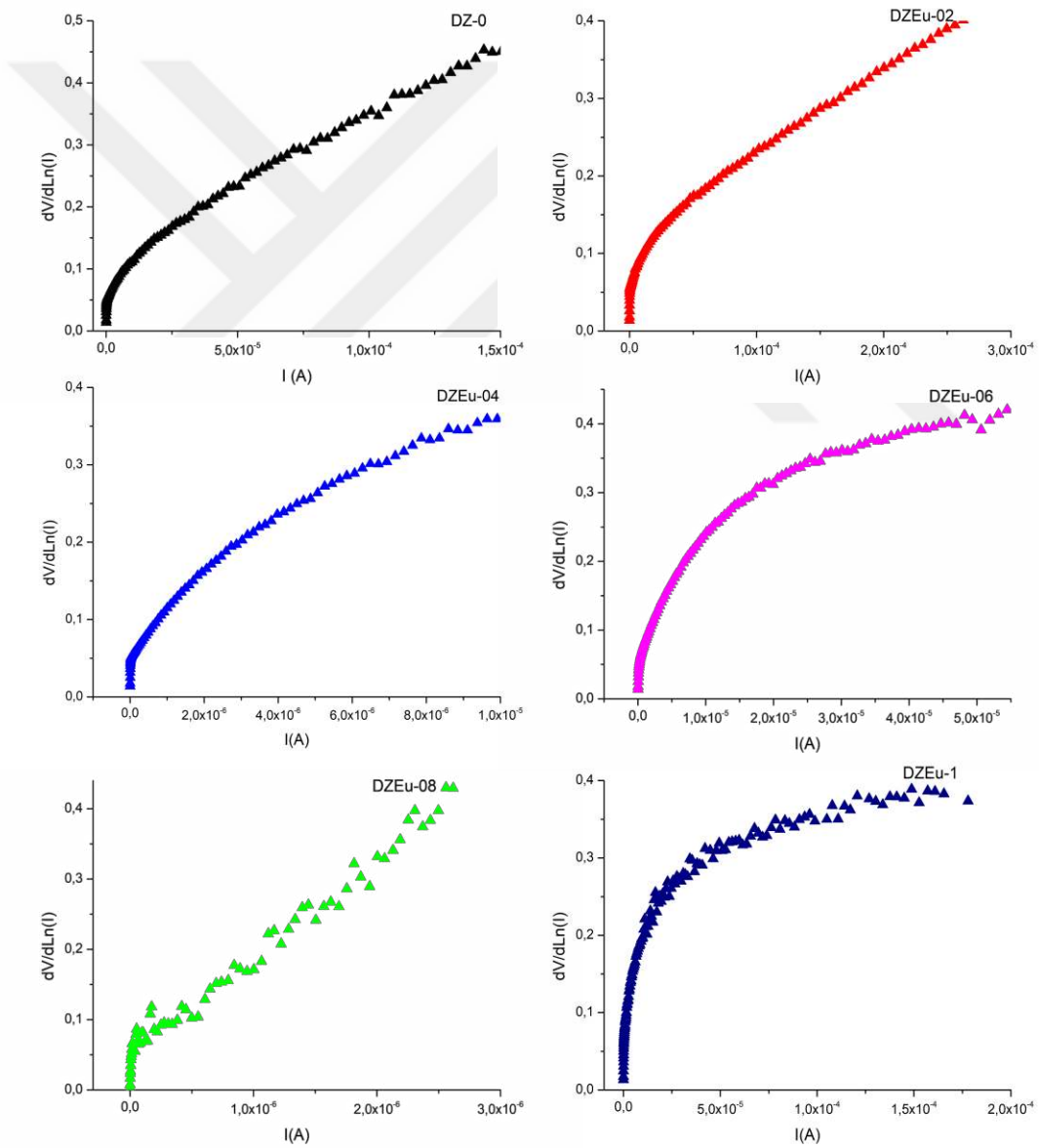
Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al heteroeklem diyotlarının *I-V* verileri kullanılarak, Norde yöntemi yardımıyla $F(V)-V$ grafikleri çizilmiş ve Şekil 4.32’de verilmiştir. Bu grafiklerden, diyotların ϕ_b ve R_s değerleri sırasıyla Denklem (2.43) ve (2.44) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 4.11’te verilmiştir.



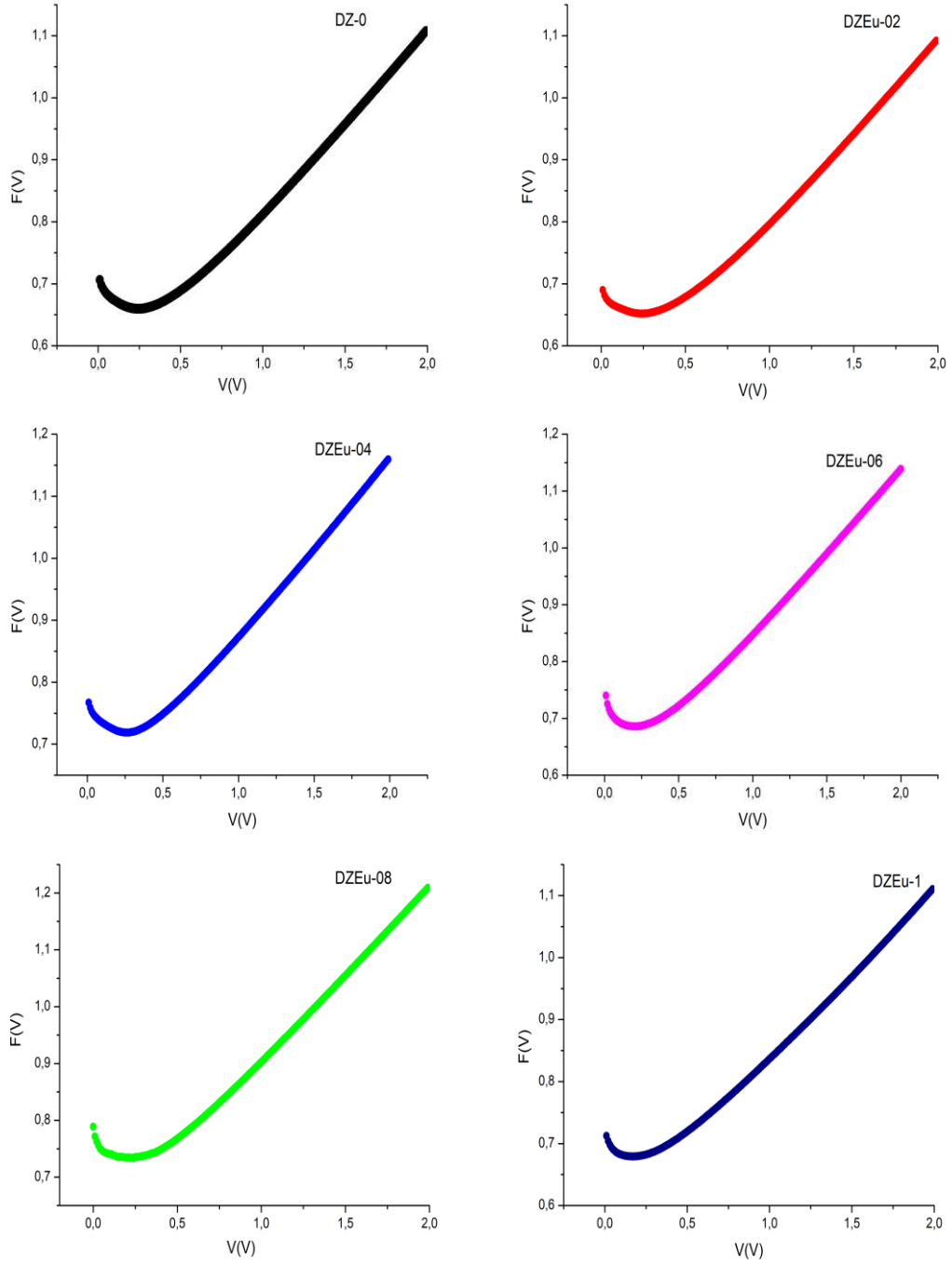
Şekil 4.30. Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al heteroeklem diyotlarının yarılogaritmik I-V karakteristikleri

Tablo 4.11. *Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al heteroeklem diyotları için farklı yöntemlerle hesaplanan diyot parametreleri*

Diyot Kodu	Kullanılan Yöntem					
	TE		Cheung		Norde	
	n	ϕ_b (eV)	n	R_s (k Ω)	ϕ_b (eV)	R_s (k Ω)
DZ-0	2,11	0,69	2,11	7,11	0,72	7,62
DZEu-02	2,29	0,68	2,25	4,36	0,71	4,47
DZEu-04	2,38	0,74	2,35	46,77	0,78	41,47
DZEu-06	2,63	0,67	3,24	17,37	0,71	8,16
DZEu-08	2,70	0,75	3,10	53,26	0,79	54,25
DZEu-1	2,96	0,68	3,42	12,69	0,70	2,10



Şekil 4.31. *Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al heteroeklem diyotlarının $dV/d\ln(I)$ - I grafikleri*



Şekil 4.32. *Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al heteroeklem diyotlarının $F(V)$ - V grafikleri*

Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al heteroeklem diyotlarına ait hesaplanan diyot parametreleri incelendiğinde, geleneksel TE teori kullanılarak elde edilen ϕ_b değeri ile Norde yöntemi kullanılarak elde edilen ϕ_b değerlerinin birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Hesaplanan bu değerler, rapor edilen diğer çalışmalar ile uyumlu içindedir [26].

Ayrıca geleneksel yöntem ve Cheung fonksiyonları kullanılarak elde edilen n değerleri de birbiri ile uyumludur. Artan Eu katkı miktarına bağlı olarak n değerleri de

artma eğilimindedir. Benzer şekilde artan katkı miktarı ile n değerinde artma eğilimi, literatürde de rapor edilmiştir [26, 120-122].

Cheung fonksiyonları ve Norde yöntemiyle hesaplanan R_s değerlerinin hepsi $k\Omega$ mertebesinde olup, artan E_u katkı miktarından bağımsız olarak düzensiz bir şekilde artıp azaldığı Tablo 3.13'ten görülmektedir. Cheung modelinde hesaplama yapılırken yüksek voltaj bölgesi kullanılırken, Norde modelinde tüm voltaj bölgesine bağlı hesaplama yapılmaktadır. Bu nedenle her iki yöntemle bulunan R_s değerleri birbirinden farklı çıkabilmektedir. Literatürde katkılı ZnO filmler ile elde edilen p - n heteroeklem diyotları için iki farklı yöntem ile hesaplanan R_s değerlerinin $k\Omega$ mertebesinde olduğu rapor edilmiştir [26, 119, 120].

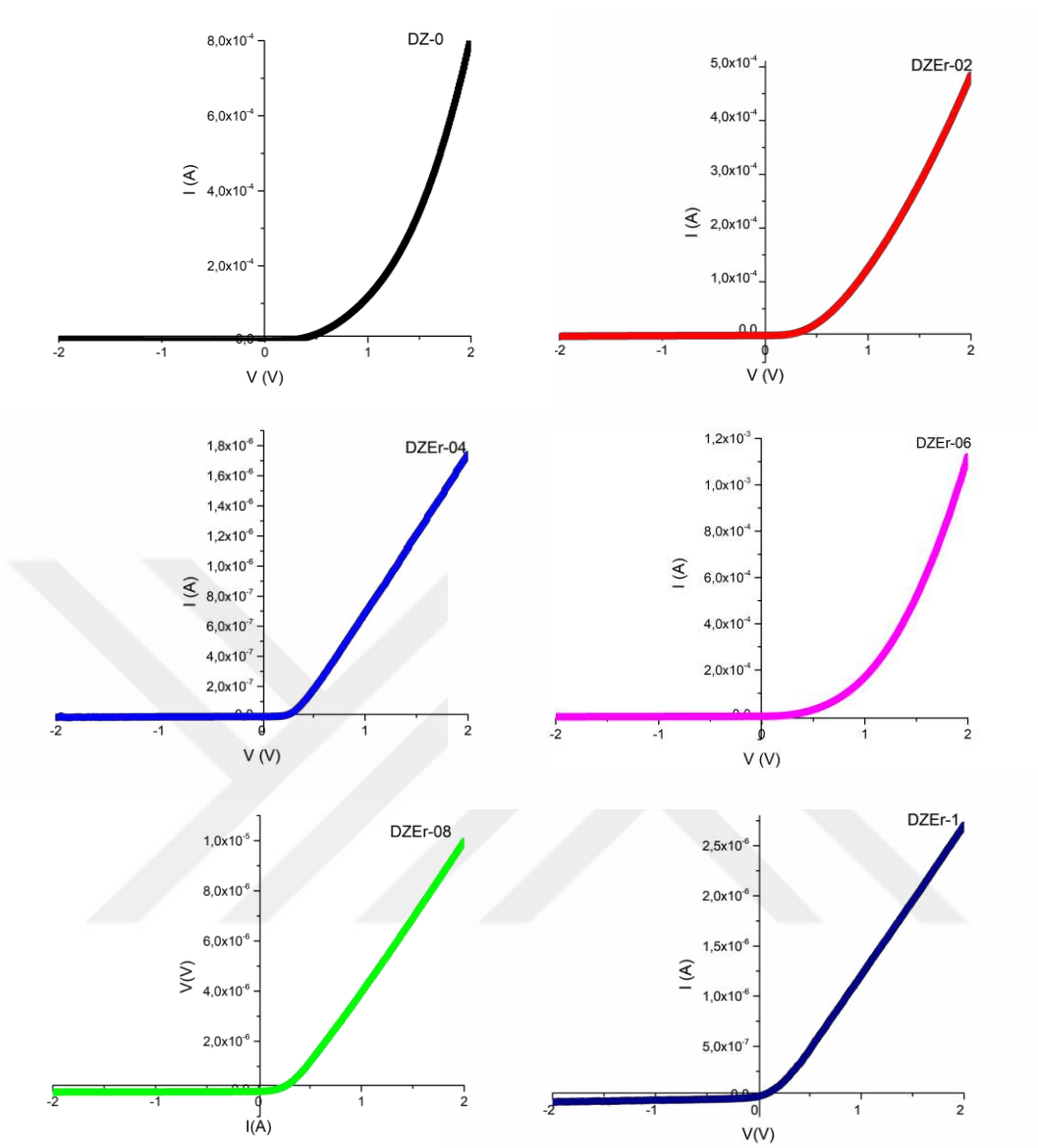
4.4.3. *Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al* heteroeklem diyotlarının I - V grafikleri ve diyot parametreleri

Fabrikasyonu yapılan *Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al* heteroeklem diyotlarının I - V grafikleri Şekil 4.33'te verilmiştir. Bu grafiklere göre *Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al* heteroeklemleri doğrultucu özellik göstermektedir. Bu ölçüm sonuçları kullanılarak üç farklı yöntemle diyot parametreleri hesaplanmıştır.

TE teori kullanılarak elde edilen yarılogaritmik I - V grafikleri çizilmiş (Şekil 4.34) ve çizilen eğrilerin eğim ve düşey eksenini kesim noktası belirlenerek, *Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al* diyotlarına ait n ve ϕ_b değerleri sırasıyla, Denklem (2.36) ve (2.38) kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu diyot parametreleri Tablo 4.12'de verilmiştir.

Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al heteroeklem diyotlarının I - V verileri kullanılarak Cheung fonksiyonları yardımıyla $dV/d\ln(I) - I$ grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.35). Bu eğrilerin eğim ve düşey eksenini kesim noktalarından, Denklem (2.41) kullanılarak, R_s ve n diyot parametreleri hesaplanmıştır. Hesaplanan parametreler Tablo 4.12'de verilmiştir.

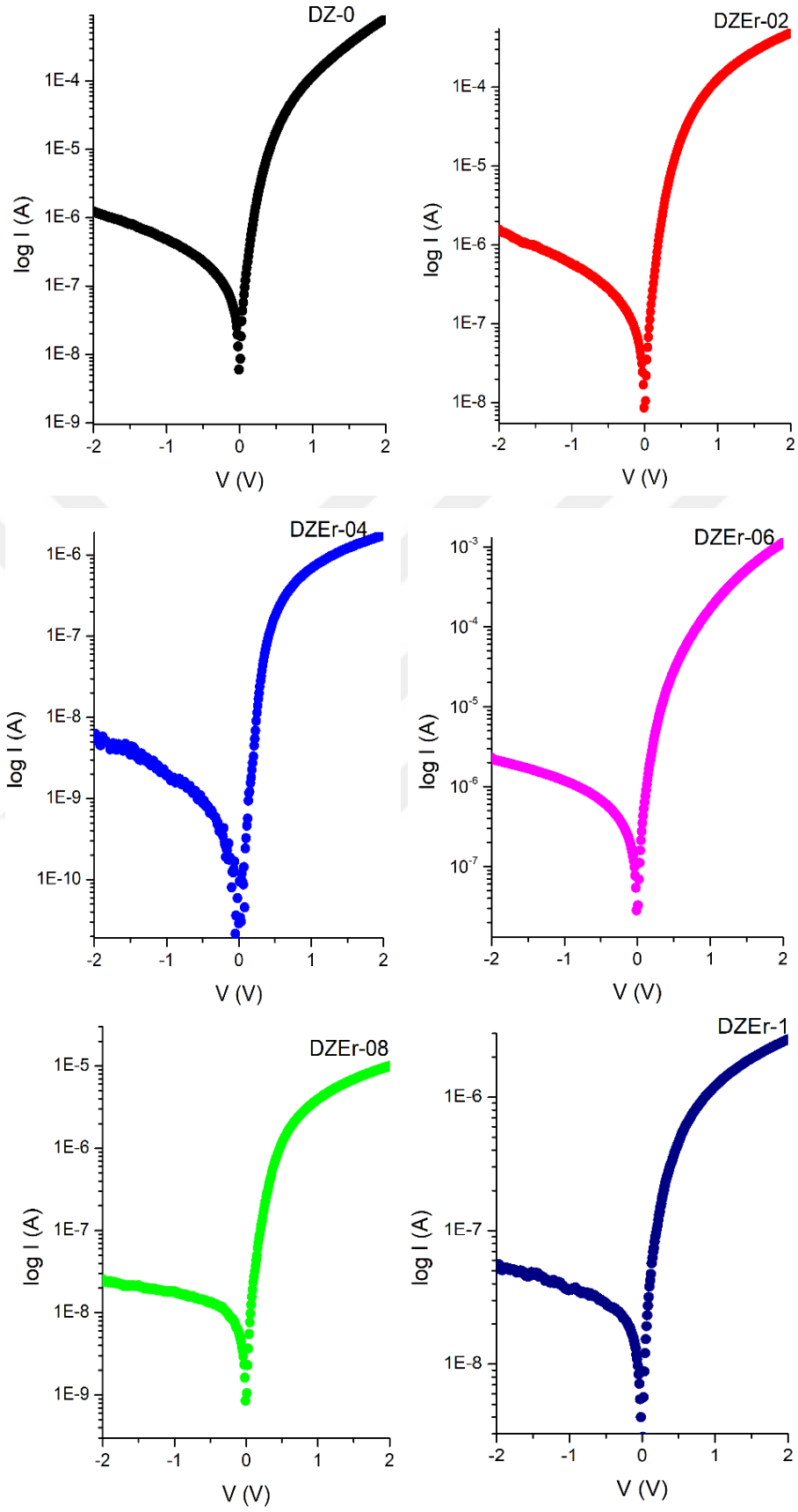
Son olarak, Norde yöntemi yardımıyla, *Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al* heteroeklem diyotlarının I - V verileri kullanılarak $F(V)$ - V grafikleri çizilmiş ve Şekil 4.36'da verilmiştir. Bu grafiklerden, *Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al* heteroeklem diyotlarının ϕ_b ve R_s değerleri sırasıyla Denklem (2.43) ve (2.44) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 4.12'de verilmiştir.



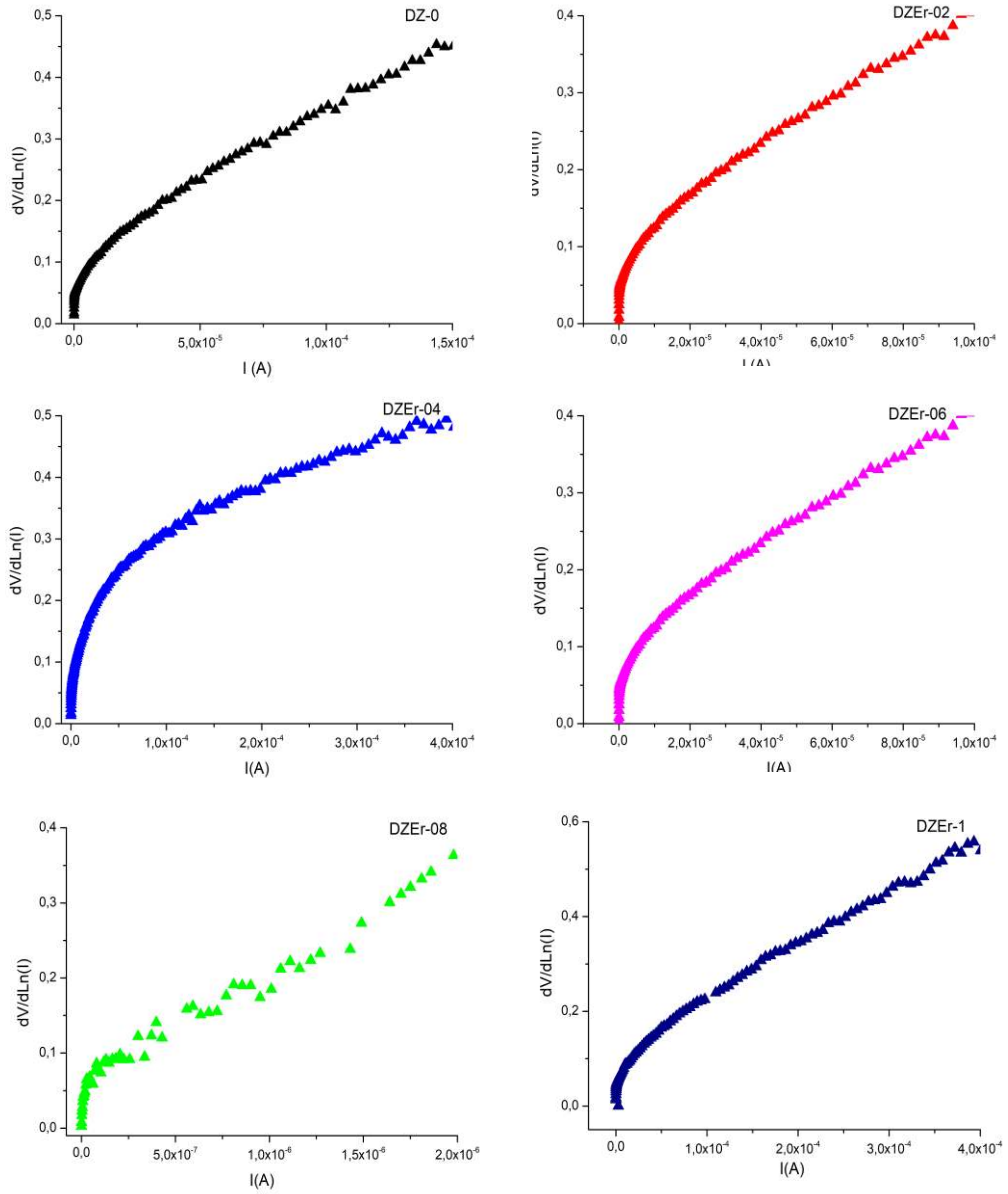
Şekil 4.33. Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al heteroeklem diyotlarının I-V grafikleri.

Tablo 4.12. Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al heteroeklem diyotları için farklı yöntemle hesaplanan diyot parametreleri

Diyot Kodu	Kullanılan Yöntem					
	TE		Cheung		Norde	
	n	ϕ_b (eV)	n	R_s (k Ω)	ϕ_b (eV)	R_s (k Ω)
DZ-0	2,11	0,69	2,11	7,11	0,72	7,62
DZEr-02	2,17	0,69	2,16	8,99	0,72	9,06
DZEr-04	2,24	0,66	2,20	7,15	0,68	8,98
DZEr-06	2,36	0,66	2,47	33,49	0,68	8,56
DZEr-08	2,28	0,75	2,39	177,85	0,76	258,29
DZEr-1	2,19	0,66	2,15	2,77	0,68	2,75

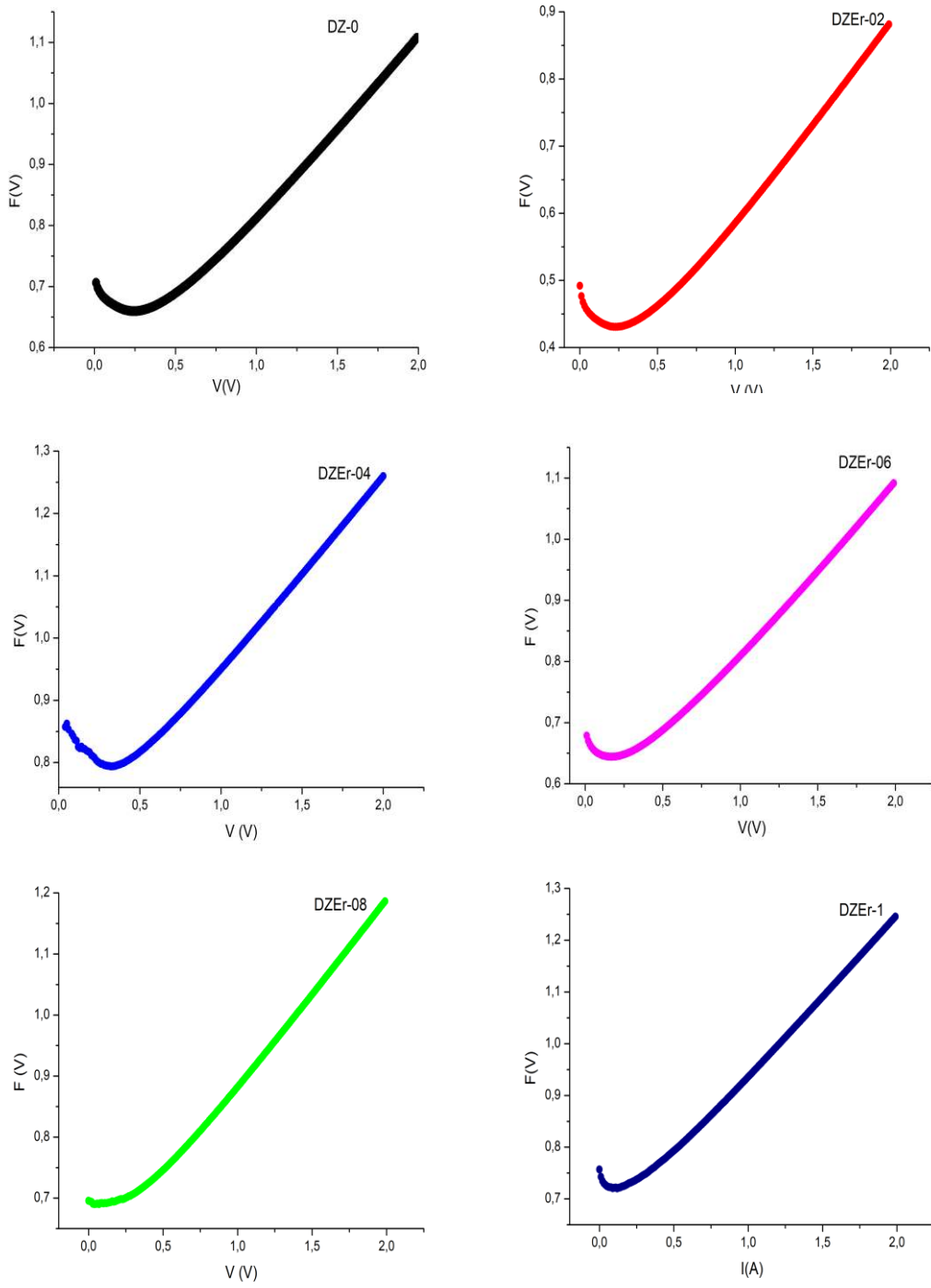


Şekil 4.34. Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al heteroeklem diyotlarının yarılogaritmik I-V karakteristikleri



Şekil 4.35. *Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al* heteroeklem diyotlarının $dV/d\ln(I)$ - I grafikleri

Hesaplanan diyot parametreleri incelendiğinde, farklı yöntemler kullanılarak elde edilen n , ϕ_b ve R_s değerlerinin birbiri ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Er katkılı filmler kullanılarak elde edilen *Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al* heteroeklem diyotları arasında en düşük n değeri DZEr-02 diyotuna aittir. Artan katkı miktarı ile n değeri artmış daha sonra yeniden azalmıştır. Bu trend literatürdeki diğer katkılı ZnO filmler ile elde edilen p - n heteroeklem diyotları için de rapor edilmiştir [121, 123].



Şekil 4.36. Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al heteroeklem diyotlarının $F(V) - V$ grafikleri.

Cheung fonksiyonları ve Norde yöntemiyle hesaplanan R_s değerlerinin hepsi $k\Omega$ mertebesindedir. Literatürde katkılı ZnO filmler ile elde edilen $p-n$ heteroeklem diyotları için hesaplanan R_s değerleri hepsi $k\Omega$ mertebesindedir [117, 119, 120].

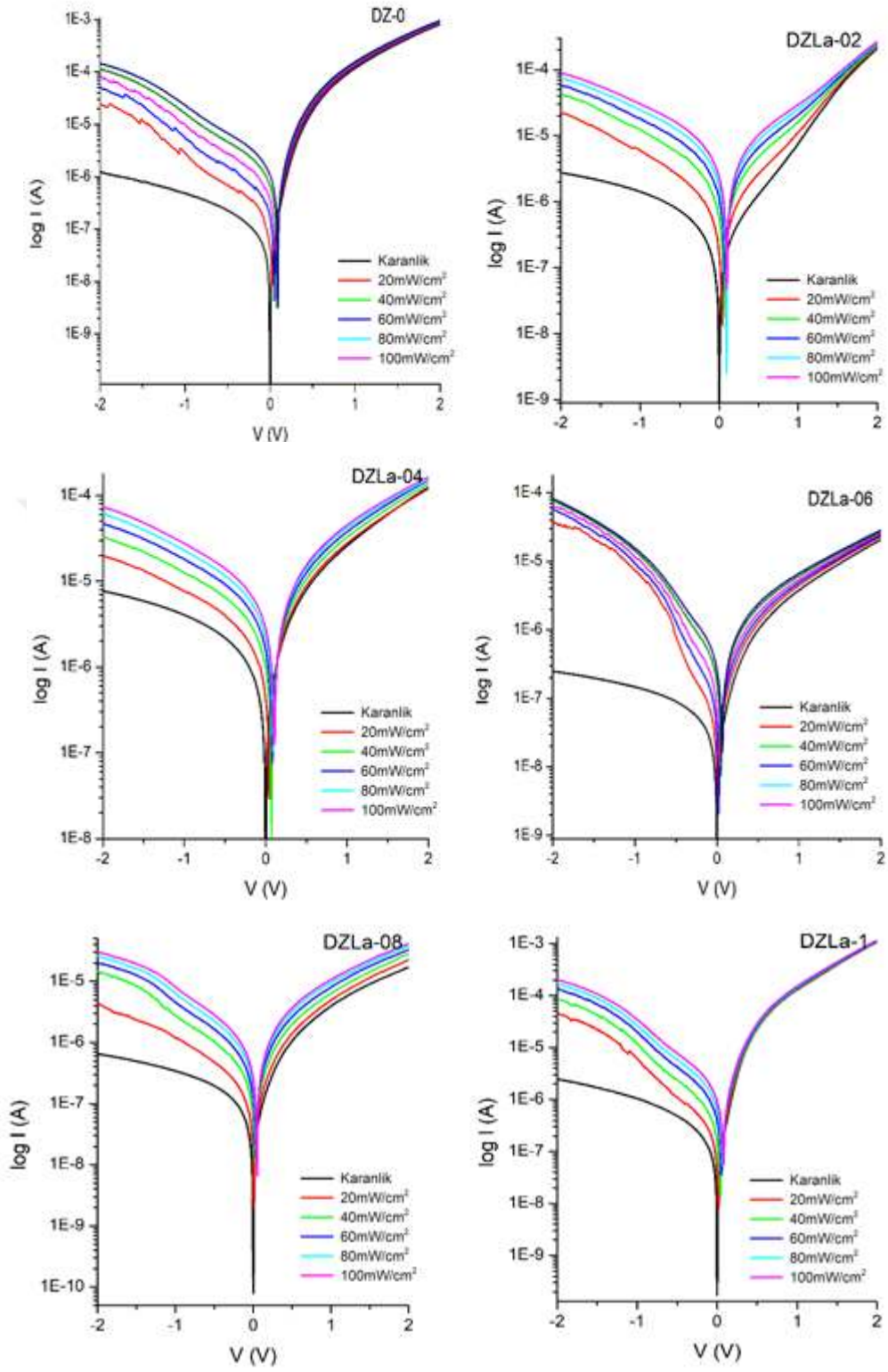
4.4.4. *Au/p-Si/n-ZnO/Al, Au/p-Si/n-ZnO:La/Al ve Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al heteroeklem diyotlarının farklı aydınlatma şiddetleri altında I-V karakteristikleri*

Hazırlanan *Au/p-Si/n-ZnO/Al, Au/p-Si/n-ZnO:La/Al, Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al ve Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al* heteroeklem diyotlarının fotodiyot özelliklerini incelemek amacıyla, farklı aydınlatma şiddetleri ($20\text{-}100\text{mWcm}^{-2}$) altında *I-V* ölçümleri yapılmıştır. Er katkılı filmler kullanılarak elde edilen *Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al* diyotlarının *I-V* ölçümleri farklı ışık şiddetlerinden etkilenmemiş, yani bu diyotlar fotodiyot özellik göstermemiştir.

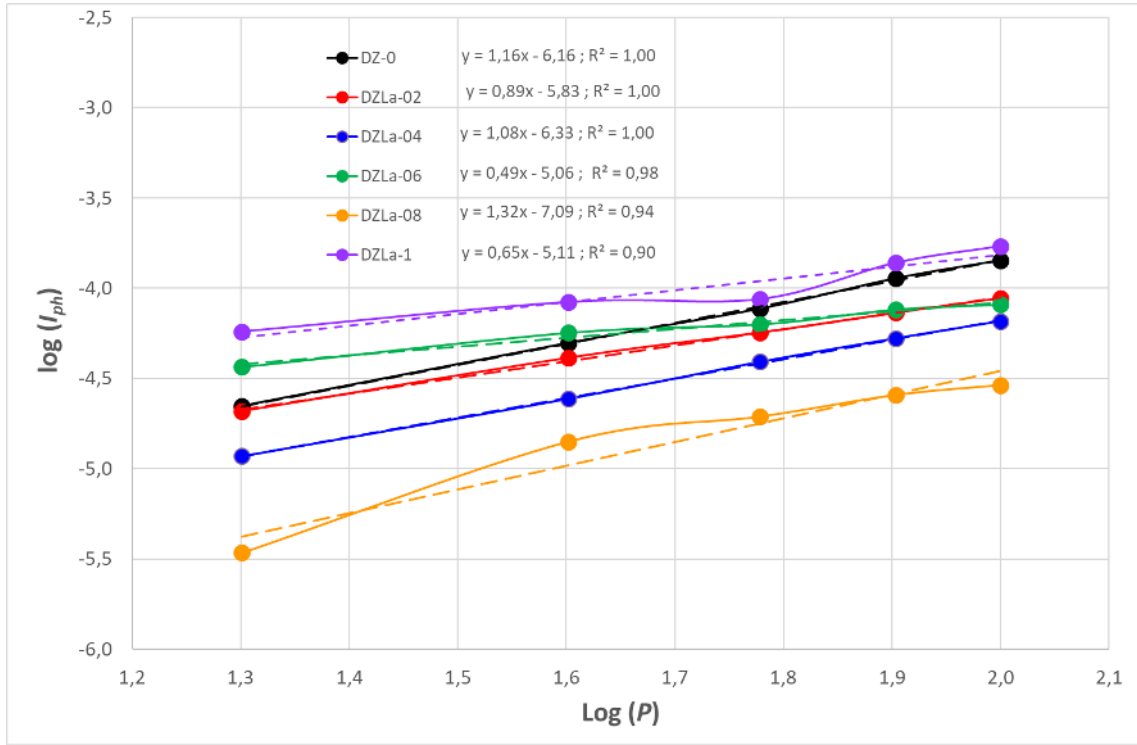
4.4.4.1. *Au/p-Si/n-ZnO:La/Al heteroeklem diyotlarının farklı aydınlatma şiddetleri altında I-V karakteristikleri*

Şekil 4.37’de *Au/p-Si/n-ZnO:La/Al* heteroeklem diyotlarının farklı aydınlatma şiddetleri altındaki yarılogaritmik *I-V* grafikleri verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, *Au/p-Si/n-ZnO:La/Al* fotodiyotlarının ters beslem fotoakım değerleri ışığın uygulanması ile ışık şiddetine bağlı olarak artmıştır. Ölçüm sonunda, ışık kaynağı kapatıldığında ise, fotoakım başlangıç değerine geri düşmüştür. Işık altında akım ve gerilimde meydana gelen bu değişim elde edilen diyotun fotovoltatik davranış sergilediğini göstermiştir.

Sabit voltaj altında (-2V) *Au/p-Si/n-ZnO:La/Al* fotodiyotları için bulunan fotoakım değerleri ile $\log(I_{ph}) - \log(P)$ grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.38). Bu grafiklerin eğimi kullanılarak, fabrikasyonu yapılan diyotların ışığa duyarlılığının bir ölçüsü olan m değerleri Denklem (2.45) kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen değerler Tablo 4.13’te verilmiştir. Bu tablodan, *Au/p-Si/n-ZnO:La/Al* fotodiyotlarının m değerlerinin $0,49$ ile $1,32$ arasında değiştiği görülmektedir. Şekil 4.38’de çizilen grafiklerin eğimlerinden elde edilen m değerleri, elde edilen fotodiyotun bant aralığında bulunan tuzak seviyelerinin yoğunluğu ile ilgili bilgiler vermektedir. m değerinin $0,5$ ile $1,0$ arasında bir değer alması, bant aralığındaki tuzak seviyelerinin sürekli bir dağılım gösterdiği, daha yoğun olduğu ve kristal yapıda bozulmalar olduğu anlamına gelmektedir. Bu değer $1,0$ ’den büyük olması, bant aralığında daha az tuzak seviyelerinin olduğunu ve kristal yapının daha az bozulduğunu göstermektedir [124]. Işığa en duyarlı diyotun (m değeri en yüksek) DZLa-08 fotodiyotu olduğu belirlenmiştir. Bu şekilde ışığa bağlı olarak akım değerlerinde meydana gelen bu değişim, oluşturulan fotodiyotun fotoiletkenlik özellik gösterdiğini ve bu nedenle fotodiyot ya da fotosensör uygulamalarında kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.37. *Au/p-Si/n-ZnO:La/Al* heteroeklem diyotlarının farklı ışık şiddetleri altındaki yarılogaritmik *I-V* karakteristikleri



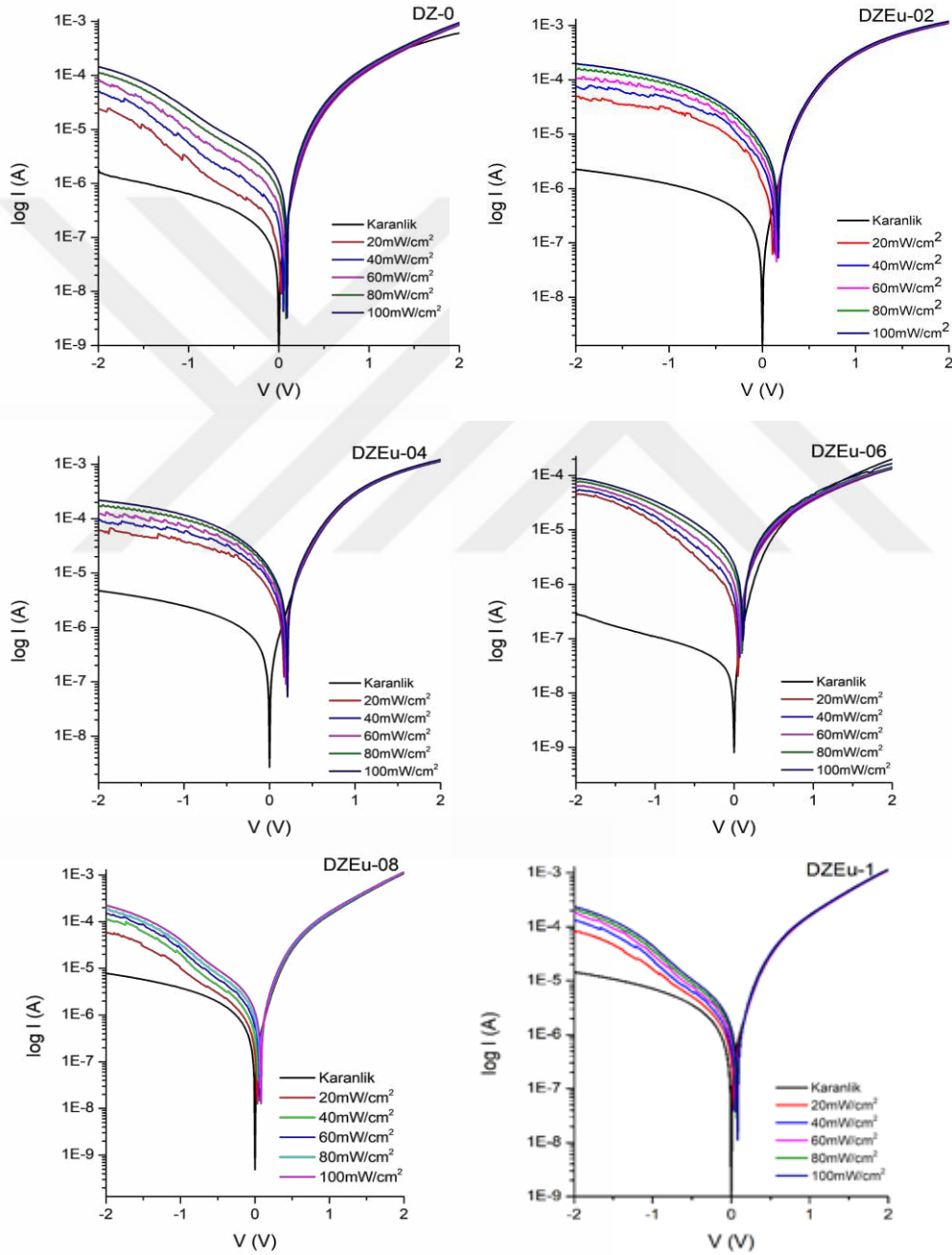
Şekil 4.38. Al/p-Si/n-ZnO:La/Al fotodiyotlarının ışık şiddetine karşı fotoakım değişimleri

Tablo 4.13. Au/p-Si/ZnO:La/Al fotodiyotları için elde edilen m değerleri.

Diyot Kodu	m değeri
DZ-0	1,16
DZLa-02	0,89
DZLa-04	1,08
DZLa-06	0,49
DZLa-08	1,32
DZLa-1	0,65

4.4.4.2. Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al heteroeklem diyotlarının farklı aydınlatma şiddetleri altında I-V karakteristikleri

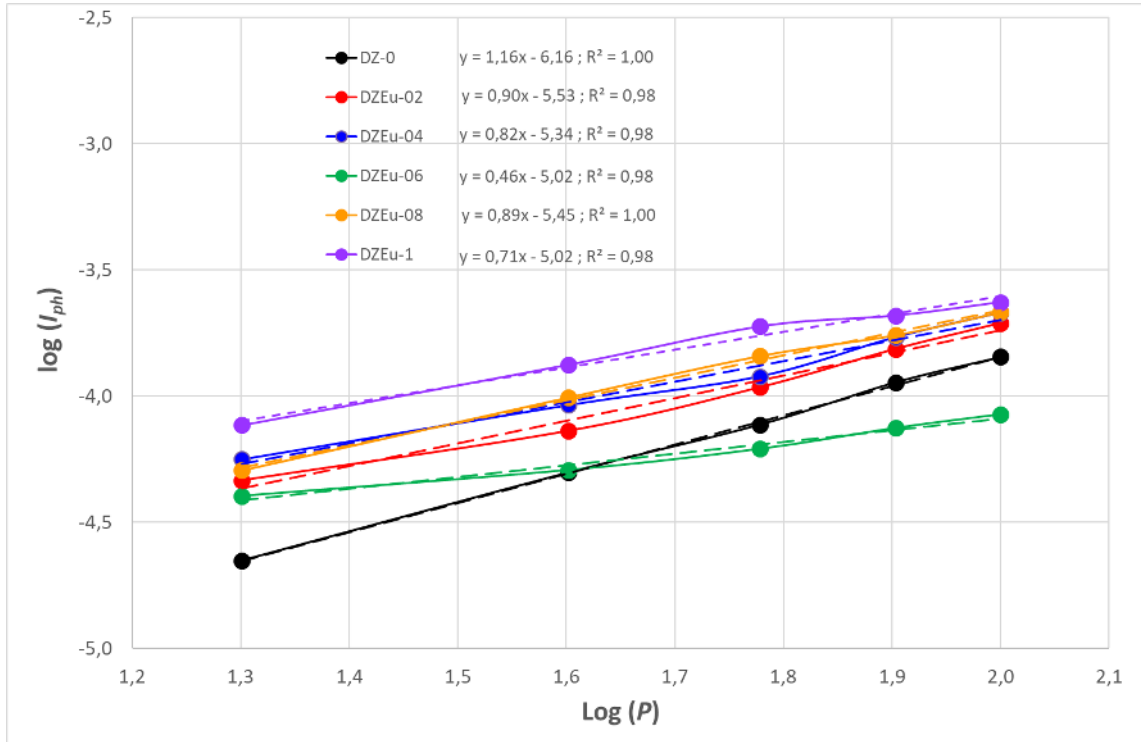
Hazırlanan Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al heteroeklem diyotlarının farklı aydınlanma şiddetleri altında I-V ölçümleri yapılmıştır. Şekil 4.39'da Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al fotodiyotlarının farklı aydınlanma şiddetleri altındaki yarılogaritmik I-V grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.39. Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al heteroeklem diyotlarının farklı ışık şiddetleri altındaki yarılogaritmik I-V karakteristikleri.

Şekil 4.39'dan görüldüğü gibi, ışık şiddeti arttıkça diyotun ters besleme akımı artmıştır. Farklı ışık şiddetlerinde akım ve gerilimdeki bu değişim elde edilen diyotun fotovoltatik davranış sergilediğini göstermiştir.

Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al diyotların fotoakım mekanizması da analiz edilmiştir. Fotodiyotların m değerleri Şekil 4.40'deki grafiklerin eğiminden hesaplanmış ve Tablo 4.14'de verilmiştir. *Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al* fotodiyotlarının m değerleri 0,46 ile 1,16 arasında değişirken, katkılı diyotlar arasında en yüksek m değeri DZEu-02 fotodiyotuna aittir. Elde edilen sonuçlar literatür ile uyumludur [119, 125, 126].



Şekil 4.40. *Al/p-Si/n-ZnO:Eu/Al* fotodiyotlarının ışık şiddetine karşı fotoakım değişimleri.

Tablo 4.14. *Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al* fotodiyotları için elde edilen m değerleri

Diyot Kodu	m değeri
DZ-0	1,16
DZEu-02	0,90
DZEu-04	0,82
DZEu-06	0,46
DZEu-08	0,89
DZEu-1	0,71

Literatürde, bu çalışmada kullanılan katkı elementleri kullanılarak elde edilen fotodiyot ile ilgili herhangi bir çalışma bulunamamıştır. Ancak, farklı katkılar ve oranlarda elde edilen heteroeklem diyotlarda da benzer sonuçlar gözlenmiş ve elde edilen heteroeklem diyotların fotodiyot olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir. Yıldırım ve Kocyigit [119], sol jel spin kaplama yöntemi ile elde ettikleri In katkılı (%0,1, %0,5, %1) ZnO filmlerini kullanarak elde ettiği *Al/In:ZnO/p-Si* heteroeklem diyotları için farklı aydınlatmalar ($20-100\text{mW/cm}^2$) altında -5V ile +5V aralığında *I-V* ölçümlerini yapmış ve aydınlatma şiddeti arttıkça geri beslem akım değerlerinde değişim olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu sonucu göz önünde bulundurarak, fabrikasyonunu yaptıkları heteroeklem diyotların fotovoltaiik davranış sergilediğini ve birer fotodiyot olarak değerlendirilebileceğini rapor etmişlerdir. Yakuphanoglu [125] sol jel dip kaplama yöntemi ile elde ettiği %20 Co katkılı ZnO filmini kullanarak elde ettiği *Au/ZnO:Co/n-Si* diyotu için farklı aydınlatmalar ($20-100\text{mW/cm}^2$) altında -2V ile +2V aralığında *I-V* ölçümlerini yapmış ve aydınlatma şiddeti arttıkça geri beslem akım değerlerinde artış olduğunu gözlemlemiştir. Bu nedenle, *Au/ZnO:Co/n-Si* diyotunun fotovoltaiik davranış sergilediğini ve fotodiyot olarak değerlendirilebileceğini rapor etmiştir. Daha sonra, logaritmik $I_{ph} - P$ grafiği çizerek, m değerini 0,83 olarak hesaplamıştır. *Au/ZnO:Co/n-Si* diyotu için bu değerin, bant aralığı içindeki tuzak merkezlerinin varlığını gösterdiğini ve diyottaki foto taşıyıcıların oluşum sürecinin, tuzaklardan kuvvetli bir şekilde etkilendiğini rapor etmiştir. Gupta ve ark. [126] sol jel spin kaplama yöntemi ile elde ettikleri katkısız ve %0,8 Al katkılı ZnO filmlerini kullanarak oluşturdukları *p-Si/ZnO* ve *p-Si/ZnO:Al* diyotlarının 100mW/cm^2 gücünde tungsten halojen lamba kullanarak, *I-V* ölçümlerini yapmış ve ışık altında geri beslem akım değerlerinde artış olduğunu gözlemlemiştir. -5V değerinde her iki diyotun da fotodiyot olarak değerlendirilebileceğini belirtmişlerdir. Al katkılı diyotun, katkısız diyota göre ışığa daha duyarlı olduğunu rapor etmişlerdir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

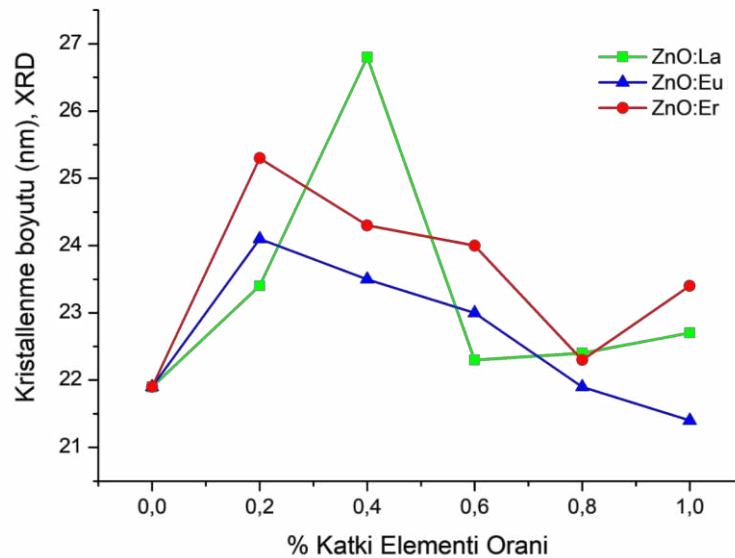
Bu çalışmada, sol jel yöntemi ile hazırlanan çözeltiler kullanılarak spin kaplama tekniği ile *p-Si* alttaşlar üzerine katkısız ve farklı oranlarda La, Eu ve Er katkılı ZnO filmlerinin elde edilmesi; bu filmler ile *p-Si/n-ZnO*, *p-Si/n-ZnO:La*, *p-Si/n-ZnO:Eu* ve *p-Si/n-ZnO:Er* heteroeklem yapılarının oluşturulması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, ilk olarak katkısız ve farklı oranlarda La, Eu ve Er katkılı ZnO filmleri aynı depolama parametrelerinde büyütülmüştür. Bu filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri sırasıyla XRD, SEM ve UV-vis spektrofotometresi kullanılarak araştırılmıştır. Daha sonra aygıt uygulamaları için alt ve üst omik kontaklar yapılarak, *Au/p-Si/n-ZnO/Al*, *Au/p-Si/n-ZnO:La/Al*, *Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al* ve *Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al* heteroeklem yapıları oluşturulmuştur. Elde edilen bu heteroeklemlerin karanlıkta ve farklı aydınlatma şiddetlerinde elektriksel karakteristikleri incelenmiştir.

Katkısız ve farklı oranlarda La, Eu ve Er katkısı ile elde edilen ZnO filmlerinin XRD spektrumlarından, filmlerin hepsinde belirgin olarak tek bir pikin olduğu (002) ve bu pikin hekzagonal wurtzite ZnO yapıya (Zinkit; JCPDS kart no: 36-1451) ait olduğu belirlenmiştir. La, Eu ve Er katkı elementlerine ait herhangi bir pik gözlenmemiştir. Spektrumlar incelendiğinde, (002) pikinin yanında diğer pik şiddetlerinin ihmal edilebilir olması nedeniyle (<%1), tüm filmlerin tercihli yöneliminin (002) düzleminde olduğu söylenebilir. (002) piki için literatürde verilen 2θ değeri $34,422^\circ$ 'dir. Katkı ile birlikte pik pozisyonlarında belirgin bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Elde edilen tüm filmler için kristallenme boyutu (D), örgü sabiti (c), dislokasyon yoğunluğu (δ), deformasyon (ϵ_z), ve gerilim (σ_c) hesaplanmıştır.

La katkılı ZnO filmlerinde kristallenme boyutu 21,9 ile 26,8nm arasında değerler almış ve en iyi kristallenmenin ZLa-04 filminde olduğu belirlenmiştir. Katkı konsantrasyonun daha fazla artışı ile birlikte yapıda bozulmalar olmuş ve kristallenme boyutu azalmaya başlamıştır. Benzer durum pik şiddetleri için de geçerlidir. Küçük katkı miktarlarında pik şiddeti artarken, katkının daha da artmasıyla birlikte pik şiddeti azalmaya başlamıştır. Bu durum, La^{+3} ($r_i=1,16\text{\AA}$) ve Zn^{+2} ($r_i=0,74\text{\AA}$) arasındaki iyonik yarıçap farkından kaynaklanmış olabilir. En yüksek pik şiddeti ise yine ZLa-04 filmine aittir. ZnO filmine farklı oranlarda Eu katkılanmasıyla elde edilen filmlerde ise, artan katkı miktarı ile de (002) kırınım piki şiddetinin azaldığı açıkça görülmektedir. Filmlerin kristallenme boyutlarının birbirine yakın değerlerde olduğu bulunmuştur (21,9-25,3nm

aralığında). Kristallenme boyutunun artması dolayısıyla dislokasyon yoğunluğunun azalmasıyla beraber, yarıiletken filmin kristal kalitesi artar. Buna göre, ZEu-02 filminin, diğer filmlere göre daha iyi kristallenen film olduğu söylenebilir. Er katkısı ile elde edilen ZnO filmlerinin de kristallenme boyutları ise 21,9-24,1nm aralığında değişmektedir. β yarıpik genişliği ise Er katkı miktarı artınca artmış (en dar ZEr-02), katkının daha da artmasıyla azalmaya başlamıştır. En büyük kristallenme boyutu ZEr-02 kodlu filmde oluşmuştur. Yine en büyük c değeri bu filmde elde edilmiştir. Konsantrasyonun daha fazla artışı ile birlikte yapıda bozulmalar olmuş ve kristallenme boyutu da küçülmeye başlamıştır. Benzer durum pik şiddetleri için de geçerlidir. Küçük katkı miktarlarında pik şiddeti artarken, katkının daha da artmasıyla birlikte pik şiddeti azalmaya başlamıştır. Bu durum Er^{+3} (1,00Å) ve Zn^{+2} (0,74Å) arasındaki iyonik yarıçap farkından kaynaklanmış olabilir. Katkisız ve La, Eu ve Er katkılı ZnO filmlerinin XRD spektrumları ile elde edilen bütün sonuçlar önceden rapor edilen çalışmalar ile uyum içindedir [23, 26, 31, 105-107].

Elde edilen tüm filmler için hesaplanan kristallenme boyutlarının karşılaştırmalı grafiği çizilmiş ve Şekil 5.1’de verilmiştir. En yüksek kristallenme boyutunun ZLa-04 kodlu filme ait olduğu görülmektedir. Üç katkı elementi için de kristallenme boyutu önce artmış, katkı miktarının daha da artmasıyla daha sonra azalmaya başlamıştır. ZnO’yu katkılamak için kullanılan üç elementin de, Zn^{+2} ile arasında çok fazla iyonik yarıçap farkı vardır. Zn^{+2} iyonunun iyonik yarıçapı 0,74Å iken, La^{+3} , Eu^{+3} ve Er^{+3} iyonlarının iyonik yarıçapları sırasıyla, 1,16Å, 1,07Å ve 1,00Å değerlerindedir. Bu fark katkı miktarı arttıkça kristal yapının bozulmasına ve örgü içinde düzensizliklerin oluşmasına sebep olmaktadır.



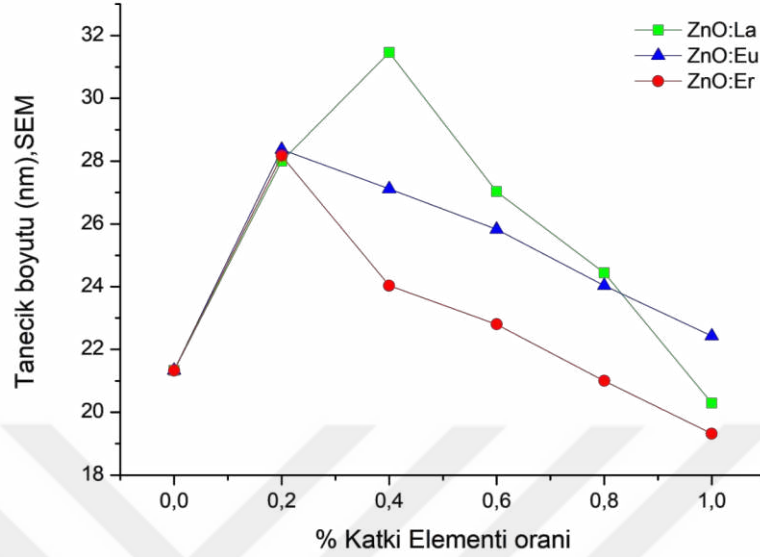
Şekil 5.1. Elde edilen bütün ZnO filmlerinin kristallenme boyutlarının karşılaştırılması (XRD)

Katkısız ve farklı oranlarda La, Eu, ve Er katkısıyla elde edilen ZnO filmlerinin SEM görüntüleri düşük (x50k) ve yüksek (x200k) büyütme oranlarında çekilmiştir. Elde edilen filmlerin düşük büyütmedeki SEM görüntüleri incelendiğinde, film yüzeylerinin çatlak, boşluk ve gözenekler olmadan düzgün ve homojen olarak sürekli bir yapıda olduğu ve *p-Si* alttaşlarının iyi bir şekilde kaplandığı görülmüştür. Yüksek büyütmedeki SEM görüntülerinden ise, film yüzeylerinin şekilsel olarak birbirinden farklı olmadığı, ancak; farklı büyüklüklerdeki dairesel tanelerden oluştuğu görülmüştür. Elde edilen katkısız ve La, Eu ve Er katkılı ZnO filmlerinin SEM görüntüleri, literatürde rapor edilen diğer çalışmalar ile uyumludur [20, 24, 26, 31, 108-111].

La katkısı ile elde edilen ZnO filmlerinin SEM görüntüleri incelendiğinde, katkı ile beraber dairesel şekillerin yapısının değişmediği ancak tane boyutlarında değişimler olduğu görülmüştür. Image-J programı yardımıyla ortalama tane boyutları hesaplanmış ve en büyük ortalama tane boyutlu filmin ZLa-04 filmi, en küçük ortalama tane boyutuna sahip filmin ise ZLa-1 filmi olduğu görülmüştür. Katkı ile önceleri taneler büyürken, artan katkı miktarı ile yapıda bozulmalar başlamış ve tane boyutları küçülmüştür. Yüzey pürüzlülük oranları incelendiğinde ise en küçük pürüzlülük oranının ZLa-04 ($\bar{Y}=66,0$) filmine ait olduğu görülmüştür. Eu katkılı ZnO filmleri için hesaplanan ortalama tane boyutlarında ise en büyük tane boyutunun ZEu-02 filmine ait olduğu görülmüştür. Pürüzlülük oranları incelendiğinde ise, en küçük pürüzlülüğe sahip filmin yine ZEu-02 ($\bar{Y}=59,7$) filmi olduğu görülmüştür. Elde edilen Er katkılı ZnO filmleri incelendiğinde, ZEr-02 (28,2nm) filminde daha büyük taneler oluştuğu görülmüştür. En küçük tane boyutu ise ZEr-1 (19,3nm) filminde oluşmuştur. Artan katkı ile tane boyutları önceleri büyürken, katkı miktarının artmasıyla yapıda bozulmalar olmaya başlamıştır. Artan katkı miktarının hem tane boyutunda azalmaya, hem de yüzey morfolojisinin bozulmasına sebep olduğu görülmüştür. Yüzey pürüzlülük oranları incelendiğinde, en küçük pürüzlülük oranının ise ZEr-1 ($\bar{Y}=63,5$) filmine ait olduğu görülmüştür. Film yüzeyinde oluşan pürüzlülük ve girinti çıkıntılar aygıt performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Elde edilen sonuçlar XRD ile uyum içerisindedir.

Şekil 5.2’de elde edilen bütün ZnO filmlerinin ImageJ programı kullanılarak hesaplanan tane boyutlarının karşılaştırılması verilmiştir. En büyük tane boyutunun ZLa-04 filmine ait olduğu belirlenmiştir. Küçük katkı değerlerinde tane boyutu büyümüş, katkı

miktarının artmasıyla tane boyutu yeniden küçülmüştür. Benzer durum XRD sonuçlarında da elde edilmiştir.

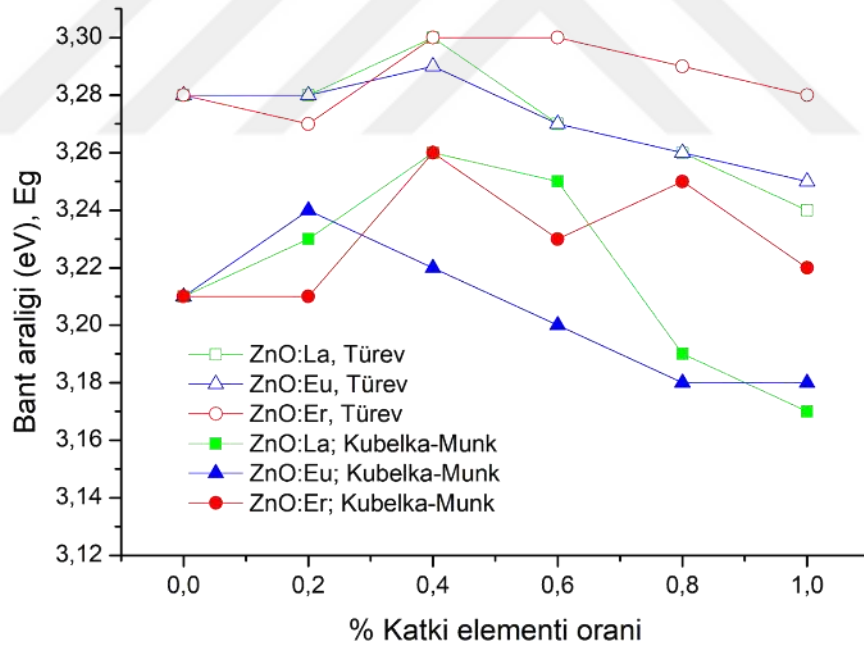


Şekil 5.2. Elde edilen bütün ZnO filmlerinin tane boyutlarının karşılaştırılması (SEM)

Katkısız ve farklı oranlarda La, Eu ve Er katkısı ile elde edilen ZnO filmlerin E_g değerlerini belirleyebilmek için, difüz yansıma spektrumlarından yararlanılmış ve 300-500nm aralığındaki spektrumları çizilmiştir. Bu spektrumlarda 375-450nm dalgaboyu aralığında geniş bir pik göze çarpmaktadır ve bu pikin pozisyonu katkı elementinin çeşidi ve miktarına bağlı olarak değişmektedir. Bu da filmlerin optik bant aralıklarının katkı ile kontrol edilebileceğini göstermektedir. E_g değerlerini belirleyebilmek için “diferansiyel yansıma” yöntemi ve “Kubelka-Munk teorisi” kullanılmıştır. La katkılı ZnO filmleri için, her iki yöntemle de hesaplanan E_g değerleri incelendiğinde; katkı ile beraber E_g değerinin önce arttığı (22meV, 50meV), daha sonra yeniden azaldığı (61meV, 90meV) görülmüştür. En büyük E_g değeri ZLa-04 filmine aittir. En küçük E_g değeri ise, en büyük La katkısı yapılan ZnO filminde (ZLa-1) elde edilmiştir. Bu durum, katkı atomlarının optik bant aralığı içine yerleşerek, bant kuyruklarının oluşmasına sebep olmasına atfedilebilir. Elde edilen E_g değerleri literatür ile uyum içerisindedir [112, 113]. Eu katkısı ile elde edilen ZnO filmleri için de iki farklı yöntem kullanılarak E_g değeri hesaplanmıştır. Optik bant aralığındaki daralma toplam 22meV değerindedir. Katkı miktarının artması ile birlikte E_g değerleri azalma eğilimi göstermiştir. Bu küçük farkın nedeni, katkı ile birlikte oluşan kusurlara, taşıyıcı konsantrasyonu değişimine ve yeni taşıyıcıların oluşturduğu saçılma merkezlerinin varlığına atfedilebilir. Eu⁺³, un iyonik

yarıçapının, Zn^{+2} 'nin iyonik yarıçapından büyük olması da ZnO örgüsünde kusurların oluşmasına sebep olabilir. Kubelka-Munk teorisi yardımıyla hesaplanan E_g değerlerinin, katkı ile beraber önce arttığı (30meV), katkının daha da artması ile azaldığı (60meV) görülmüştür. Er katkısı ile elde edilen ZnO filmlerinin hesaplanan E_g değerleri incelendiğinde katkı ile beraber E_g değerinin değiştiği görülmüştür, ancak bu değişim çok küçük miktarlarda olmuştur. Her iki yöntemde de en yüksek E_g değeri ZEr-04 filminde elde edilirken, en küçük E_g değeri ZEr-02 filminde elde edilmiştir. Diferansiyel yansıma yöntemiyle 30meV değerinde ve Kubelka-Munk teorisi ile 50meV değerinde bir değişim gözlenmiştir. Katkı ile birlikte E_g değerlerinin düzensiz bir şekilde azalıp arttığı görülmüştür.

Şekil 5.3'te elde edilen tüm filmlere ait E_g değerleri verilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar her iki yöntem için de karşılaştırıldığında en yüksek E_g değeri ZLa-04 ve ZEr-04 filmlerine ait olduğu görülmüştür.

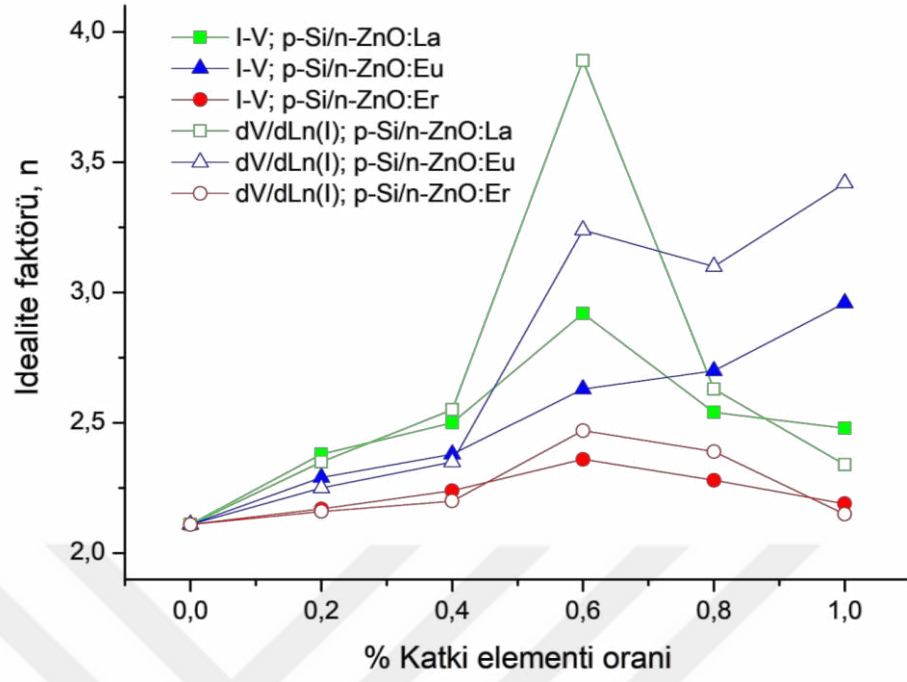


Şekil 5.3. Elde edilen bütün ZnO filmlerinin optik band aralıklarının karşılaştırılması

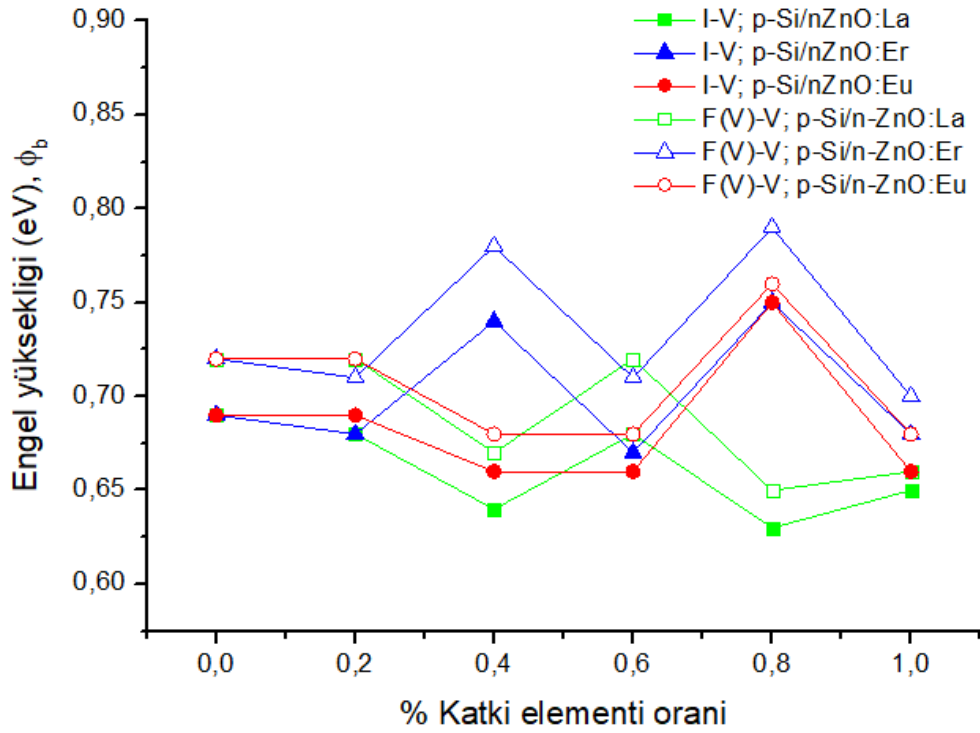
Farklı katkılar ve oranlarda elde edilen p -Si/ n -ZnO heteroeklemlerinin elektriksel karakterizasyonu için, uygun metaller kullanılarak alt ve üst omik kontaklar yapılarak; Au/p -Si/ n -ZnO/Al, Au/p -Si/ n -ZnO:La/Al, Au/p -Si/ n -ZnO:Eu/Al ve Au/p -Si/ n -ZnO:Er/Al heteroeklem yapıları oluşturulmuştur. I - V ölçümleri alınan yapıların, birer doğrultucu olarak davrandığı belirlenmiş ve diyot parametreleri (n , ϕ_b ve R_s değerleri) geleneksel TE

teori, Norde ve Cheung yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. İdeal bir diyot için n değerinin 1 ve kullanılan malzemeler göz önüne alındığında ϕ_b değerinin 0,72eV olması beklenirken, bu değerlerden sapmalar olduğu görülmüştür. $Au/p-Si/n-ZnO:La/Al$ heteroeklem diyotları arasında en düşük n değeri, DZLa-02 heteroeklem diyotuna aittir. n değerinin 1'den büyük olmasının nedeni, arayüzey durumlarının varlığı ile açıklanabilir. Bu tabakanın varlığı ise, kaplama işlemi başlamadan önce $p-Si$ alttaşının havayla teması sonrası oksit bir tabakanın oluşmuş olmasıyla açıklanabilir. R_s 'nin varlığı da n değerini etkilemiştir. Bu durum DZLa-06 diyotunun sonuçları incelediğinde açıkça göze çarpmıştır. En yüksek n ve en yüksek R_s değeri bu diyota aittir. İki farklı yöntemle hesaplanan R_s değerlerinin farklı olmasının nedeni ise, Cheung modelinde hesaplama yapılırken yüksek voltaj bölgesinin, Norde modelinde ise tüm voltaj bölgesinin kullanılmasıdır. Yöntemler arasındaki bu farklılık, elde edilen sonuçları da küçük oranlarda etkilemiştir. $Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al$ heteroeklem diyotları arasında en düşük n değerinin, DZEu-02 diyotuna ait olduğu belirlenmiştir. Eu katkı miktarı arttıkça n değerinin arttığı görülmüştür. İki farklı yöntem kullanılarak hesaplanan R_s değerlerinin $k\Omega$ mertebesinde olduğu ve genel olarak birbiri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Ancak, Eu katkı miktarına bağlı olarak düzenli bir değişim olmadığı belirlenmiştir. $Au/p-Si/n-ZnO:Er/Al$ heteroeklem diyotları arasında en düşük n değeri, D-ZEr02 diyotuna aittir. Katkı oranı arttıkça n değeri önce artmış, sonra azalamaya başlamıştır. İdealite faktörünün 1'den büyük çıkmasının nedeni ise, diyot eklemine yer alan arayüzey durumlarının varlığının neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca deneyler esnasında kullanılan $p-Si$ alttaşlarının havayla teması sonucu oluşan oksit tabaka da n , ϕ_b ve R_s değerlerini etkileyebilir. Elde edilen bütün sonuçlar literatür ile uyumludur [15, 114-123].

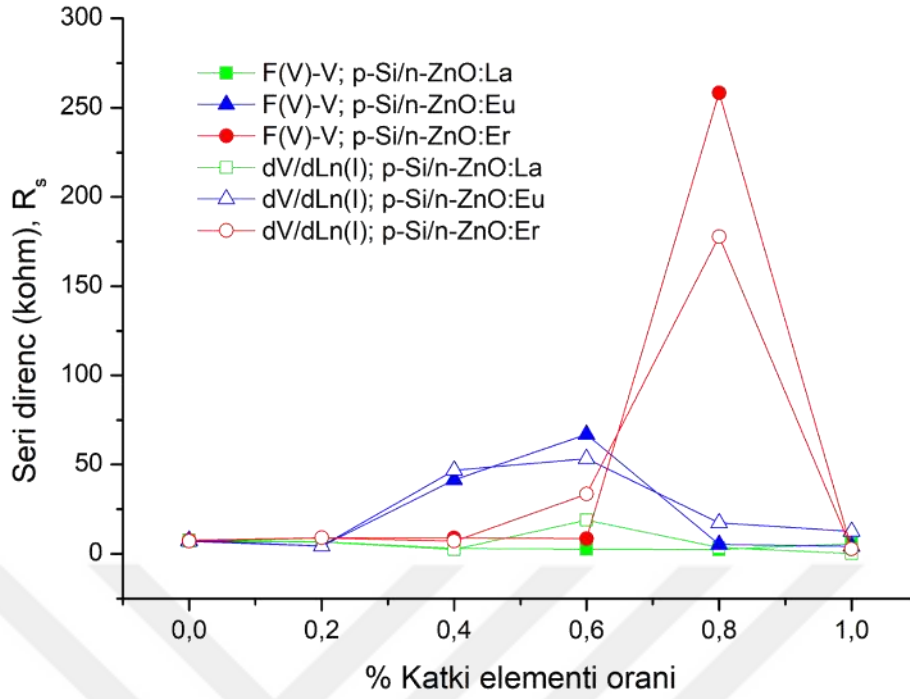
Fabrikasyonu yapılan bütün $p-n$ heteroeklem diyaotlarının üç farklı metot kullanılarak hesaplanan n , ϕ_b ve R_s değerlerinin katkı elementinin miktarına göre değişim grafikleri sırasıyla Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.4. Elde edilen heteroeklem diyotların idealite faktörlerinin katkı elementlerinin miktarına göre değişimi.



Şekil 5.5. Elde edilen heteroeklem diyotların engel yüksekliklerinin katkı elementlerinin miktarına göre değişimi.



Şekil 5.6. Elde edilen heteroeklem diyotların seri dirençlerinin katkı elementlerinin miktarına göre değişimi.

Elde edilen heteroeklem diyotların fotodiyot özelliklerini incelemek için farklı aydınlatma şiddetleri ($20\text{-}100\text{mWcm}^{-2}$) altında I - V ölçümleri yapılmıştır. Er katkılı filmler kullanılarak elde edilen $Au/p\text{-Si}/n\text{-ZnO:Er}/Al$ diyotlarının I - V ölçümleri farklı ışık şiddetlerinden etkilenmemiş, yani bu diyotlar fotodiyot özellik göstermemiştir. La katkısı ile elde edilen $Au/p\text{-Si}/n\text{-ZnO:La}/Al$ heteroeklem diyotlarının ters beslem fotoakım değerleri ışığın uygulanması ile ışık şiddetine bağlı olarak artmıştır. Işık altında akım ve gerilimde meydana gelen bu değişim, $Au/p\text{-Si}/n\text{-ZnO:La}/Al$ heteroeklem diyotunun fotovoltajik davranış sergilediğini göstermiştir. -2V değeri için logaritmik $I_{ph} - P$ grafikleri çizilmiş, bu grafiklerin eğimi kullanılarak da m değerleri hesaplanmıştır. $Au/p\text{-Si}/n\text{-ZnO:La}/Al$ fotodiyotlarının m değerlerinin $0,49$ ile $1,32$ arasında değiştiği görülmüştür. m değerleri, elde edilen fotodiyotun bant aralığında bulunan tuzak seviyelerinin yoğunluğu ile ilgili bilgiler vermektedir. m , $0,5$ ile 1 arasında değer almışsa, bant aralığındaki tuzak seviyelerinin sürekli bir dağılım gösterdiği, daha yoğun olduğu ve kristal yapıda bozulmalar olduğu anlamını taşır. Eğer bu değer 1 'den büyükse, bant aralığında daha az tuzak seviyeleri olduğunu ve kristal yapının daha az bozulduğu söylenebilir [124]. Işığa en duyarlı diyotun (m değeri en yüksek) DZLa-08 fotodiyotu olduğu belirlenmiştir. Eu katkısı ile elde edilen $Au/p\text{-Si}/n\text{-ZnO:Eu}/Al$ heteroeklem

diyotlarında da ışık şiddeti arttıkça diyotun ters beslem akımı artmıştır. $Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al$ fotodiyotlarının m değerleri, yine -2V değeri için logaritmik $I_{ph} - P$ grafikleri kullanılarak hesaplanmış ve 0,46 ile 1,16 arasında değiştiği belirlenmiştir. $Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al$ fotodiyotları arasında en yüksek m değeri DZEu-02 fotodiyotuna aittir. Bu fotodiyotun ışık şiddetine bağlı olarak ters beslem akımında değişim göstermesi yani ışığa duyarlı olması, fotosensör olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Bu tez çalışmasında yapılan çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda katkı miktarının ve katkı türünün elde edilen filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Tez çalışmaları süresince yapılan deneysel çalışma ve sonuçlarının bir kısmı, ulusal ve uluslararası konferanslarda sunulmuş, dergilerde yayınlanmıştır [127-132]. Katkı elementinin miktarı ve türü değiştirilerek elde edilen ZnO filmlerinin ve dolayısıyla bu filmler kullanılarak oluşturulan $p-n$ heteroeklem diyotlarının özellikleri istenilen doğrultuda değiştirilebilir.

Sonuç olarak, katkısız ve farklı La, Eu ve Er katkı oranları kullanılarak elde edilen ZnO filmlerinin heteroeklem diyot üretimi için uygun olduğu; ayrıca La ve Eu katkılı ZnO filmleri kullanılarak oluşturulan $Au/p-Si/n-ZnO:La/Al$ ve $Au/p-Si/n-ZnO:Eu/Al$ heteroeklem diyotlarının fotodiyot olarak da kullanılabileceği belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Braun, F. (1874). Über die stromleitung durch schwefelmetalle. *Ann. Phys. Chem.*, 229, 556-563.
- [2] Bose, J.C. (1904). Detector for electrical disturbances. U.S. Patent, 755,840.
- [3] Wilson, A.H. (1931). The theory of electronic semi-conductors. *Proc. Roy. Soc. A*, 133(822), 458-491.
- [4] Schottky, W. (1938). Halbleitertheorie der Sperrschicht. *Naturwissenschaften*, 26(52), 843.
- [5] Mott, N.F. (1966). *Proc. Camb. Phil. Soc.*, 3 4, 569.
- [6] Morkoç, H., Özgür, Ü. (2009). Zinc Oxide: Fundamentals, Materials and Device Technology. Wiley Company, Germany, 488.
- [7] Ilgu, G., Caglar, Y., Ilican, S., Caglar, M., Ruzgar, S. (2014). The effect of sol concentration on the structural and electrical parameters of nanostructure ZnO films by sol gel dip coating. *J. Nanoelectron. Optoe.*, 9, 622-627.
- [8] Sathya M., Claude A., Govindasamy P., Sudha K. (2012). Growth of pure and doped ZnO thin films for solar cell applications. *Adv. Appl. Sci. Res.*, 3 (5), 2591-2598.
- [9] Raja, M., Muthukumarasamy, N., Velauthapillai, D., Balasundaraprabhu, R., Agilan, S., Senthil, T.S. (2014). Studies on bundle like ZnO nanorods for solar cell applications. *Sol. Energy*, 106, 129-135.
- [10] Zhu L., Zeng W. (2017). Room-temperature gas sensing of ZnO-based gas sensor: A review. *Sensor. Actuat. A-Phys.*, 267, 242–261.
- [11] Ates, T., Tatar, C., Yakuphanoglu, F. (2013). Preparation of semiconductor ZnO powders by sol gel method: Humidity sensors. *Sensor. Actuat. A-Phys.*, 190, 153-160.
- [12] Abdi, Y., Jebreil Khadem, S.M., Afzali, P. (2014). Resonantly excited ZnO nanowires for fabrication of high sensitivity gas sensor. *Curr. Appl. Phys.*, 14, 227-231.

- [13] Al-Hardan, N.H., Jalar, A., Abdul Hamid, M.A., Keng, L.K., Ahmed, N.M., Shamsudin, R. (2014). A wide-band UV photodiode based on n-ZnO/p-Si heterojunctions, *Sensor. Actuat. A-Phys.*, 207, 61-66.
- [14] Ilican S., Gorgun K., Caglar Y., Caglar M. (2017). Influence of Irradiation Time on Structural, Morphological Properties of ZnO-NRs Films Deposited by MW-CBD and Their Photodiode Applications. *J. Nanomaterials*, 2017, 1-12.
- [15] Alahmed, Z.A., Yakuphanoglu, F. (2013). The effects of microfibers on electrical characteristics of zinc oxide thin film transistor, *Microelectron. Eng.*, 110, 25-28.
- [16] Caglar Y., Caglar M., Ilican S., Aksoy S., Yakuphanoglu F. (2015). Effect of channel thickness on the field effect mobility of ZnO-TFT fabricated by sol gel process. *J. Alloys Compound.*, 621, 189-193.
- [17] Chen, J.T., Wang, J., Zhang, F., Zhang, G.A., Wu, Z.G., Yan, P.X. (2008). The effect of La doping concentration on the properties of zinc oxide films prepared by the sol–gel method, *J. Crys. Growth*, 310, 2627-2632.
- [18] Venkatesh, K. S., Vijayalakshmi, K., Karthick, K., Krishnamoorthi, S. R., Palani, N. S., Ilangoan, R. (2014). Fabrication of room temperature H₂ gas sensor using pure and La: ZnO with novel nanocorn morphology prepared by sol–gel dip coating method. *J. Mater. Sci: Mater. Electron.*, 25, 4339–4347.
- [19] Aal, N.A., Al-Hazmi, F., Al-Ghamdi, A., Hendi, A.A., Aloraimy, R.H., Nawar, A. M., El-Gazzar, S., El-Tantawy, F., Yakuphanoglu, F. (2014). Nanostructure lanthanum doped zinc oxide optical materials. *J. Nanoelectron. Optoe.*, 9(5), 628-638.
- [20] Ilican, S. and Ilgu, G. (2016). Electrical Properties of La Doped n-ZnO:La/p-Si Heterostructure Diode. *J. Nanoelectron. Optoe.*, 11(4), 401-406.
- [21] Shaban, M. and ElSayed, A.M. (2016). Effects of lanthanum and sodium on the structural, optical and hydrophilic properties of sol–gel derived ZnO films: A comparative study. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 41, 323-334.
- [22] Chaudharya, P., Singh, P., Kumar, V. (2018). Synthesis and characterization of pure ZnO and La-doped ZnO (Zn_{0.98} La_{0.02}O) films via novel sol-gel screen-printing method. *Optik*, 158, 376-381.

- [23] Maache, A., Chergui, A., Djouadi, D., Benhaoua, B., Chelouche, A., Boudissa, M. (2018). Effect of La doping on ZnO thin films physical properties: correlation between strain and morphology. *Optik*, Baskıda.
- [24] Ping, C., Jian, M., Lirong, R., Lin, G. (2006). Fabrication and Magnetic Properties of Highly Oriented ZnO : Eu Films by Sol-Gel Process. *J. Rare Earth.*, 24, 298-301.
- [25] Che, P., Meng, J., Guoa, L. (2007). Oriented growth and luminescence of ZnO:Eu films prepared by sol–gel process. *J. Lumin.*, 122-123, 168-171.
- [26] Turgut, G., Duman, S., Sonmez, E., Ozcelik, F.S., (2016). A study of Eu incorporated ZnO thin films: An application of Al/ZnO:Eu/p-Si heterojunction diode. *Mater. Sci. Eng. B*, 206, 9-16.
- [27] Ghosh, S., Kumar, M.K., Bhaktha, S. (2017). Heat-treatment controlled structural and optical properties of sol-gel fabricated Eu:ZnO thin films. *Opt. Mater.*, 64, 288-294.
- [28] Mao, C., Li, W., Wu, F., Dou, Y., Fang, L. Ruan, H., Kong C. (2015). Effect of Er doping on microstructure and optical properties of ZnO thin films prepared by sol–gel method. *J. Mater. Sci: Mater. Electron.*, 26, 8732-8739.
- [29] Bouhouche, S., Bensouici, F., Toubane, M., Azizi, A., Otmani, A., Chebout, K., Kezzoula, F., T-Ighil, R., Bououdina, M. (2018). Effect of Er³⁺ doping on structural, morphological and photocatalytical properties of ZnO thin films. *Mater. Res. Express.*, 5, 056407.
- [30] Ran, F., Miao, L., Tanemura, S., Tanemura, M, Cao, Y., Tanaka, S., Shibata, N. (2008). Effect of annealing temperature on optical properties of Er-doped ZnO films prepared by sol–gel method. *Mater. Sci. Eng. B*, 148, 35-39.
- [31] Kumari, V., Kumar, V., Malik, B.P., Mehra, R.M. (2012). Devendra Mohan Nonlinear optical properties of erbium doped zinc oxide (EZO) thin films. *Opt. Commun.*, 285(8), 2182-2188.
- [32] Miao, L., Tanemura, S., Zhao, L., Xiao, X., Zhang, X. T., (2013). Ellipsometric studies of optical properties of Er-doped ZnO thin films synthesized by sol–gel method. *Thin Solid Films*, 543, 125-129.

- [33] Vettumperumal, R., Kalyanaraman, S., Thangavel, R. (2015). Optical constants and near infrared emission of Er doped ZnO sol-gel thin films. *J. Lumin.*, 158, 493-500.
- [34] Ilican S. (2016). Structural, Optical and Electrical Properties of Erbium-Doped ZnO Thin Films Prepared by Spin Coating Method. *J. Nanoelectron. Optoe.*, 11(4), 465-471.
- [35] Asikuzun E., Ozturk O., Arda L., Tasci A.T., Kartal F., Terzioglu C. (2016). High-quality c-axis oriented non-vacuum Er doped ZnO thin films. *Ceram. Int.*, 42, 8085-8091.
- [36] Phan, L., Yu, S.C., Vincent, R., Dan, N.H., Shi, W.S. (2010). Photoluminescence properties of various CVD-grown ZnO nanostructures. *J. Lumin.*, 130, 1142-1146.
- [37] Su, C., Lu, Y.M., Zhang, Z.Z., Shan, C.X., Yao, B., Li, B.H., Shen, D.Z., Zhang, J.Y., Zhao, D.X., Fan, X.W. (2008). The optical properties of ZnO/ZnMgO single quantum well grown by P-MBE. *Appl. Surf. Sci.*, 254, 7303-7305.
- [38] Dimova-Malnovska, A.P., Sendova-Vassileva, M., Nichev, H. Ve Starbova, K. (2010). Preparation of ZnO nanowires by electrochemical deposition. *Enrgy. Proced.*, 2, 55-58.
- [39] Arslan, A., Hur, E., Ilican, S., Caglar, Y., Caglar, M. (2014). Controlled growth of c-axis oriented ZnO nanorod array films by electrodeposition method and characterization. *Spectrochim. Acta A*, 128, 716-723.
- [40] Imai M., Watanabe M., Tominaga H., Yoshino K., Ogomi Y., Shen Q., Toyoda T., Minemoto T., Hayase S. (2018). Growth Mechanism of ZnO Thin Films Grown by Spray Pyrolysis Using Diethylzinc Solution. *Phys. Status Solidi A*. 215, 1700406.
- [41] Yakuphanoglu, F., Ilican, S., Caglar, M., Caglar, Y. (2007). The determination of the optical band and optical constants of non-crystalline and crystalline ZnO thin films deposited by spray pyrolysis. *J., Optoelectron. Adv. M.*, 9(7), 2180-2185.
- [42] Aryanto D., Jannah W. N., Masturi, Sudiro T., Wismogroho A. S., Sebayang P., Sugianto, Marwoto P. (2017). Preparation and structural characterization of ZnO thin films by sol-gel method. *Journal of Physics: Conf. Series*. 817, 012025.

- [43] Aksoy, S., Caglar, Y., Ilican, S., Caglar, M. (2011). Sol-gel derived zinc oxide films: Effect of deposition parameters on structure, microstructure and photoluminescence properties. *Superlattice. Microst.*, 50(5), 470-479.
- [44] Inbaraj, P. F. H. and Prince, J. J. (2018). Optical and structural properties of Mg doped ZnO thin films by chemical bath deposition method. *J. Mater. Sci: Mater. Electron.*, 29(2), 935-943.
- [45] Alvi, N. H. (2011). *Luminescence Properties of ZnO Nanostructures and Their Implementation as White Light Emitting Diodes (LEDs)*, Sweden: Linköping University, Institute of Technology.
- [46] Özgür, Ü., Alivov, Y. I., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, M. A., Doğan, S., Avrutin, V., Cho, S.-J., Morkoç H. (2005). A comprehensive review of ZnO materials and devices. *J. Appl. Phys.*, 98, 041301.
- [47] Demirci, B., (2006). *İndiyum Katkılı ZnO İnce Filmlerinin Bazı Fiziksel Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir: Anadolu Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [48] Aydın, H., (2013). *ZnO Esaslı Nanoyapılı Yarıiletken İnce Filmlerin Büyütülmesi ve Gaz Sensörlerinin Üretilmesi*, Doktora Tezi, Elazığ: Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
- [49] Yıldız, N. (Eylül 2016), Nadir Toprak Elementleri, Ankara.
- [50] Sen, P., Kusu, E., Ak, S. (2012). Nadir Toprak Elementler, Özellikleri, Cevherleşmeleri ve Türkiye Nadir Toprak Element Potansiyeli. Bilgi Dağırcığı, *MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, 13, 1-8.
- [51] Unal, I. H. (2015), Katma Değeri Yüksek Teknolojik Ürünlerin Vazgeçilmeyen Hammaddeleri: NTE'ler, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
- [52] Nadir Toprak Elementleri, Yıldız Teknik Üniversitesi Yıldız Araştırmacı Bilgi Sistemi YARBIS, (Erişim Tarihi: Aralık 2014), <http://www.yarbis1.yildiz.edu.tr>
- [53] Sahiner, M., Akgok, Y. Z., Arslan, M., Ergin M. H. (2017). Dünya'da ve Türkiye'de Nadir Toprak Elementleri, Maden Tetkik ve Arama Genel Mudurlugu, Ankara.
- [54] <https://www.lenntech.com/periodic/elements/la.htm>, (Erişim Tarihi: 03.02.2018.)

- [55] <http://www.rareelementresources.com/rare-earth-elements/rare-earths-at-bear-lodge>, (Erişim Tarihi: 03.02.2018.)
- [56] <http://www.rsc.org/periodic-table/element/63/europium>, (Erişim Tarihi: 25.05.2018.)
- [57] <https://www.lenntech.com/periodic/elements/er.htm>, (Erişim Tarihi: 03.02.2018.)
- [58] Brinker, C .J., Scherer, G.W. (1990). Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing, Academic Press, San Diego, 2656.
- [59] George, J. (1992). Preparation of Thin Films, Marcel Dekker Inc., New York.
- [60] Sener, D. (2006), *Sol-Gel Yöntemiyle Hazırlanan Metal Oksit İnce Filmlerin Elektriksel, Yapısal ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara: Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [61] Klein, L. C. (1988). Sol-Gel Technology for Thin Films, Fibers, Preforms, Electronics, and Specialty Shapes, Noyes Publications, 55.
- [62] Sheppard, L. M. (1992). Advances in Processing of Ferroelectric Thin Films. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 71(1), 85-95.
- [63] Sorar, İ., (2008). *Katkılı ve Katkısız Çinko Oksit (ZnO) İnce Filmlerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu*, İstanbul: Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [64] Spin Coating Theory (Ekim 2013), Micro/Nano Technology Center, University of Louisville. <https://louisville.edu/micronano/files/documents/standard-operating-procedures/SpinCoatingInfo.pdf>
- [65] Kittel, C. (2014), *Katıhal Fiziğine Giriş*. (Çeviren: Öngüt G., Öngüt D.), Palme Yayıncılık
- [66] Neamen, D.A. (2006). Semiconductor physics and devices. (3. Baskı). New York: McGraw-Hill Companies.
- [67] Colinge, J.P., Colinge, C.A. (2011). *Yarıiletken Devre Elemanları Fiziği*, (Çeviren: Tüzemen, S., Tekmen, S), Nobel Yayın Dağıtım.

- [68] Aydın, S.G. (2010). *Al/PNpClPhPPy/p tipi-Si Konağın Elektronik Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [69] Yıldız M. (2012). *Çinko Ftalosiyanın Tabanlı Heteroeklemin Elektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Diyarbakır: Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [70] Hamidi Ş. (2011). *Organik Yarıiletken/İnorganik Yarıiletken Heteroeklem Diyodunun Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Diyarbakır: Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [71] Cullity, B. D. (1956). *Elements of X-Ray Diffraction*. United States of America: Addison-Wesley Publishing Company Inc.
- [72] İlgu, G. (2012). *Tek Kristal X-ışınları yöntemi ile $C_{21}H_{19}N_3OS$, $C_{17}H_{22}N_2S$, $C_{19}H_{25}N_3O$ Kristallerinin Yapı Analizi*, Samsun: Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [73] Sears, R., Zemansky, W. (1982). *Optik ve Modern Fizik*, Modern Üniversite Fiziği Cilt 3, (Çeviren: Domaniç, F.), Çağlayan Kitabevi, Ankara.
- [74] Dikici, M. (1993). *Katıhal Fiziğine Giriş*, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Yayınları, Samsun.
- [75] Hook, J. R., Hall, H. E., (1999). *Katıhal Fizigi*, John Willey & Sons. Inc.
- [76] Sümer, A., (1966). *X-Işınlarının Difraksiyonu*, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası.
- [77] Jaya, P. N., Jayakrishnan, R., Nandu, B. C., Pandey, R. K. (1998). In situ Sb-doped CdTe films. *Semicond. Sci. Technol.*, 13, 340-344.
- [78] Kittel, C. (2005). *Introduction to Solid State physics*. (8. Baskı). United States of America: John Wiley and Sons, Inc.
- [79] Kaelble E. (1967). *Handbook of X-rays for Diffraction, Emission, Absorption and Microscopy*. (6. Baskı). New York: McGraw-Hill.

- [80] Hassanien, A. S., Akl, A. A., S  aedi, A. H. (2018). Synthesis, crystallography, microstructure, crystal defects, and morphology of $\text{Bi}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ nanoparticles prepared by sol-gel technique. *Cryst. Eng. Comm.*, 20, 1716-1730.
- [81] Williamson, G. K., Smallman, R. E. (1956). Dislocation Densities in Some Annealed and Cold-Worked Metals from Measurements on the X-Ray Debye-Scherrer Spectrum. *Philosophical Magazine*, 1(1), 34-45.
- [82] Fitzpatrick, M. E., Fry, A. T., Holdway, P., Kandil, F.A., Shackleton, J., Suominen, L. (2005). Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction (Issue 2). Measurement Good Practice Guide No. 52, United Kingdom.
- [83] Hong, H., Huang, J., He, H., Fan, Z., Shao, J. (2005). Influence of different post-treatments on the structure and optical properties of zinc oxide thin films. *Appl. Surf. Sci.*, 242, 346-352.
- [84] Bateman, T. B. (1962). Elastic Moduli of Single-Crystal Zinc Oxide. *J. Appl. Phys.*, 33, 3309-3312.
- [85] https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1986/ruska-bio.html, (Erişim: 12.03.2018).
- [86] Erdin, N. (1986). *Taramalı Elektron Mikroskopunun Temel Prensipleri ve Numune Hazırlama*, İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, B-36-2.
- [87] Gül, A. (2002). *ZnO İnce Filmlerinin Hazırlanması ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli: Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [88] (https://embryology.med.unsw.edu.au/embryology/index.php/File:Microscopy_LM_and_SEM_cartoon.jpg), (Erişim Tarihi: 11.03.2018).
- [89] Yıldırım, E. (2013). *ZnSe Yarıiletken İnce Filmlerinin Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Mersin: Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [90] Skoog, D.A., Holler, F.J. ve Nieman, T.A. (1998). *Enstrümental Analiz İ keleri*, (  evirmen: Kılıç E., Köseoğlu F., Yılmaz H.), Bilim Yayınları, Ankara.
- [91] Krunks, M., Bijakina, O., Verema, T., Mıklı, V., Mellikov, E. (1999). Structural and optical properties of sprayed CuInS_2 films. *Thin Solid Films*, 338, 125-130.

- [92] Pankove, J.I. (1971). *Optical Processes in Semiconductors*, Princeton Press, New Jersey.
- [93] Escobedo Morales, A., Sánchez Mora, E., Pal, U. (2007). Use of diffuse reflectance spectroscopy for optical characterization of un-supported nanostructures. *Rev. Mex. Física S.*, 53 (5), 18-22.
- [94] Senthilkumar, V., Vickraman, P., Ravikumar, R. (2010). Synthesis of fluorine doped tin oxide nanoparticles by sol-gel technique and their characterization. *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, 53 (2), 316-321.
- [95] Mead, C.A. (1966). Metal-Semiconductor Surface Barriers, *Sol. St. Electronics*, 9, 1023-1033.
- [96] Aksoy, S. (2017). *Sol Jel Spin Kaplama Yöntemiyle Elde Edilen Nano Yapılı Metal Oksit Filmlerinin Fiziksel Karakterizasyonu*, Doktora Tezi, Eskişehir: Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [97] Rhoderick E. H. ve Williams R. (1988). *Metal-Semiconductor Contacts*. Oxford. Clarendon Press; New York: Oxford University Press.
- [98] Cheung, S. K. ve Cheung, N. W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Appl. Phys. Lett.*, 49 (2), 85–87.
- [99] Norde, H. (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *J. Appl. Phys.*, 50 (7), 5052-5053.
- [100] Bıyıklı, N. (1998). *Design, Fabrication and Characterization of High Performance Resonant Cavity Enhanced Photodetectors*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara: Bilkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [101] Gündüz, B. (2007). *Organik Yarıiletken Fotodiyotların Hazırlanması ve Optoelektronik Özelliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ: Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [102] Johnson, M. (2003). Photodetection and Measurement. Blacklick, OH, USA: McGraw-Hill Professional Publishing, p. 14, 15.
- [103] Boylestad, R. ve Nashelsky, L., (1998). *Other two terminal devices, Electronic Devices and Circuit Theory*, Prentice Hall, Ohio, 833-834.

- [104] Çavaş, M. (2011). *Nano Yapılı Metal Oksit Yarıiletkenler Kullanılarak Foto Diyotların Üretilmesi*, Doktora Tezi, Elazığ: Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [105] Xu, J., Hao, S., Duan, X., Gu, S., Meng, X. (2013). Preparation and photoelectric properties of La-doped ZnO films. *J. Mater. Sci: Mater. Electron.*, 24, 4175-4179.
- [106] Lee, J. S., Kim, Y. J. (2012). Infra-red emission properties of ZnO:Er thin films prepared on the sapphire substrates. *Ceram. Inter.*, 38S, S585-S588.
- [107] Choi, M. H., Ma, T. Y. (2008). Erbium concentration effects on the structural and photoluminescence properties of ZnO:Er films. *Mater. Lett.*, 62, 1835-1838.
- [108] Xu, D., Jiang, B., Cui, F., Yang, Y., Xu, H., Song, Q., Yu, R. (2014). Microstructure and electrical properties of La₂O₃-doped ZnO-based varistor thin films by sol-gel process. *J. Cent. South Univ.*, 21, 9-13
- [109] Bouznit, Y., Beggah, Y., Ynineb, F. (2012). Sprayed lanthanum doped zinc oxide thin films. *Appl. Surf. Sci.*, 258, 2967-2971.
- [110] Aroutiounian, V., Arakelyan, V., Aleksanyan, M., Shahnazaryan, G., Kacer, P., Picha, P., Kovarik, J., Pekarek, J., Joost, B. (2018). Thin-film SnO₂ and ZnO detectors of hydrogen peroxide vapors. *J. Sens. Sens. Syst.*, 7, 281-288.
- [111] Li, S. Q., Yao, C. B., Cai, Y., Han, Y., Zhang, K. X., Wen, X., Yin, H. T., Li, Q. H., Sun, W. J. (2018). Nonlinear absorption properties and excitedstate charge-transfer dynamics of Er doped ZnO films. *Opt. Mater. Exp.*, 8(11), 3262-3276.
- [112] Habashyani, S., Ozmen, A., Aydogan, S., Yilmaz, M. (2018). An examination of correlation between characteristic and device performance of ZnO films as a function of La content. *Vacuum*, 157, 497-507.
- [113] Mrabet, C., Kamoun, O., Boukhachem, A., Amlouk, M., Manoubi, T. (2015). Some physical investigations on hexagonal-shaped nanorods of lanthanum-doped ZnO. *J. Alloy. Compound.*, 648, 826-837.
- [114] Sharma, S. K., Bhowmik, B., Pal, V., Periasamy, C. (2017). Electrical and methanol sensing characteristics of RF rputtered n-ZnO/p-Si heterojunction diodes. *IEEE Sensors J.*, 17(22), 7332-7339.

- [115] Chebil, W., Gokarna, A., Fouzri, A., Hamdaoui, H., Nomenyo, K., Lerondel, G. (2019). Study of the growth time effect on the structural, morphological and electrical characteristics of ZnO/p-Si heterojunction diodes grown by sol-gel assisted chemical bath deposition method. *J. Alloy. Compound.*, 771, 448-455.
- [116] Chaabouni, F., Abaab, M., Rezig, B. (2006). Characterization of n-ZnO/p-Si films grown by magnetron sputtering. *Superlattice. Microst.*, 39, 171-178.
- [117] Ilican, S., Gorgun, K., Aksoy, S., Caglar, Y., Caglar, M. (2018). Fabrication of p-Si/n-ZnO:Al heterojunction diode and determination of electrical parameters. *J. Mol. Struct.*, 1156, 675-683.
- [118] Singh, S. K., Hazra, P. (2017). Performance of RF sputtered p-Si/n-ZnO nanoparticle thin film heterojunction diodes in high temperature environment. *Appl. Surf. Sci.*, 400, 206-211.
- [119] Yıldırım, M. ve Kocyigit, A. (2018). Characterization of Al/In:ZnO/p-Si photodiodes for various In doped level to ZnO interfacial layers. *J. Alloy. Compound.*, 768, 1064-1075.
- [120] Ilican, S., Caglar, M., Aksoy, S., Caglar, Y. (2016). XPS Studies of Electrodeposited Grown F-Doped ZnO Rods and Electrical Properties of p-Si/n-FZN Heterojunctions. *J. Nanomater.*, 6729032.
- [121] Coşkun, B., Darkwa, K. M., Soylu, M., Al-Sehemi, A. G., Dere, A., Al-Ghamdih, A., Gupta, R. K., Yakuphanoglu, F. (2018). Optoelectrical properties of Al/p-Si/Fe:N doped ZnO/Al diodes. *Thin Solid Films*, 653, 236-248.
- [122] Khalfallah, B., Chaabouni, F., Abaab, M. (2014). n-ZnO:Ga / p-Si heterojunction diodes grown by RF magnetron sputtering using powder target. *Nano Tech. Nano Sci. Ind. J.*, 8(11), 438-444.
- [123] Turgut, G., Duman, S., Keskenler, E. F. (2015). The influence of Y contribution on crystallographic, topographic and optical properties of ZnO: A heterojunction diode application. *Superlatt. Microstruct.*, 86, 363-371.
- [124] Mekki, A., Ocaya, R.O., Dere, A., Al-Ghamdi, A. A., Harrabi, K., Yakuphanoglu, F. (2016). New photodiodes based graphene-organic semiconductor hybrid materials. *Synthetic Met.*, 213, 47-56.

- [125] Yakuphanoglu, F. (2010). Electrical and photovoltaic properties of cobalt doped zinc oxide nanofiber/n-silicon diode. *J. Alloy. Compound.*, 494, 451-455.
- [126] Gupta, B., Jain, A. Mehra, R.M. (2010). Development and Characterization of Sol-gel Derived Al Doped ZnO/p-Si Photodiode. *J. Mater. Sci. Technol.*, 26(3), 223-227.
- [127] Ilgu Buyuk, G., Ilican, S., Caglar, Y., Caglar, M. (2016). Sol-Jel Yöntemi ile Elde Edilen Er Katkılı ZnO Filmlerinin Yapısal, Morfolojik ve Optiksel Özellikleri, 22. *Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı*, Ankara: Ankara Üniversitesi, P41.
- [128] Ilgu Buyuk, G. ve Ilican, S., Caglar, Y., Caglar, M. (2017). Influence of Lanthanum Doping on Structural, Morphological and Optical Behavior of Sol Gel Derived Nanostructured Zinc Oxide Films, *4th International Conference on Materials Science and Nanotechnology for Next Generation*, Sarajevo, Bosnia, 206.
- [129] Ilican, S., Ilgu Buyuk, G., Caglar, Y., Caglar, M. (2017). Preparation of nanostructure ZnO:La film by low-cost sol gel method and determination of diode parameters of p-Si/n-ZnO:La heterojunctions, *6th Annual International Conference- Energy Efficiency and Engineering*, Durres, Albania, 107.
- [130] Ilgu Buyuk, G. ve Ilican, S. (2018). Sol jel yöntemi ile elde edilen ZnO:Eu filmlerinin SEM, XRD ve DRS analizi, *24. Yoğun Madde Fiziği – Ankara Toplantısı*, Ankara: Bilkent Üniversitesi, P11, 33.
- [131] Ilgu Büyük, G. ve Ilican, S. (2018). Nanoyapılı Lantan katkılı ZnO filmlerinin elde edilmesi ve karakterizasyonu. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9, 174-187.
- [132] Ilgu Buyuk, G. ve Ilican, S. (2018). ZnO:Eu filmlerinin mikroyapısal ve optik Özellikleri. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 141-153.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Gonca İLGÜ BÜYÜK
Doğum Yeri ve Yılı : Amasya-1987
E-mail : goncailgu@gmail.com

Öğrenim Durumu

Lisans : Ondokuz Mayıs Üniversitesi, 2006-2010
Yüksek Lisans : Ondokuz Mayıs Üniversitesi, 2010-2012
Doktora : Eskişehir Teknik Üniversitesi, 2012-2019

Yayınları:

1. **İlgü Büyük, G.**, Ilıcan, S. (2018). ZnO:Eu Filmlerinin Mikroyapısal ve Optik Özellikleri, *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 141-153.
2. **İlgü Büyük, G.**, Ilıcan, S. (2018). Nanoyapılı Lantan Katkılı ZnO Filmlerinin Elde Edilmesi ve Karakterizasyonu, *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9, 174-187.
3. Ilıcan, S., **İlgu, G.** (2016). Electrical Properties of *n*-ZnO:La/*p*-Si Heterostructure Diode, *J. Nanoelectron. Optoelectron.*, 11, 401-406.
4. **İlgu, G.**, Caglar, Y., Ilıcan, S., Caglar, M., Ruzgar, S. (2014). The Effect of Sol Concentration on the Structural and Electrical Parameters of Nanostructure ZnO Films by Sol Gel Dip Coating, *J. Nanoelectron. Optoelectron.*, 9(5):622-627.

Bilimsel Faaliyetleri:

1. **İlgü Büyük, G.**, Ilıcan, S., Sol Jel Yöntemi ile Elde Edilen ZnO:Eu Filmlerinin SEM, XRD ve DRS Analizi, 24. Yoğun Madde Fiziği – Ankara Toplantısı, Bilkent Üniversitesi, 21 Aralık 2018, Ankara.
2. Ilıcan, S., **İlgu Buyuk, G.**, Caglar, Y., Caglar, M., Preparation of nanostructure ZnO:La film by low-cost sol gel method and determination of diode parameters of p-Si/*n*-ZnO:La heterojunctions, 6th Annual International

Conference- Energy Efficiency and Engineering (UBT2017), October 27-29, 2017, Durres, Albania. (Sözlü bildiri).

3. **Ilgu Buyuk, G.**, Ilican, S., Caglar, Y., Caglar, M., Influence of Lanthanum Doping on Structural, Morphological and Optical Behavior of Sol Gel Derived Nanostructured Zinc Oxide Films, 4th International Conference on Materials Science and Nanotechnology For Next Generation (MSNG-2017), June 28-30, 2017, Sarajevo, BOSNIA.
4. **Ilgu Buyuk, G.**, Ilican, S., Caglar, Y., Caglar, M., Sol-Jel Yöntemi ile Elde Edilen Er Katkılı ZnO Filmlerinin Yapısal, Morfolojik ve Optiksel Özellikleri, 22. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, 16 Aralık, 2016, Ankara.
5. Ruzgar, S., **Ilgu, G.**, Caglar, M., Caglar, Y., Ilican, S. The Effect of the electrodeposition time on the physical properties of MgO films, 3th International Nanoscience and Nanotechnology for Next Generation (NaNoNG-2016) 20-22 October 2016, Kemer, Antalya/TURKEY.
6. **Ilgu, G.**, Ilican, S., Caglar, Y., Caglar, M., Eu Doped ZnO Nanostructure Films: Deposition and Characterization, Nanoscience & Nanotechnology For Next Generation (NanoNG2015) , October 29-31, 2015, Antalya, Türkiye.
7. **Ilgu, G.**, Ilican, S. “Effect of Lanthanum dopant on the Characterization of the Dip Coated ZnO Films” 1st International Conference on Organic Electronic Material Technologies (OEMT2015) March 25-28, 2015 Elazığ, TURKEY.
8. **Ilgu, G.**, Ilican, S., Caglar, Y., Caglar, M., Ruzgar, S., Turut, A. “Structural, Morphological and Electrical Properties of Undoped and Sb Doped ZnO Films” 1st International Conference on Organic Electronic Material Technologies (OEMT2015) March 25-28, 2015 Elazığ, TURKEY.
9. **Ilgu, G.**, Caglar, Y., Ilican, S., Caglar, M., Ruzgar, S., Turut, A. “Katkısız ve Sb Katkılı ZnO Filmlerinin Sol Jel Dip Kaplama Metodu İle Elde Edilmesi ve Yapısal, Morfolojik ve Elektriksel Karakterizasyonu” 20. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, Hacettepe Üniversitesi, 26 Aralık 2014.
10. **Ilgu, G.**, Caglar, Y., Ilican, S., Caglar, M., Ruzgar, S., Turut, A. “The Effect of Sol Concentration on The Structural and Electrical Parameters of Nanostructure ZnO Films by Sol Gel Dip Coating” NanoNG 14 International Conference, 20-22 August 2014, Elazığ/TURKEY.

Projeleri:

1. İlcan, S. (Prj. Yürütücüsü), **İlgü, G.** "Sol jel dip kaplama yöntemiyle elde edilen katkılı ZnO bazlı elektronik aygıtların morfolojik ve elektriksel özellikleri", AÜBAP, No: 1501F032, 2015-2019.
2. İlcan, S. (Prj. Yürütücüsü), Aksoy, S., **İlgü, G.** "La katkılı ZnO Filmlerinin Optik Parametreleri" AÜBAP, No: 1505F287, 2015-2016.
3. İlcan, S. (Prj. Yürütücüsü), Özkan, A. E., **İlgü, G.**, Aksoy, S. "Spin Kaplama Tekniği ile Elde edilen Nanoyapılı Çinko Oksit Filmlerinin Mikroyapı ve Optik Özelliklerine Magnezyum Katkısının Etkisi" AÜBAP, No: 1404F229, 2014-2015