



ZnSe İNCE FİLMLEİN KARAKTERİZASYON VE FABRİKASYONU

Esra BALCI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2022

ETİK BEYAN

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

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

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

Esra BALCI

...../...../.....

ZnSe İNCE FİLMLERİN KARAKTERİZASYON VE FABRİKASYONU
(Yüksek Lisans Tezi)

Esra BALCI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2022

ÖZET

Yapılan bu çalışmada, yaklaşık olarak 100 nm, 300 nm ve 600 nm olmak üzere üç farklı kalınlıkta, RF magnetron püskürtme tekniği ile i-Si ve cam alttaşlar üzerine ZnSe ince filmler büyütüldü. Diyot fabrikasyonuna en uygun kalınlığın kalibrasyonu için yapısal, morfolojik ve optik karakterizasyonlar yapılarak, film kalınlığının etkisi incelendi. Farklı film kalınlıklarının, yapısal, morfolojik ve optik özelliklerine etkisi sırasıyla XRD, XPS, AFM ve UV-Vis cihazları aracılığıyla araştırıldı. XRD ölçüm verileri doğrultusunda, örgü sabiti, tanecik boyutu ve gerinim (strain) gibi mikroyapısal parametreler hesaplanıp, film kalınlığının kaplanan filmler üzerine etkisi tartışıldı. Film kalınlığı arttıkça, ZnSe ince filmlerin tanecik boyutunda artış görülürken, gerinim değerlerinin azaldığı belirlendi. AFM ölçüm sonucunda elde edilen görüntüler, artan film kalınlığıyla birlikte, daha pürüzsüz ve homojen dağılmış bir film yüzeyinin elde edildiğini göstermektedir. UV-Vis ölçümleri sonucunda, ZnSe ince filmlerin film kalınlığının artmasıyla enerji bant aralığının arttığı gözlemlendi. Yapılan karakterizasyonlar sonucunda, yüksek kristal kalitesine ve yüksek enerji bant aralıklı 600 nm kalınlığına sahip ince film üzerine üretilen metal kontaklar ile Schottky diyot fabrikasyon çalışmaları yapıldı. Au, Ag ve Al olmak üzere üç farklı metal kontak kullanılarak, farklı metallerin elektriksel parametreler üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla yapılan Schottky diyotların elektriksel analizleri I-V ölçüm sistemiyle yapıldı. Elektriksel parametreler (seri direnç ve engel yüksekliği gibi) Termodiyonik Emisyon Teorisi, Cheung ve Norde fonksiyonları olmak üzere üç farklı metot kullanılarak hesaplandı ve karşılaştırıldı. Au/ZnSe/Si aygıt yapısına sahip Schottky diyotun diğer metal kontaklara göre daha iyi elektriksel parametrelere sahip olduğu görüldü. Uygun film kalınlığı ve metal kontak seçimiyle ince film uygulayım bilimine dayalı optoelektronik cihazların geliştirilmesinde literatüre önemli bir değer katacağı önerilmektedir.

Bilim Kodu : 20227

Anahtar Kelimeler : Çinko selenid (ZnSe), püskürtme sistemi, ince film, MS tipi Schottky engel diyotları

Sayfa Adedi : 61

Danışman : Prof. Dr. Semran SAĞLAM

CHARACTERIZATION AND FABRICATION OF ZnSe THIN FILMS

(M. Sc. Thesis)

Esra BALCI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2022

ABSTRACT

In this study, ZnSe thin films were grown on i-Si and glass substrates with RF magnetron sputtering technique in three different thicknesses of about 100 nm, 300 nm and 600 nm. Structural, morphological and optical characterizations were performed to calibrate the most suitable thickness for diode fabrication, and the effect of film thickness was examined. The effects of different film thicknesses on the structural, morphological and optical properties were investigated using XRD, XPS, AFM and UV-Vis devices, respectively. In according to the XRD measurement data, microstructural parameters like strain, particle size, and lattice constant were calculated and the effect of film thickness on the coated films was discussed. It was found that while the film thickness and the particle size of ZnSe thin films increased, the strain values decreased. The images obtained as a result of the AFM measurement show that a smoother and homogeneously dispersed film surface is obtained with increment of film thickness. As a result of UV-Vis measurements, it was observed that the energy band gap of ZnSe thin films increased with the increment of film thickness. As a result of the characterizations, studies we conducted to fabricate Schottky diodes with metal contacts developed on a 600 nm thick film with high crystal quality and high energy band gap. The electrical analyzes of Schottky diodes, which were made to investigate the effect of different metals on electrical parameters were made with I-V measurement system performing with three different metal contacts, Au, Ag and Al. Electrical parameters like series resistance and barrier height were calculated and compared using three different methods: Thermoionic Emission Theory, Cheung and Norde functions. Schottky diodes with an Au/ZnSe/Si device structure were found to have better electrical parameters than other metal contacts. It is suggested that the appropriate film thickness and metal contact selection would add significant value to the literature in the advancement of optoelectronic devices based on thin film technology.

Science Code : 20227

Key Words : Zinc selenide (ZnSe), sputtering system, thin film, MS type Schottky Barrier Diodes

Page Number : 61

Supervisor : Prof. Dr. Semran SAĞLAM

TEŞEKKÜR

En başta, tez danışmanım olan Prof. Dr. Semran SAĞLAM'a yüksek lisans çalışmalarım boyunca yönlendirmesi ve desteği için teşekkür ederim, saygılarımı sunarım.

Çalışmalarım süresince değerli bilimsel katkı ve yardımlarıyla beni yönlendirerek çalışmalarım için elverişli ortamı sağlayan Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürü, Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman deneyim ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli hocam Prof. Dr. Mustafa Kemal ÖZTÜRK'e çalışmalarım boyunca gösterdiği ilgi, hoşgörü ve yardımları için sonsuz teşekkür ederim.

Çok kıymetli hocam Dr. Tuğçe ATAŞER'e değerli katkılarıyla bana olan rehberliği, güveni, sabrı ve sonsuz desteği için minnet duyuyorum en derin şükranlarımı sunuyorum.

Özellikle numunelerimin elektriksel analizleri için katkılarından dolayı, Doç. Dr. Barış KINACI ve Doç. Dr. Nihan AKIN SÖNMEZ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam boyunca, her türlü desteği sağlayan, bilgi ve tecrübelerinden bolca faydalandığım Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan değerli hocalarım ve çalışma arkadaşlarımdan her birine tek tek teşekkür ederim.

Bilim insanı olma yolunda verdiğim zorlu mücadelede hayatımın her anında bana maddi ve manevi destek olan, büyük sabır gösteren, hayallerime ulaşmam için beni her zaman destekleyen ve bana inanan kıymetli ailem, babam Turhan BALCI'ya, ablalarım Elif BALCI ve Leyla BALCI'ya ve hayatımda her zaman güçlü kişiliğini, azmini ve çalışkanlığını örnek aldığım canım annem Saliha BALCI'ya sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunuyorum. Ve tüm şanssızlıklara rağmen bu tezi sonuçlandırabildiğim için en büyük teşekkürü şahsıma ediyorum.

Bu çalışma Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı (Türkiye) tarafından 2019K12-149045 proje numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1. Yarıiletkenler.....	5
2.1.1. Katkısız yarıiletkenler	6
2.1.2. Katkılı yarıiletkenler	7
2.2. Metal- Yarıiletken Kontaklar	9
2.2.1. Metal / n-tipi yarıiletken Schottky kontaklar	9
2.2.2. Metal / n-tipi yarıiletken Omik kontaklar	12
2.3. Schottky Diyotlarda Akım İletim ve Termoiyonik Emisyon Teorisi.....	13
2.4. Cheung Fonksiyonları ile Schottky Diyot Parametrelerinin Hesaplanması.....	16
2.5. Norde Fonksiyonları ile Schottky Diyot Parametrelerinin Hesaplanması	17
2.6. ZnSe Kristal Yapısı	18
3. KULLANILAN YÖNTEMLER VE DENEYSEL SİSTEMLER	21
3.1. Eş Püskürtme Yöntemi İle İnce Film Biriktirme	21
3.2. Karakterizasyon Teknikleri.....	23

	Sayfa
3.2.1. X ışını kırınım sistemi (XRD).....	23
3.2.2. X ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS)	26
3.2.3. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM)	27
3.2.4. Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrometresi.....	29
3.2.5. UV-Vis spektroskopisi	29
3.3. Fabrikasyon Sistemi	31
3.3.1 Termal buharlaştırma sistemi (Evaporasyon)	31
3.3.2. Hızlı ısıtma (RTA) sistemi	31
3.3.3. Akım-gerilim (I-V) ölçüm sistemi	32
4. ZnSe İNCE FİLMLERİN ÜRETİLMESİ	35
4.1. Alttaş Temizleme İşlemi	35
4.1.2. ZnSe ince filmlerin eş püskürtme yöntemi ile üretimi.....	36
5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	37
5.1. Karakterizasyonlar	37
5.1.1. Yapısal karakterizasyon	37
5.1.2. Morfolojik karakterizasyon	40
5.1.3. Optik karakterizasyon	42
5.1.4. Elektriksel karakterizasyon	45
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	51
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ	61

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. ZnSe kristalinin kimyasal ve fiziksel özellikleri.	19
Çizelge 4.1. ZnSe ince filmlerin büyütme parametreleri	36
Çizelge 5.1. ZnSe ince filmlerin XRD analizi sonucunda hesaplanan parametreleri	38
Çizelge 5.2. ZnSe ince filmlerin RMS değerleri.....	42
Çizelge 5.3. Kontak kaplama parametreleri.....	45
Çizelge 5.4. Üç farklı metal kontak için Termiyonik Emisyon, Cheung ve Norde metotlarıyla elde edilen η , Φ_{b0} ve R_s değerlerinin karşılaştırılması.....	47

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Yalıtkan, yarıiletken ve iletkenlerde enerji bant aralığı şematik gösterimi	5
Şekil 2.2. Katkısız yarıiletkende enerji bant aralığı ve Fermi enerji seviyesinin şematik gösterimi	6
Şekil 2.3. p-tipi yarıiletken.....	8
Şekil 2.4. n-tipi yarıiletken.....	8
Şekil 2.5. Schottky kontaklarda a) Kontak yapımından önceki enerji bant diyagramı, b) kontak yapımından sonraki enerji bant diyagramı	11
Şekil 2.6. Omik kontaklarda a) kontak yapımından önceki enerji bant diyagramı, b) kontak yapımından sonraki enerji bant diyagramı.....	12
Şekil 2.7. Akım iletim mekanizma çeşitleri.....	13
Şekil 2.8. ZnSe kristalinin kafes yapısı (Sarı renkli küreler Se, mor renkli küreler Zn atomlarını temsil etmektedir [60])	19
Şekil 3.1. Eş-püskürtme sisteminde püskürtme prosesinin şematik gösterimi	22
Şekil 3.2. XRD cihazı çalışma prensibi	24
Şekil 3.3. Kristal düzlemde X-ışını kırınımı.....	24
Şekil 3.4. XPS sisteminin çalışma prensibi	27
Şekil 3.5. AFM şematik gösterimi	28
Şekil 4.1. Au/ZnSe/i-Si Schottky diyotların üretim ve karakterizasyonlarının akış şeması.....	35
Şekil 5.1. ZnSe ince filmlerin X-ışını kırınım desenleri.....	37
Şekil 5.2. ZnSe ince filmlerin XPS analizleri	39
Şekil 5.3. XPS dar tarama a)Zn 2p, b)Zn 3d, c) Se 3p, d)Se 3d spektrumları	40
Şekil 5.4. ZnSe ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları.....	42
Şekil 5.5. ZnSe ince filmlerin Tauc eğrileri.....	43
Şekil 5.6. ZnSe ince filmlerin FTIR spektrumları	44
Şekil 5.7. a) Au, b) Ag ve c) Al Schottky kontak yapılarının şematik gösterimi	46

Şekil	Sayfa
Şekil 5.8. Schottky diyotların I-V grafikleri	47
Şekil 5.9. Au kontak için $F(V) - V$, $dV/d\ln(I) - I$ ve $H(I) - I$ grafikleri	48
Şekil 5.10. Al kontak için $F(V) - V$, $dV/d\ln(I) - I$ ve $H(I) - I$ grafikleri	49
Şekil 5.11. Ag kontak için $F(V) - V$, $dV/d\ln(I) - I$ ve $H(I) - I$ grafikleri	49

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Nanovak NVTS-500 eş-püskürtme sistemi	23
Resim 3.2. XRD cihazı	26
Resim 3.3. AFM sistemi	28
Resim 3.4. FTIR sistemi	29
Resim 3.5. UV-Vis spektrometresi	30
Resim 3.6. Hızlı ısıtıl tavlama (RTA) sistemi.....	32
Resim 3.7. Keithley 4200-SCS <i>I-V</i> sistemi ve Newport Oriel Sol3A güneş simulatorü	33
Resim 5.1. 2D ve 3D AFM görüntüleri a) 100 nm b) 200 nm c) 600 nm	41
Resim 5.2. Üretilen a) Au, b) Ag ve c) Al kontakların fotoğrafları.....	46

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
Ag	Gümüş
A*	Richardson sabiti
Al	Alüminyum
Ar	Argon
Ar⁺	Argon iyonu
Au	Altın
α	Soğurma katsayısı
α	Örgü sabiti
Å	Angstrom
β	Pik yarı genişliği
DC	Doğru akım
d	Düzlemler arası uzaklık
e	Elektron yükü
ϵ_a	Strain
E_C	İletim bandı enerjisi
E_V	Valans bandı enerjisi
E_g	Enerji bant aralığı
E_f	Fermi enerjisi
eV	Elektron volt
F(E)	Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu
Φ_b	Bariyer yüksekliği
Φ_{b0}	Sıfır besleme engel yüksekliği
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ_s	Yarıiletkenin elektron ilgisi
hν	Foton enerjisi
hkl	Miller indisi

Simgeler**Açıklamalar**

I	Akım
I-V	Akım-Gerilim
I₀	Doyum akımı
J	Akım yoğunluğu
k	Boltzman sabiti
k.b.	Keyfi birim
kV	Kilovolt
λ	Dalgaboyu
m_e[*]	Elektronun etkin kütlesi
η	İdealite faktörü
nm	Nanometre
R_s	Seri direnç
V_b	Metal taraftaki potansiyel engel yüksekliği
V_d	Difüzyon potansiyeli
θ	Bragg açısı
ZnSe	Çinko Selenid
W	Arınma bölgesinin genişliği

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
FTIR	Fourier dönüşümlü kızılötesi
FWHM	Pik yarı genişliği
MS	Metal-yarıiletken
RF	Radyo frekansı
RMS	Karekök ortalama
RTA	Hızlı ısıt tavlama
UV-Vis	Morötesi - görünür bölge
XPS	X - ışını fotoelektron spektroskopisi
XRD	X - ışını kırınımı

1. GİRİŞ

Hızla gelişmekte olan teknolojiyle elektro-optik cihazlar üzerine yapılan çalışmalar günden güne artmaktadır. Optoelektronik cihazlar optik ile elektroniği tek bir cihazda birleştirmektedir. Işığın bilgiyi iletmek için kullanıldığı hemen her yerde, elektrik akımını optik sinyallere entegre edecek yarıiletken cihazlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yarıiletken cihazlara, radyoların içerisindeki LEDler, dijital kameralar, lazer diyotlar veya asansör kapılarındaki fotodedektörler örnek olarak verilebilir [1].

Günlük yaşantımızda kendisine önemli bir yer edinen yarıiletken malzemelerin merkezinde ince filmler vardır. İnce filmler, tek veya birkaç katmandan oluşabilen ve kalınlığı 5Å ile birkaç mikrometre aralığında değişebilen kaplamalardır. İnce filmler, silisyum, cam ve kuartz gibi alttaşların yüzeyine, çeşitli üretim teknikleri kullanılarak seçilen kaynak malzemesinin atom veya moleküllerinin biriktirilmesiyle oluşur [2]. Modern dünyanın sahip olduğu son teknolojik ürünlerdeki elektronik bileşenlere bakıldığında ince film teknolojisinin ne kadar yaygın kullanıldığı görülmektedir. Optik kaplama sistemleri ve elektronik yarı iletken cihazların yapımında ince film teknolojisinden faydalanılmaktadır. Üretim, karakterizasyon ve uygulama ince filmin nerede ve ne amaçla kullanılacağı noktasında kritik aşamalardır. Bu aşamalardaki küçük bir parametre değişikliği ince filme eşsiz özellikler vermektedir [3].

İnce filmler birçok üretim tekniği bulunmaktadır. Bunlardan bazıları, kimyasal banyo biriktirme (CBD) [4], termal buharlaştırma (TED) [5], moleküler demet epitaksi (MBE) [6], sol-gel [7,8], electrodeposition [9] ve radyo frekans magnetron püskürtme (RF Magnetron Sputtering) [10]. İnce film karakterizasyonu birçok cihazla yapısal, optiksel ve elektriksel olarak sınıflandırılarak yapılmaktadır. Yapısal karakterizasyon için X-Ray Difraktometresi (XRD), X Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS), Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) , optiksel karakterizasyonda Ultraviyole ve görünür ışık (UV-Vis) absorpsiyon spektroskopisi, ve elektriksel karakterizasyonda ise I-V güneş similatörü kullanılmaktadır. İnce film teknolojiyle transistör, kapasitör, diyot ve sensörler gibi küçük devre elemanları geliştirilerek optoelektronik cihazlar üretilmektedir [3].

Günümüzde ihtiyaç duyduğumuz cep telefonu, dizüstü bilgisayar gibi tüm elektronik cihazlarda yarı iletken malzemeler devre elemanı olarak önemli bir rol oynamaktadır. Yarıilet-

kenlerin devre elemanı olup sistemi çalıştırabilmesi için elektrik sinyallerinin cihazdan geçiyor olması gerekmektedir. Bunun için de ince filmlerin üzerinde aktif bölge olarak yüksek kararlılıkta metal yarı iletken doğrultucu kontaklar bulunmalıdır. Yüksek kararlılığa ve verimliliğe sahip metal kontakların nasıl üretildiğini bilmek gelecekteki teknolojinin gelişimi için gereklidir [11]. Literatürdeki birçok çalışma metal yarıiletkenlerin modern elektronik bileşenlerin ana bileşeni olduğunu göstermektedir [12,13]. Metal – yarıiletken cihazlar düşük maliyetli ve yüksek hassasiyetli olduklarından, izleme ve test etme alanlarında büyük ilgi görmektedir [14,15]. Yarıiletkenlerin metal ile teması sonucu omik ve doğrultucu (schottky) olarak iki tür kontak oluşmaktadır [16]. Omik kontak uygulanan voltaj ile akım, orantılı şekilde artar ve Ohm kanunu ile örtüşür. Schottky kontakta ise yüksek akım yalnızca ileri yönde akar ve akımın karşı yönünde sonsuz bir direnç sağlayarak ideal bir diyot davranışı sergiler [17,18].

Yokoyama ve arkadaşları atomik katman epitaksi yöntemi ile katkısız yüksek kaliteli ZnSe film büyütme ve karakterizasyonu üzerine çalışmalar yaptılar. Au/n-ZnSe Schottky diyotların düşük kaçak akıma sahip olduğu görüldü. İdealite faktörünü 1,10 ile 7,63 aralığında ve kesim (breakdown) voltajını 0,6 V ile 0,8 V olarak buldular. ZnSe ince filminin bu üstün performansını da büyütme yöntemine ve alttaş temizliğine bağlayarak kristal kusurlarının en aza indirilmesiyle sağlandığını belirttiler [19]. Venkatachalam ve arkadaşları vakumla buharlaştırılmış ZnSe/p-Si Schottky diyotların elektriksel özelliklerini sıcaklığın fonksiyonu olarak incelediler. ZnSe/Si Schottky diyotun 306 ile 396 K sıcaklık aralığında bariyer yüksekliğinin 1,457 eV ile 1,711 eV arasında değişiklik gösterdiğini ve idealite faktörünü ise 306 K’de 2,8 olarak buldular. Kumar ve diğerleri bakır alttaş üzerine nanokristal ince bir ZnSe filmi kapladılar. Gümüş metal kontak alınan Schottky diyotların I-V karakteristiğinde; ileri sapmada akım devamlı bir artış gösterirken ters sapmada - 0,7V’a kadar akım son derece az bir artış gösterdi. Daha sonra da - 0,7 V’ta akım ani bir şekilde artış gözlediler. Böylece üretilen ZnSe ince filmin yarıiletken özelliğe sahip olduğunu gösterdiler [20]. Coşkun ve diğerleri geniş bant aralığına sahip ZnSe filmi, Si ve SiNW alttaşlar üzerine termal buharlaştırma yöntemi ile kapladılar ve n-ZnSe/ p-SiNW ve n-ZnSe/ p-Si heteroyapıların elektriksel anazilerini yaptılar. İdealite faktör değerlerini sırasıyla ZnSe/Si ve ZnSe/SiNW için 4,52 eV ve 3,12 eV olarak buldular [21]. II-VI geniş bant aralığına sahip bileşiklerin birçok uygulama alanı bulunmaktadır. Bunlar, optoelektronik cihazlar, yüksek güçlü elektronik cihazlar, piroelektrik ve piezoelektrik cihazlar, sensörler, yüzey şeffaf elektrotlardır. Üzerine uzun yıllardır çalışmalar yapılan bazı II-VI yarıiletken grubuna ait bileşikler vardır [22].

Bunlardan bazıları, ZnSe, CdTe [23] CdZnTe [24] CdS, ve ZnO'dur [25,26]. Bunlar arasında ZnSe, doğrudan geçişli ve düşük optik absorpsiyonlu geniş bant aralığı, uygun kırılma, yüksek elektrik iletkenliği, yüksek foto-katalitik aktivite ve çevre dostu olma gibi eşsiz fiziko-kimyasal özelliklerinden dolayı büyük ilgi görmektedir [27,28,29,30].

ZnSe, 22 meV'luk yüksek eksiton bağlanma enerjisinin ve 2,7 eV yasak enerji aralığının sağladığı avantajla, mavi, yeşil ve kırmızı ışık yayan diyot, fotodedektör, fotokataliz, güneş hücresi ve hassas optik cihaz yapımında kullanılan önemli bir yarıiletken [31, 32].

Sayeed, Rouf ve Hussain vakumlu termal buharlaştırma ile büyütülen ZnSe ince filmlerde, farklı kalınlıkların yapısal ve optik özelliklerini incelemişlerdir. ZnSe ince filmin kalınlığı artırıldıkça kristal boyutu artarken dislokasyon yoğunluğunun azaldığını belirttiler. Dislokasyon yoğunluğundaki azalışın, çok az örgü kusuru ile iyi kristal özelliklere sahip bir ince filmin oluşmasına sebep olduğunu gösterdiler. Absorpsiyon katsayısı kullanılarak hesaplanan ve geçirgenlik spektrumlarından belirlenen yasak enerji bant aralığının film kalınlığı ile arttığı tespit edilmiştir [33]. Hasaneen ve arkadaşları kalınlığın yapısal ve optik özelliklere etkisini belirlemek için 200 nm ile 650 nm aralığındaki ZnSe ince filmleri incelemişlerdir. İncelenen filmler için Swanepoel metodunu kullanarak optik bant aralığını hesapladılar ve film kalınlığı arttıkça aralığın 2,69 eV ile 2,81 eV arasında değiştiği görüldü. Uygulanan Swanepoel metoduyla, farklı kalınlıklara sahip ZnSe ince filmlerin ortalama kalınlıklarının ve optik parametrelerinin yüksek doğruluk payı ile hesaplanabileceğini belirttiler. Kristal boyutunun da kalınlıkla orantılı olarak arttığını gösterdiler [34].

Bu tez çalışmasında, RF püskürtme yöntemi ile büyütülen farklı kalınlıklardaki (100 nm, 300 nm ve 600 nm) ZnSe ince filmlerin yapısal ve optik özellikleri incelenerek kalınlık farkının bu özellikler üzerine etkisini gözlemlemek amaçlanmaktadır. Yapılan karakterizasyon sonuçları göz önünde bulundurularak, bu alanda yapılan daha önceki çalışmalarla uyumluluğu en yüksek oranda olan numunenin fabrikasyon işlemleri gerçekleştirilerek ZnSe diyotun elektriksel özellikleri incelenerek farklı kontak metallerinin etkisinin incelenmesi hedeflenmektedir.

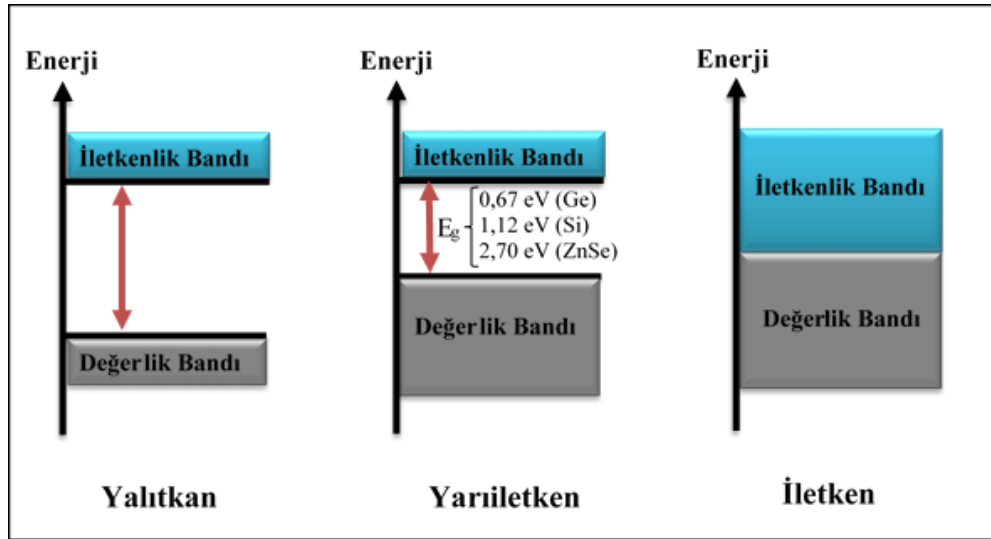
Yukarıda verilen bilgiler doğrultusunda, tez çalışması 6 bölümden meydana gelmektedir:

- Birinci bölümde, teze giriş yapılarak ince filmler, yarıiletkenler ve Schottky diyotlar hakkında genel bilgiler ve tezin amacı ve önemini içeren bilgiler verildi. ZnSe ve Schottky diyot özellikleri ile ilgili yapılmış olan literatür çalışmaları sunuldu.
- İkinci bölümde, yarıiletkenlerden kapsamlı bir şekilde bahsedildi. Ayrıca elektriksel parametrelerin belirlenmesinde kullanılan yöntemler verilerek ZnSe'nin yapısı ve özellikleri anlatıldı.
- Üçüncü bölümde, tez çalışması boyunca büyütme işlemi, karakterizasyon teknikleri ve fabrikasyon sisteminde kullanılan tüm yöntemler ve deneysel sistemler sırasıyla anlatıldı.
- Dördüncü bölümde, ZnSe ince filmlerin büyütme öncesi alttaş hazırlığı ve püskürtme yöntemiyle büyütme işlemi detaylı bir şekilde verildi.
- Beşinci bölümde, yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel karakterizasyonlar sonucunda elde edilen bulgular sunuldu.
- Son bölüm olan altıncı bölümde ise çalışma boyunca yapılmış olan teorik ve deneysel çalışmalar değerlendirilerek gelecek çalışmalar hakkında önerilerde bulunuldu.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Yarıiletkenler

Elektriksel iletkenliği iletkenler ile yalıtkanlar arasında olan malzemelere yarıiletken denir. Yarıiletkenler normal koşullarda yalıtkan özellik gösterirken, gerilim, ısı ve ışık gibi etkenlerle uyarıldıklarında iletken hale gelirler. Yarıiletkenler üzerine araştırmalar 19. yüzyılın ortalarında başlamıştır. Yarıiletken davranışına atfedilebilecek kaydedilen ilk etki, 1833 yılında Michael Faraday tarafından, gümüş sülfürün negatif bir sıcaklık katsayısı sergilediğinin gözlemdir [35]. Yarıiletkenler, oda sıcaklığında $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ile $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ aralığında elektriksel direnç sahiptir. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi elektriksel iletkenlik açısından yalıtkan ve iletken grubun arasında yer almaktadır [36].



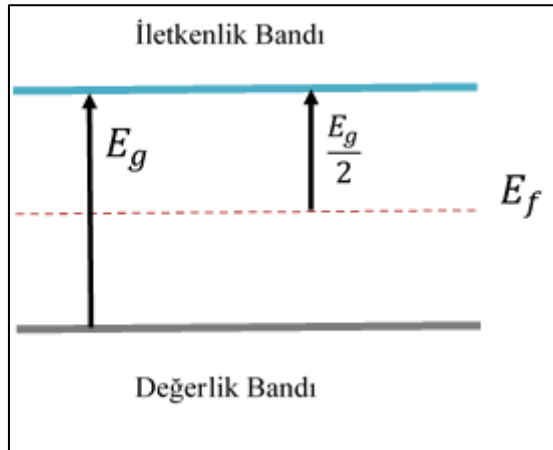
Şekil 2.1. Yalıtkan, yarıiletken ve iletkenlerde enerji bant aralığı şematik gösterimi

Yarıiletkenlerde mutlak sıfırda ($T=0\text{K}$), iletkenlik bandı ile değerlik bandı (değerlik) bandı dar bir enerji bant aralığı ile ayrılmıştır. Enerji bant aralığı, eV birimi ile ifade edilir ve yarıiletkenlerin elektriksel ve optik özelliklerinin ortaya çıkmasında kullanılan önemli bir parametredir [37]. Yasak enerji bant aralığının alt bölgesinde kalan değerlik bandı, serbest elektronlardan oluşmaktadır. İletkenlik bandı ise yasak bandın üzerinde bulunur ve bu değerlik bandı elektronlarının uyarılma düzeylerinden meydana gelen tamamen boş bir banttır. Yarıiletkenlerde iletimi sağlamak için değerlik bandındaki serbest haldeki elektronların iletim bandına geçmesi gerekir. Termal olarak uyarılan değerlik bandındaki elektronlardan,

yasak enerji aralığını geçebilecek kadar enerjiye sahip olan elektronlar, iletim bandına geçerek hareket serbestliğine sahip olurlar. Böylece iletim bandında bulunan elektronlar ve değerlik bandında uyarılan elektronların geride bıraktıkları boşluklar elektriksel iletimde önemli rol oynamaktadır [38]. Bu elektrik iletkenliği, yarıiletkenlere uygulanan katkılama işlemi ile de değişiklik gösterebilir. Yarıiletkenlerin temel bir özelliği olarak, $T=0K$ 'de yalıtkan halde olan bir yarıiletken, kristal örgüsüne yapılan katkılamayla iletken hale geçer [39]. Yarıiletkenleri, hiçbir katkı yapılmamış, katkısız ve kontrollü biçimde safsızlık katkılanarak yapılmış, katkılı yarıiletkenler olarak iki ayrı kategoride incelemek mümkündür.

2.1.1. Katkısız yarıiletkenler

Katkı yapılmamış, saf yarı iletkenlerdir. Örgü kusurları ve safsızlıkları yoktur. Saf yarı iletkenler ısı ile uyarıldıktan sonra değerlik bandındaki boşluklar ile iletim bandında bulunan elektronların yoğunlukları birbirlerine eşit olur. Katkısız yarıiletkenlerde iletkenlik, iletim bandındaki elektronların ve değerlik bandındaki, uyarıldıktan sonra iletim bandına geçen elektronların oluşturduğu boşlukların termal olarak uyarılması ile sağlanır [40]. Doğal olarak saf olan yarıiletkenlerde iletkenlik bandındaki elektron sayısı ile değerlik bandındaki boşluk sayısı birbirine eşit olduğu için Fermi seviyesi iletkenlik ve değerlik bandının orta noktasında bulunmaktadır. Şekil 2.2'de katkısız yarıiletkendeki Fermi enerji seviyesi gösterildi.



Şekil 2.2. Katkısız yarıiletkende enerji bant aralığı ve Fermi enerji seviyesinin şematik gösterimi

Katkısız yarıiletkenlerin Fermi enerji seviyesi, Eş. 2.1'den de görüldüğü gibi sıcaklıktan bağımsız olarak, yasak bant aralığının yarısına eşittir.

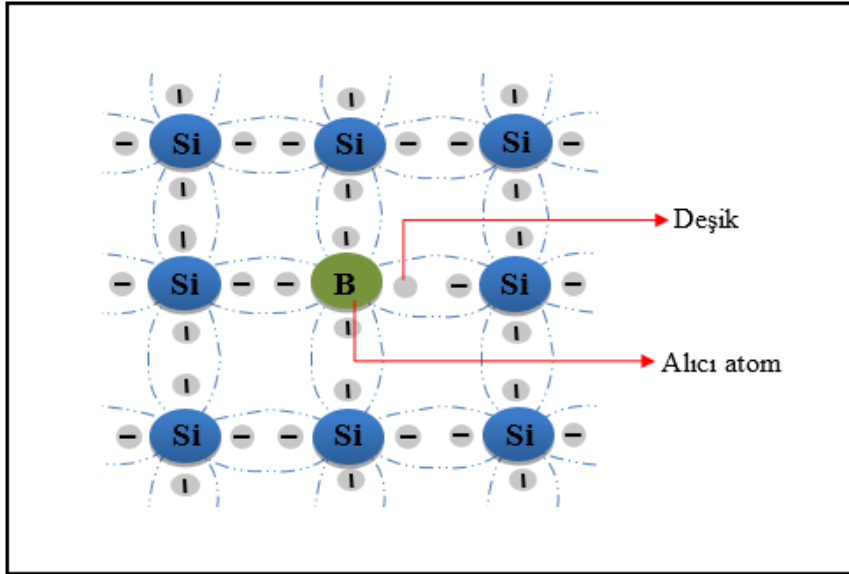
$$E_f = \frac{1}{2} E_g \quad (2.1)$$

Saf yarıiletkenlerde değerlik bandı (değerlik) bandında bulunan elektronlar oda sıcaklığında da yasak bant aralığının yarısı kadar enerjiye sahiptir. Aynı zamanda bu eşitlik, katkısız yarı iletkenlerde Fermi seviyesinin değiştirilemez olduğunu göstermektedir [41]. Silisyum (Si) ve Germanyum (Ge) katkısız yarıiletkenlerin en temel örnekleridir. T=298K'de (Ge) Germanyum iletken özellik gösterirken Silisyum(Si) yalıtkan haldedir. Bundan dolayı Si bütünleşmiş (entegre) devrelerde daha çok tercih edilmektedir [42].

2.1.2. Katkılı yarıiletkenler

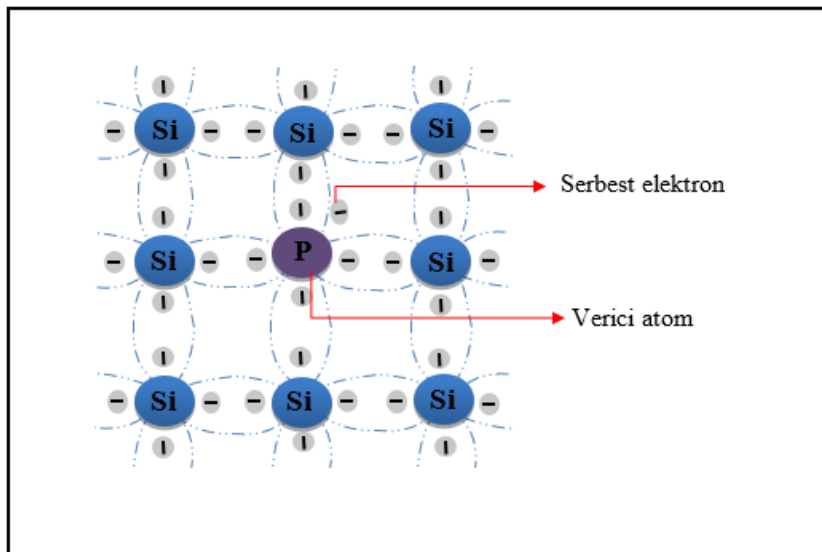
Saflikları katkılama yapılarak bozulmuş yarıiletkenlerdir. Saf yarıiletkenlerin aygıt teknolojisinde sahip olduğu sınırlı uygulama alanlarını genişletebilmek için katkılama işlemi yapılmaktadır [43]. Katkılamada kritik nokta, katkılanan safsızlık miktarının yarıiletkenin sahip olduğu kafes yapısını bozmaması gerektiğidir. Bu nedenle seçilen yarıiletken atomları ile katkılanan atomun büyüklükleri eşit olmalıdır. Katkılamayla yarıiletkenlerin sahip olduğu elektriksel özellikler değiştirilebilir. p ve n tipi olmak üzere iki tür katkılı yarıiletken vardır. Değerlik bandından elektronları çekmek için alıcı adı verilen bir katkı atomu kafese eklenir. p-tipi yarıiletken, kafes içerisine daha fazla alıcı eklenerek, içerideki delik sayısı negatif yük taşıyıcısını sayısını aşınca ortaya çıkar. n-tipi yarıiletken ise çok sayıda vericiden ve elektronları iletim bandına gönderen katkı atomlardan oluşmaktadır.

p-tipi yarıiletkenler, (+) yük taşıyıcı olarak bilinen, deşikleri oluşturan alıcı atomlarca katkılanmış yarıiletkenlerdir. Deşik sayısı fazla olduğundan, p-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcısı deşiklerdir. p-tipi yarıiletken yapabilmek için alıcı olarak adlandırılan atomlarla katkılanmalıdır. Alıcı atomlara örnek ise, IV. gruptaki Ge ve Si elementleri için III. gruptaki elementlerdir. IV. Grup elementlerinden Silisyum kristali ile III. Grup elementi Bor (B) kovalent bağ yapmak istediğinde Silisyum (Si) kristalinden bir elektron alır. Her Bor atomunun kristalden bir elektron aldığında, deşiklerin yoğunluğunda artış olmaktadır [44]. p - tipi yarıiletkenin bağ yapısı Şekil 2.3'te verildi.



Şekil 2.3. p-tipi yarıiletken

n - tipi yarıiletkenler, negatif yük taşıyıcı olarak bilinen, serbest elektronlardan oluşur ve verici atomların kristale katkılanmasıyla meydana gelir. n-tipi yarıiletkenlerde, elektron sayısı, deşiklerden fazla sayıda olduğu için burada çoğunluk yük taşıyıcısı elektronlardır. V. Grup elementleri, IV. Gruptaki Germanyum ve Silisyum elementleri için verici atom durumundadır. Verici atom olarak kullanılan fosfor (P), Silikon kristali ile kovalent bağ yapmak istediğinde fazlalık olan bir elektronunu kristale verecektir. Her fosfor atomu kristale bir elektron verdiğinde, serbest elektron yoğunluğunda artış meydana gelir [45]. n – tipi yarıiletkenlerin bağ yapısı Şekil 2.4’te verildi.



Şekil 2.4. n-tipi yarıiletken

2.2. Metal- Yarıiletken Kontaklar

Metal ve yarıiletkenlerin temas ederek birleşmesi durumunda oluşan ikili yapı metal-yarıiletken (MS) kontak olarak isimlendirilir. Yalıtkan ve yarıiletken kristallerin iletkenlik özelliklerinin incelenebilmesi için kristal üzerine, uygun olan metallerle kontak oluşturulması gerekmektedir. Temas direncinin sıfır olması, kontak yapılacak olan yüzeylerin pürüzsüz ve temiz olması kontak ideallliği için önemlidir. Oluşturulan bu kontaklar, metallerin iş fonksiyonuna göre farklı elektriksel özellikler göstermektedir. İş fonksiyonu (Φ), bir elektronun fermi seviyesinden vakum seviyesine geçmesi için ihtiyaç duyduğu enerji olarak tanımlanır. Metal-yarıiletken kontaklar iş fonksiyonuna bağlı olarak Schottky ve omik kontak olarak sınıflandırılmaktadır. Schottky kontaklar, akım taşıyıcısı olan elektron ve deşiklerin hareketinin yani metalden yarıiletken, diğer yöndeki hareketinden büyük olduğu kontak sınıfıdır. Omik kontak ise, metal ile yarıiletken arasında potansiyelin bulunmadığı ve bu nedenle de taşıyıcı hareketinin her iki yönde de kolayca sağlandığı kontak sınıfıdır [46].

Metalin iş fonksiyonu Φ_m ile gösterilirken yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s ile gösterilmektedir. Buna göre;

- a) n-tipi metal-yarıiletken için; $\Phi_m > \Phi_s$ olduğunda doğrultucu kontak
 $\Phi_s > \Phi_m$ olduğunda omik kontak
- b) p-tipi metal-yarıiletken için; $\Phi_s > \Phi_m$ olduğunda doğrultucu kontak
 $\Phi_m > \Phi_s$ olduğunda omik kontak

n ve p-tipi metal-yarıiletken doğrultucu ve omik kontaklar yukarıdaki durumlarda oluşmaktadır [47].

2.2.1. Metal / n-tipi yarıiletken Schottky kontaklar

Kontak haline getirilen metal ve yarıiletken arasında bir yük düzenlemesi meydana gelir. Bu iki iletken arasındaki elektron akışı, iki iletken için de Fermi enerji seviyeleri eşit hale gelene kadar devam eder. Kontak oluşturulan metalin iş fonksiyonu Φ_m , n tipi yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s ve χ_s ise yarıiletkenin elektrona olan ilgisi olarak ifade edilmektedir. MS kontaklarının doğrultucu veya omik olduğunu belirlemek için iş fonksiyonlarına bakılır. Eğer $\Phi_m > \Phi_s$ durumu varsa metal ve n-tipi yarıiletkenin doğrultucu kontak oluşturduğu anlaşılır.

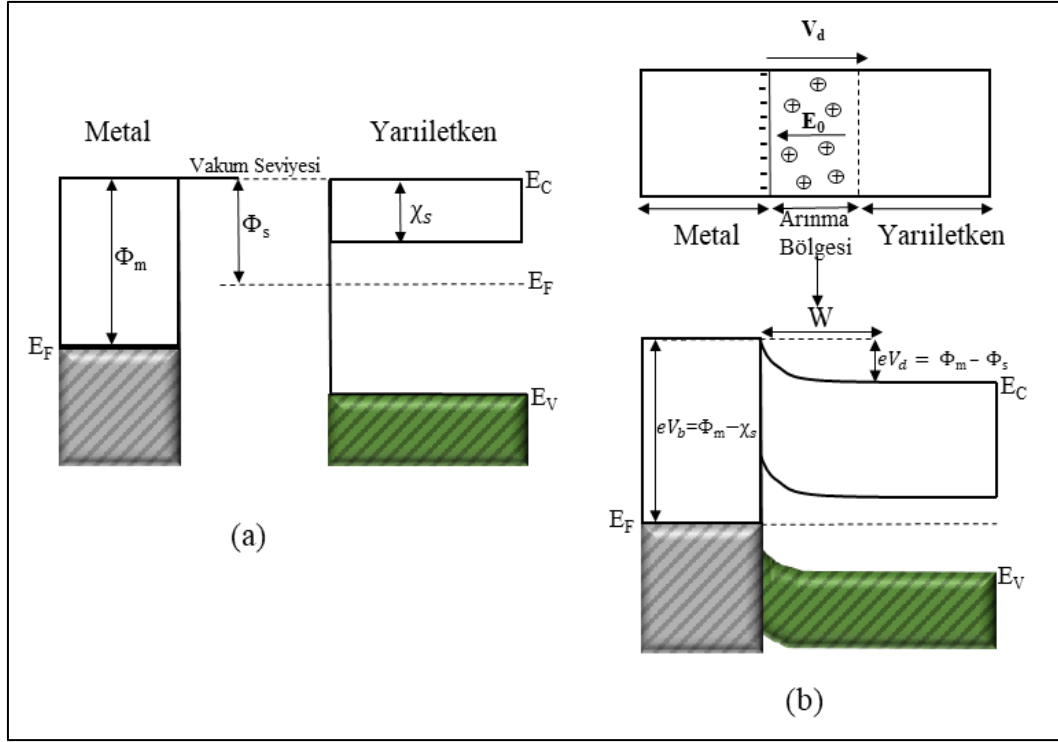
Şekil 2.5a’da gösterildiği gibi yarıiletken ve metalin Fermi enerji seviyeleri arasında $\Phi_m - \Phi_s$ kadar bir fark bulunmaktadır. Kontak oluşumdan sonra ise, Şekil 2.5b’de gösterildiği gibi enerji seviyeleri dengelenerek, metal ve yarıiletkenin E_F değeri eşitlenir. Bu denge durumu sağlanana kadar metal ve yarıiletken arasında yük geçisi olur. Dengenin sağlanması da yarıiletkendeki enerji seviyelerinin $\Phi_m - \Phi_s$ kadar aşağıya kaymasıyla ifade edilir. Termal denge durumunda metal ve yarıiletken arasında net bir akım yoktur çünkü sahip oldukları elektron sayıları eşittir. Bu bölgede serbest yüklerinden arınmış negatif ve pozitif uzay yükleri bulunmaktadır ve arınma veya uzay yük bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Arınma bölgesinin yarıiletken tarafı pozitif metal tarafı ise negatif yüklü olduğundan burada dipol tabakası oluşmaktadır. Dipol tabakayla birlikte kontakta bir potansiyel engel meydana gelir ve aynı zamanda bu engel Schottky engeli olarak adlandırılır. Yarıiletken tarafındaki difüzyon potansiyel engelinin yüksekliği ;

$$eV_d = \Phi_m - \Phi_s \quad (2.2)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. V_d difüzyon potansiyelidir. Metal taraftaki potansiyel engel yüksekliği ise;

$$eV_b = \Phi_m - \chi_s \quad (2.3)$$

ile ifade edilmektedir [46-48].



Şekil 2.5. Schottky kontaklarda a) Kontak yapımından önceki enerji bant diyagramı, b) kontak yapımından sonraki enerji bant diyagramı

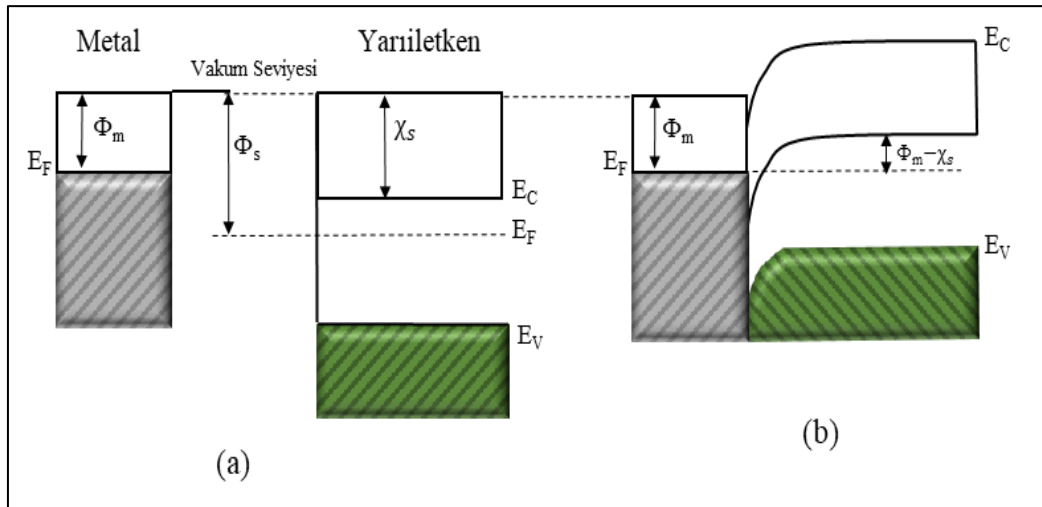
Yarıiletken bir negatif ($-V$) gerilim uygulandığında metalden yarıiletken geçmek isteyen elektronların karşılaştığı engel yüksekliğinde bir değişim olmayacak ve yarıiletkenden metale doğru olan akım I_0 sabit kalır. Yarıiletken bölgesinde iletkenlik bandının enerjisi eV kadar artarken, diğer yönde engel yüksekliği eV kadar düşer. Bu durumda metalden yarıiletken doğru akan akım $e^{eV/kT}$ faktörü kadar artar. Bu da verilen gerilimin ($V \gg kT/e$) olmasıyla, kontakın doğru besleme olduğunu göstermektedir. Akım;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

eşitliği ile gösterilir. I_0 doyma akımı olarak adlandırılır. Eğer yarıiletken $+V$ gerilimi uygulanırsa, yarıiletken taraftan metale geçecek olan elektronların karşılaştığı engel yüksekliği eV kadar artar ve iletkenlik bandı ise eV değeri kadar azalır. Bu durum sonucunda, elektronlar için daha yüksek bir engel oluşur ve metal tarafın engel yüksekliği sabit kalır. Uygulanan gerilimin ($V \ll -kT/e$) olmasıyla birlikte, kontak ters besleme durumundadır. Dolayısıyla, yarıiletken tarafındaki engel yüksekliği uygulanan gerilime bağımlıyken, metal taraftaki engel yüksekliği bu gerilimden bağımsızdır.

2.2.2. Metal / n-tipi yarıiletken omik kontaklar

Omik kontaklarda amaçlanan, sistemi mümkün olan en az şekilde etkilemesidir. Omik kontaklarda metalden yarıiletkene, yarıiletkenden metale bir yük akışı olur dolayısıyla elektronlar her iki yönde de kolaylıkla hareket edebilir. Yarıiletkenin iş fonksiyonu metalin iş fonksiyonundan büyük olduğu ($\Phi_s > \Phi_m$) durumlarda omik kontak oluşur. Şekil 2.6a’da gösterildiği şekilde, metal ve yarıiletken kontak oluşturmada önce, yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi metalin Fermi enerji seviyesinden $\Phi_s - \Phi_m$ kadar aşağıda bulunur. Kontak oluşumundan sonra elektronlar metalden yarıiletkene doğru geçerken geridedeşikler bırakırlar ve bu durum sonucunda da yarıiletken yüzeyinde n-tipinde artış meydana gelir. Yarıiletken tarafında oluşan negatif yüzey yükü tabakası ile metal tarafında oluşan pozitif yüzey yükü tabakası bir dipol tabakası meydana getirir. Bu durumla da birlikte taşıyıcılar her iki yönde de serbestçe hareket edebilirler. Kontak oluşumunda sonraki enerji bant diagramı şekil 2.6b’de gösterildi.



Şekil 2.6. Omik kontaklarda a) kontak yapımından önceki enerji bant diyagramı, b) kontak yapımından sonraki enerji bant diyagramı

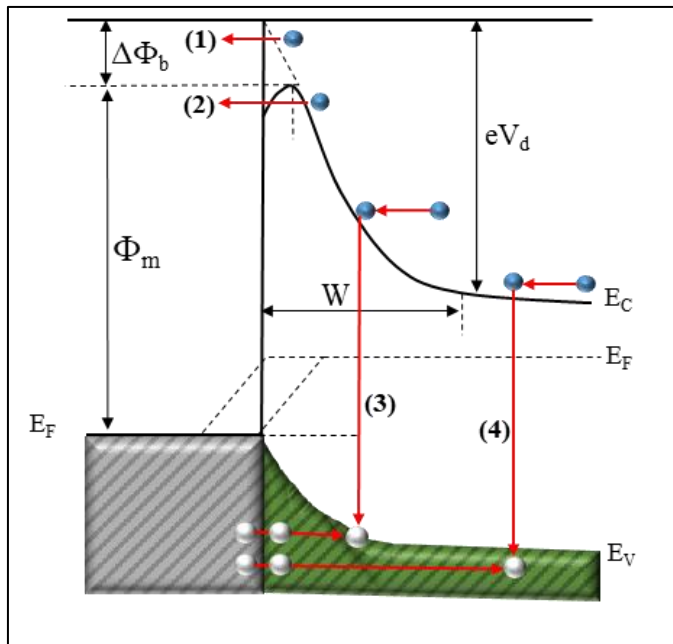
Metal tarafa +V gerilimini verildiğinde, elektronlar yarıiletkenden metale doğru engelle çarpmadan kolayca hareket edebilirler. Metal tarafına -V gerilimi uygulandığıdaysa, yarıiletkenin sahip olduğu n-tipi özelliği sayesinde, elektronlar karşılaşılabilecekleri küçük engel yüksekliğinden kolaylıkla geçerek metalden yarıiletkene hareket edebileceklerdir.

2.3. Schottky Diyotlarda Akım İletim ve Termoionik Emisyon Teorisi

MS kontaklarda akım iletimi genellikle çoğunluk yük taşıyıcıları tarafından sağlanır. Doğru beslem uygulanarak, n-tipi yarıiletken ile oluşturulan kontakta çeşitli akım iletim mekanizmaları şunlardır;

1. Yarıiletkendeki elektronların engeli aşarak oluşturduğu termoionik emisyon akımı
2. Elektronların yarıiletkendeki engelden metale doğru engel boyunca kuantum mekaniksel tünelleme ile geçmesi
3. Elektron ve deşiklerin uzay yükü bölgesinde birleşmesi
4. Metalden yarıiletkene deşik enjeksiyonu (Elektron ve deşiklerin nötr bölgede birleşmesi).

Bu mekanizma çeşitleri Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7. Akım iletim mekanizma çeşitleri

Yukarıda verilen iletim mekanizmalarından ilki olan termoionik emisyon teorisi ile diğer mekanizmalardan daha üstün şekilde Schottky engel diyotları geliştirilmesi mümkündür. Bu diyotlar ideale yakın olarak görülürken diğer mekanizmaların üstün olduğu durumlarda ise ideal durumdan uzaklaşılması söz konusudur [46,47]. Termoionik emisyon teorisi, ısısı

yüksek bir yüzeyden termal enerji kazanan elektron ve deşiklerin yani çoğunluk yük taşıyıcılarının salınması olayıdır. Metal- yarıiletken kontaklarla oluşturulan Schottky diyotlarda termoiyonik emisyon teorisi, yeterli termal enerjiye sahip olan çoğunluk yük taşıyıcılarının potansiyel engelden aşarak yarıiletkenden metale ya da metalden yarıiletkene geçişlerde meydana gelen akım durumlarını açıklamaktadır. Bu olay metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklarda elektronlar tarafından meydana gelirken, metal/p-tipi doğrultucu kontaklarda deşikler tarafından sağlanır. Metal-yarıiletken kontaklarda akım iletiminin çoğunluk yük taşıyıcılarınca iletilildiğini kabul eden termoiyonik emisyon varsayımları;

- Schottky kontağın potansiyel engel yüksekliği Φ_b 'nin , kT termal enerjisinden çok daha büyük olduğu
- Schottky bölgesinde taşıyıcı çarpışmalarının çok az ya da hiç olmadığı
- Görüntü (imaj) kuvvetlerinin etkisinin ihmal edildiğidir [46,47,49].

Yukarıdaki ilk varsayım, termoiyonik emisyon teorisinin oluşturulabilmesi için , Maxwell-Boltzman yaklaşımlarının uygulanabilmesine ve termal denge durumunun olaydan etkilenmesine olanak sağlar.

MS Schottky kontağın metal bölgesine $+V$ gerilimi uygulanarak doğru besleme bir diyotta, $J_{s \rightarrow m}$ yarıiletkenden metale doğru olan akım yoğunluğu olarak, $J_{m \rightarrow s}$ ise metalden yarıiletkene doğru olan akım yoğunluğu ise olarak gösterilir.

$$J_{s \rightarrow m} = \int_{E_C}^{\infty} e v_x dn \quad (2.5)$$

Yarıiletkenden metale doğru olan akımın yoğunluğu yukarıdaki Eş. 2.5'te verilmiştir. v_x , elektronların iletim mekanizması üzerinden kartezyen koordinat ekseninde $+x$ yönündeki sürüklenme hızı, E_C ise metal bölgeye termoiyonik emisyon için gerekli olan enerjidir. Artan elektron yoğunluğu;

$$dn = N(E)F(E)dE \quad (2.6)$$

eşitliği ile ifade edilir. $N(E)$, iletkenlik bandı durum yoğunluğu, $F(E)$ Fermi-Dirac dağılım fonksiyonudur. Yarıiletkenden metale doğru geçen elektronların akım yoğunluğu;

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e k^2 m_e^*}{h^3} \right) T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \quad (2.7)$$

Termal denge durumunda metalden yarıiletken'e geçen elektronların akım yoğunluğu ile yarıiletken'den metale geçen elektronların akım yoğunluğu eşittir.

$$J_{m \rightarrow s} = J_{s \rightarrow m} \quad (2.8)$$

Uygulanan gerilim, metalden yarıiletken'e doğru geçen elektronlar için engel yüksekliğine etki etmez. Bu durumda akım yoğunluğu voltajdan bağımsızdır. Bu durumda akım yoğunluğu;

$$J_{m \rightarrow s} = -A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \quad (2.9)$$

eşitliği ile ifade edilir. Eklemdeki net akım yoğunluğu, $J = J_{s \rightarrow m} - J_{m \rightarrow s}$ denklemiyle yazılırsa,

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.10)$$

eşitliği ile ifade edilir. A^* Richardson sabitidir ve;

$$A^* = \frac{4\pi e k^2 m_e^*}{h^3} \quad (2.11)$$

eşitliği ile verilir. Doyum akım yoğunluğu;

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \quad (2.12)$$

şeklinde ifade edilirse, akım yoğunluğu da;

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.13)$$

şeklinde gösterilir [50].

2.4. Cheung Fonksiyonları ile Schottky Diyot Parametrelerinin Hesaplanması

Metal yarıiletken Schottky diyotların doğru besleme akım - gerilim karakteristiğiyle, engel yüksekliği (Φ_{b0}), idealite faktörü (η) ve seri direnç (R_s) gibi parametreleri belirlemek için çeşitli metotlar geliştirilmiştir. Öne çıkarılan bu metotlardan biri de Cheung tarafından geliştirilen Cheung fonksiyonlarıdır. Doğru besleme uygulanan Schottky kontakların akım iletim mekanizması termoiyonik emisyon teorisi ile açıklanmaktadır. Bu teoriye göre akım-gerilim bağlantısı;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.14)$$

ile ifade edilir [51]. Dışarıdan uygulanan gerilimin tamamı Schottky bölgesinde düşmediği için burada Schottky diyotta I-V karakteristiklerinde ideallikten sapmalar meydana gelir. Cheung fonksiyonları da, oluşan bu sapmaları ifade edebilmek için boyutu olmayan η idealite faktörünü kontrolü altında bulundurarak akım yoğunluğunu Eş. 2.15'teki gibi yeniden ifade eder.

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{\eta kT}\right) - 1 \right] \quad (2.15)$$

Boyutsuz bir sabit olan idealite faktörü, uygulanan voltaj ile değişim gösteren engel yüksekliğinin bir fonksiyonu olarak tanımlanır [52]. Schottky diyottan geçen toplam akım, Eşitlik 14. kontağın etkin alanı ile çarpılarak hesaplanır. Toplam akım;

$$I = AxJ = AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{\eta kT}\right) - 1 \right] \quad (2.16)$$

eşitliği ile ifade edilir.

Metal- yarıiletken Schottky kontakların, yarıiletkenin Schottky bölgesinin dışında kalan nötr alan akım iletimine karşı bir direnç gösterir. Seri direnç, uygulanan büyük voltaj değerlerinde diyot üzerinden geçen akımın düşmesine neden olur ve R_s ile ifade edilir. $eV \gg kT$ olduğundan dolayı Eş. 2.16'daki 1 değeri ihmal edilebilir. Uygulanan V geriliminin IR_s 'lik bir kısmı seri direnç üzerine düşeceği için, akım;

$$I = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{e(V-IR_s)}{\eta kT}\right) \right] \quad (2.17)$$

şeklinde ifade edilir. Eş. 2.17'nin logaritması alındıktan V ifadesi çekilir ve ardından $\ln I$ 'ya göre türevi alınırsa,

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{\eta kT}{e} + IR_s \quad (2.18)$$

bu ifade Cheung fonksiyonunun ilk ifadesidir. Eşitliğin sol tarafının akıma (I) bağlı olan grafiği lineerlik gösterir ve eğimi seri direnci (R_s) verirken, idealite faktörü (η) değeri, $I = 0$ 'da, $dV / d(\ln I)$ ekseninin kesim noktasından elde edilir. Potansiyel engel yüksekliği olan Φ_b 'yi bulmak için de;

$$H(I) = V - \left(\frac{\eta kT}{e}\right) \ln \left[\frac{I}{AA^*T^2} \right] \quad (2.19)$$

şeklinde bir $H(I)$ fonksiyonu tanımlanmıştır. Denklem manipüle edildiğinde Eş. 2.19'da verilen Cheung'un ikinci fonksiyonu elde edilmiş olur [51,53].

$$H(I) = \eta\Phi_b + IR_s \quad (2.20)$$

$H(I)$ 'ya karşı I grafiği doğrusal bir grafikdir ve doğrunun eğimi (R_s) seri direnç değerini verirken, $H(I)$ ekseninde kestiği nokta ise (Φ_b) engel yüksekliğini verir.

2.5. Norde Fonksiyonları ile Schottky Diyot Parametrelerinin Hesaplanması

Seri direncin varlığı birçok problemin ortaya çıkmasına neden olacaktır. I-V eğrisinin lineer olduğu bölümler $\frac{kT}{e} \ll V \ll IR_s$ aralığıyla sınırlandırılacaktır. “Eğer seri direnç değeri çok büyük olursa bu aralık I_0 değeri için doğru değer veremeyecek kadar azalma gösterir, bu durum da I_0 doyma akımındaki güvenilirliğin azalmasına neden olacaktır. Bu gibi durumlarda seri direnç (R_s) ve engel yüksekliğini (Φ_b) hesaplamanın bir diğer yolu da Norde tarafından ileri sürülmüştür” [54].

Norde fonksiyonu;

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (2.21)$$

eşitliği ile ifade edilir. γ , idealite faktöründen büyük en küçük bir tam sayıdır, $I(V)$ ise Akım-Gerilim grafiğinden alınan akım değeridir. Engel yüksekliği (Φ_b);

$$\Phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (2.22)$$

eşitliği ile ifade edilir. $F(V_0)$, $F(V)$ Norde fonksiyonundaki minimum gerilim noktasıdır. Seri direnç (R_s) değeri;

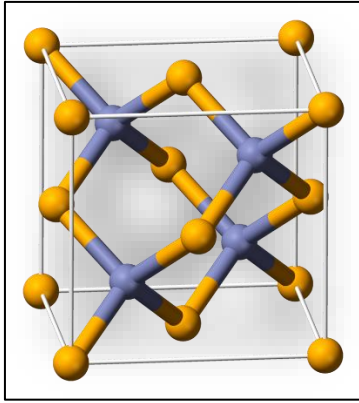
$$R_s = \frac{kT(\gamma - \eta)}{I} \quad (2.23)$$

eşitliği ile tanımlanır. Buradaki (I) akım, $F(V)$ fonksiyonundaki minimum gerilime karşılık gelen değerdir [55].

2.6. ZnSe Kristal Yapısı

Çinko (II. grup elementi) ve Selenyum'un (VI. grup elementi) birleşmesiyle oluşan Çinko Selenid (ZnSe), geniş bant aralığına sahip katı bir yarıiletkenidir. Çinko içeren ikili bileşikler, görünür bölgede geniş enerji bant aralığı, düşük absorpsiyon özellikleri ve yüksek optik geçirgenlik sunar [56]. ZnSe, 2,7 eV gibi geniş enerji bant aralığına, yüksek kırılma indisine, görünür bölgede yüksek şeffaflığa ve 22 meV'lik büyük eksiton bağlama enerjisine sahiptir. ZnSe, benzersiz optik ve elektriksel özelliklere sahip olmasından dolayı optoelektronik uygulamalarda ilgi görmektedir. ZnSe, ışık yayan diyotlar, sensörler, fotodiyotlar, fotoluminesans, fotodedektörler, gece görüş sistemleri gibi teknolojik cihazlarda tercih edilmektedir [57,58].

ZnSe iki kristal yapıda bulunur; daha kararlı olduğu sanılan çinko blende (kübik) ve wurtzite (hekzagonal). II- VI ikili bileşik grubunda bulunan yarıiletkenler gibi ZnSe genellikle n-tipi yarıiletken özelliği göstermektedir [59].



Şekil 2.8. ZnSe kristalinin kafes yapısı (Sarı renkli küreler Se, mor renkli küreler Zn atomlarını temsil etmektedir [60]).

ZnSe yarıiletkenin bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

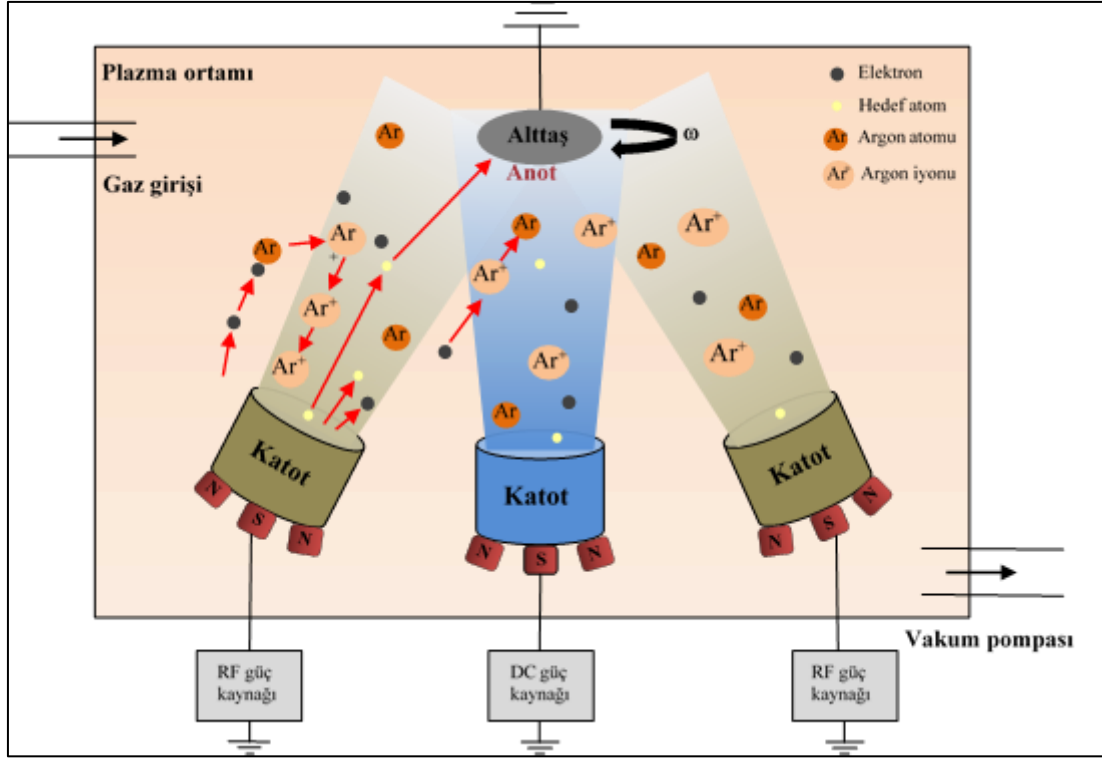
Çizelge 2.1. ZnSe kristalinin kimyasal ve fiziksel özellikleri [61- 63].

Özellikler	Değer
Yoğunluk	5,266 g/cm ³
Kırılma indisi (n_D)	2,4028 (10.6 µm)
Termal iletkenlik	18 W m ⁻¹ K ⁻¹ T=298K
Erime noktası	1525°C
Moleküler ağırlık	144,33 g/mol
Kristal yapısı	Kübik, hekzagonal
Özgül ısı kapasitesi	339 J Kg ⁻¹ K ⁻¹
Çözünürlük	0,001g/100g suda
Görünüm	Katı, açık sarı renk
İletkenlik	n-tipi

3. KULLANILAN YÖNTEMLER VE DENEYSEL SİSTEMLER

3.1. Eş Püskürtme Yöntemi İle İnce Film Biriktirme

Püskürtme (sputtering), alttaş üzerine ince film büyütmede yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir. Bu teknik, alttaş üzerine biriktirilmesi planlanan katı malzemenin yüzeyindeki atomların, yüksek enerjiye sahip iyonize olmuş gaz atomlarının borbardımanıyla sökülülerek kopartılması ve bu koparılan atomların alttaş üzerine biriktirilmesine dayanmaktadır. Bu yöntem soğuk plazma bazlı olduğu için düşük sıcaklıklarda biriktirme imkanı vermesi bakımından oldukça avantajlıdır ve bu sayede çeşitli alttaşlar üzerine kaplamalar yapılabilir. Magnetron püskürtme düşük kirlilik seviyesi, kaplama kimyası ve mikroyapısının hassas kontrolü gibi avantajlara da sahiptir. İnce filmdeki kristal ve mikro yapı, büyüme sırasında alttaşa ve ince filme verilen enerjiye bağlıdır [64]. Eş püskürtme yönteminde, hedef malzeme katota, ince film kaplanacak alttaş ise anota yerleştirilir. Yüksek vakum ($10^{-6} - 10^{-9}$ mbar) ortamı oluşturulduktan sonra, plazmanın oluşmasını sağlayacak olan asal gaz olarak yüksek saflığa sahip Argon (Ar) gazı ortama verilir. Katot ve anot arasına uygulanan gerilim sonrasında, vakum içerisinde bulunan serbest elektronlar, elektrotların arasında oluşan elektrik alan sayesinde hızlanarak katottan anota doğru harekete başlarlar. Daha sonra bu hızlandırılmış olan elektronlar nötr haldeki Ar gazı ile etkileşime girerek iyonlaştırır ve bu sayede plazma ortamı sağlanır. İyonlaşmış haldeki Ar^{+} atomları katottaki hedef malzemeden atomları koparırlar ve anottaki alttaş yüzeyine çarparak orada ince film oluştururlar [65]. Püskürtme işleminin şematik diyagramı Şekil 3.1’de verildi.



Şekil 3.1. Eş-püskürtme sisteminde püskürtme prosesinin şematik gösterimi

Püskürtme yöntemleri, anot ve katot arasında gerilimi sağlamak için kullanılan güç kaynaklarına göre DC (doğru akım) ve RF (Radyo Frekans) püskürtme olarak iki gruba ayrılır. DC püskürtme yönteminde anot ve katot arasına DC gerilim uygulanır. RF püskürtme yönteminde ise anot ve katot arasına alternatif bir gerilim uygulanır ve bu elektrotlar alternatif akımın frekansına göre anot- katot değişimi geçirir [66]. Püskürtme yönteminde büyütülen ince filmin özelliklerini etkileyen bazı parametreler vardır. Bunlar, Ar gazı miktarı ve basıncı, alttaş sıcaklığı, elektrotlar arası uzaklık, biriktirme süresi, kullanılan hedef malzemenin cinsi, ortamın vakum seviyesi ve uygulanan güçtür.



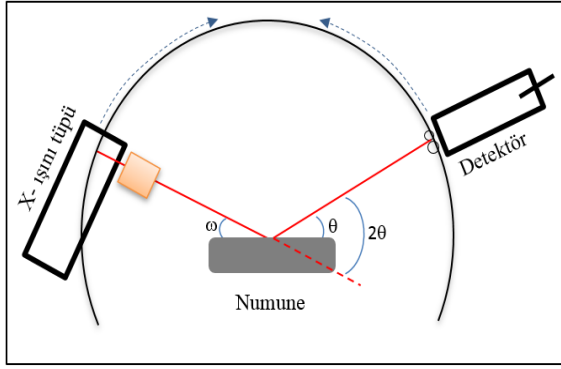
Resim 3.1. Nanovak NVTs-500 eş-püskürtme sistemi

Bu tez çalışmasında araştırılan ZnSe ince filmler, Resim 3.1’de gösterilen Nanovak NVTs-500 Eş Püskürtme sisteminde büyütüldü. Bu sistemde, 2 adet RF ve 1 adet DC hedef başlığı bulunmaktadır. Sistemde bulunan döndürme ünitesi sayesinde alttaşlar döndürülerek kaplanır ve bu sayede homojen bir film elde edilir.

3.2. Karakterizasyon Teknikleri

3.2.1. X ışını kırınım sistemi (XRD)

X ışını fotonları, elektromanyetik spektrumda, 0,01 ila 10 nm dalga boyu aralığında bulunmaktadır. X ışınımı kırınımı, malzemelerin yapısal özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan önemli bir tekniktir. X ışınımı kırınımı (XRD) yoluyla malzemelerin makroskopik özelliklerinin belirlenmesinin yanında atomik ve moleküler düzeyde de haritalandırma ve analizle mikroskobik özellikler de belirlenebilir [67]. X ışını kırınımı, kaplanan ince filmlerin kalınlığını, kusur yapısını, gerginliğini ve katmanlı yapıların alaşım oranlarını belirlemede kullanılan bir analitik tekniktir. Kristalin örgü parametreleriyle aynı dalga boyundaki X ışınlarının kristalde kırınımı, XRD’nin çalışma prensibidir. Şekil 3.2’de XRD çalışma prensibinin diyagramı gösterilmektedir.

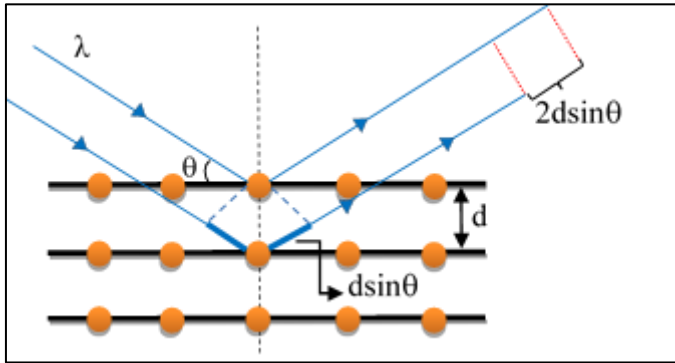


Şekil 3.2. XRD cihazı çalışma prensibi

Bütün kırınım olaylarında Eş. 3.1’de verilen Bragg yasası esas alınmaktadır [68].

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (3.1)$$

Şekil 3.3’te X ışını kırınımının diyagramı verilmiştir. Diyagram ve Eş. 3.1’e göre, kristal düzlemleri arasındaki uzaklık d , X ışınının kırınım açısı θ , kırınım mertebesi, $d\sin\theta$, faz farkı, 2θ , dedektor açısı ve ışının dalga boyu λ ile ifade edilmektedir.



Şekil 3.3. Kristal düzlemde X-ışını kırınımı

X ışını kristal numunenin üzerine düştüğünde atomların düzlemleri tarafından kırılıma uğrar. Oluşan kırınım deseni sayesinde bragg yasası ile d düzlemler arasındaki uzaklık hesaplanır ve nihayetinde parametrik denklemler ile örgü uzunluğu hesaplanır. Ters örgü haritalaması ile örgü noktalarını görmek mümkündür. Kristalin ters örgü noktaları ile örgü uzunluğu parametreleri daha kesin bilinerek örgü rahatlamaları hakkında bilgi edinilir. Kristal numune üzerine düşen X ışınının açısı omega (ω), kırınımlı ışın ile olay arasındaki açı 2θ ’dır. $\omega/2\theta$, numune üzerine düşen ışık kaynağının doğrultusu ile detektör arasında kalan açığı ifade eder.

Kübik kristal yapısına sahip olan bir malzemenin düzlemler arası boşluğu, d ;

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (3.2)$$

eşitliği ile belirlenir. h, k ve l kristal düzlemlerinin miller indisleridir. Örgü uzunluğu a ise;

$$a = d_{hkl} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (3.3)$$

eşitliği kullanılarak belirlenir. XRD analizinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda numunenin tanecik boyutu;

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3.4)$$

Debye – Scherrer formülü kullanılarak hesaplanabilir. k , kristalit-şekil faktörü olarak adlandırılan, kübik sistemler için değeri yaklaşık 0,94 olan sayısal bir faktördür. β , (FWHM) pik yarı genişliğini ve θ , Bragg açısını ifade etmektedir [68,69].

XRD analizi sonucunda film üzerinde oluşan gerilme (Strain), gerilme hesabı yapılacak olan malzemenin referans örgü sabiti a_0 ve numuneye ait örgü sabiti a olmak üzere;

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\Delta a}{a_0} = \frac{a_0 - a}{a_0} \quad (3.5)$$

eşitliği ile hesaplanabilir [70,71].

Standart bir XRD sisteminin temel elemanları yüksek hassasiyetli, numune etrafında döne-bilen bir detektör, X ışını üretebilen bir tüp ve yüksek yoğunluklu X ışını ve diğer ışınları paralel hale getirmek için kullanılan kristal monokromatörden oluşmaktadır. X ışını tüpü 40 kV / 40 mA parametrelerinde çalışan güçlü bir kaynak kullanır. Bu kaynaklar değişik dalga boylarına sahip olan Cu, Ag, Mo, Co, Cr elementlerinden herhangi birisi kullanılabilir. Bu çalışmada kullanılan ölçüm, ($\text{CuK}\alpha_1$ $\lambda = 0,1540562$ nm) bakır kaynağı kullanılarak yapılmıştır. XRD ölçümünün yapıldığı cihaz Resim 3.2’de verildi.



Resim 3.2. XRD cihazı (Bruker D8 Advance)

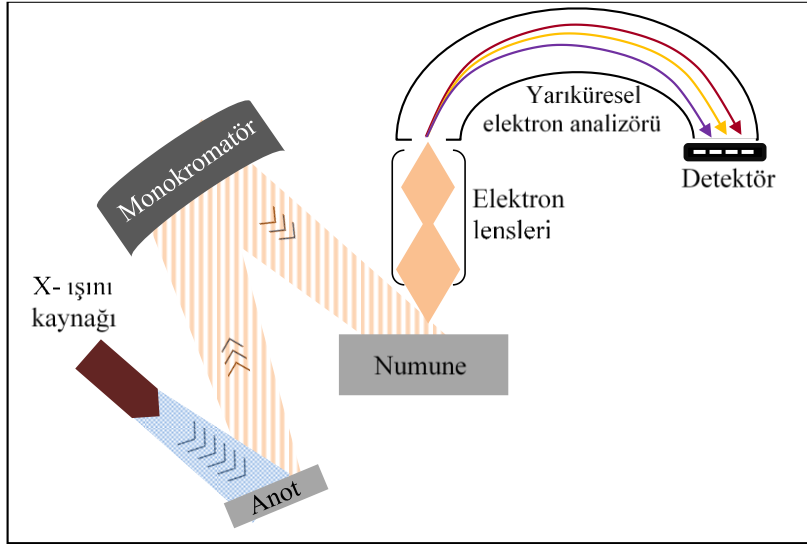
3.2.2. X ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS)

X ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) yüzey kimyasının analizi için kullanılan bir sistemdir ve fotoelektrik etkisine dayalı bir teknik kullanır. XPS ölçümünde, numune yüzeyi X ışını (≤ 6 keV) bombardımanına uğrar ve yüzeydeki atomların elektronlarının sökülmesiyle fotoelektronlar oluşur. Elektron analizörüyle bu fotoelektronların kinetik enerjileri analiz edilerek elektronların bağlanma enerjileri elde edilir. Bir elektronun bağlanma enerjisi maddeye bağlı bir özelliktir ve uyarmak için gönderilen X-ışını kaynağından bağımsızdır. Farklı bir X-ışını kaynağı kullanıldığında fotoelektronların bağlanma enerjisi sabit kalırken kinetik enerjileri Eş. 3.6'da verildiği gibi değişecektir.

$$BE = h\nu - KE - \Phi_{spec} \quad (3.6)$$

BE elektronun bağlanma enerjisi, KE elektronun kinetik enerjisi, $h\nu$ gönderilen x ışını enerjisi ve Φ_{spec} iş fonksiyonudur [72]. Fotoelektron spektroskopisi gönderilen ışık kaynağındaki fotonların enerjisine bağlı olarak farklı şekillerde isimlendirilir. Gönderilen fotonun sahip olduğu enerji 200 eV ile 2000 eV aralığındaysa X ışını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS), 10 eV ile 60 eV aralığındaysa Ultraviyole Fotoelektron Spektroskopisi (UPS) olarak adlandırılır. X ışını kaynağı olarak Al K α (1486,6 eV) ve Mg K α (1253,6 eV) kullanılır [73]. XPS ölçümü sonucunda, numune yüzeyinden yayılan fotoelektronlar analiz edildikten sonra kinetik enerjinin bir fonksiyonu olan fotoelektronların yoğunluk spektrumu elde edilir. Bu

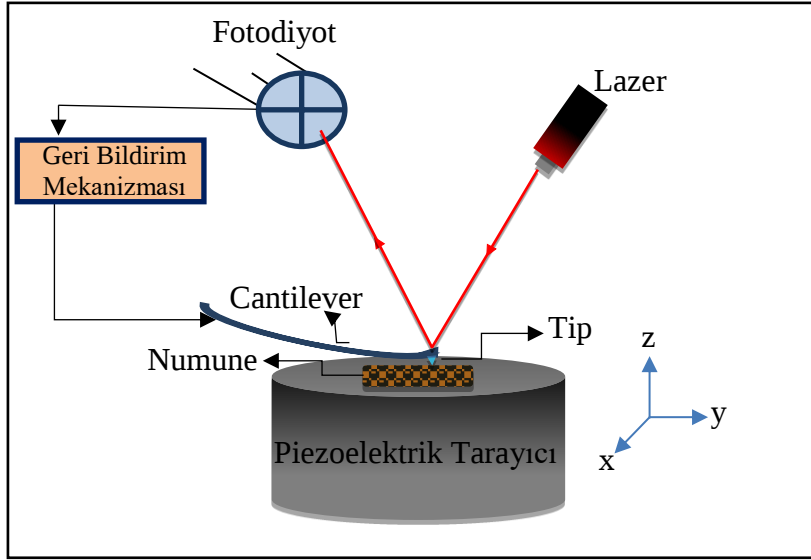
spektrumla numunenin kimyasal stokiyometri ve bağlarıyla birlikte elementel analizi yapılabilir. Bu tez çalışmasında Omicron XPS sistemi kullanılmıştır. XPS sisteminin çalışma prensibinin şematik gösterimi Şekil 3.4’te verildi.



Şekil 3.4. XPS sisteminin çalışma prensibi

3.2.3. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM)

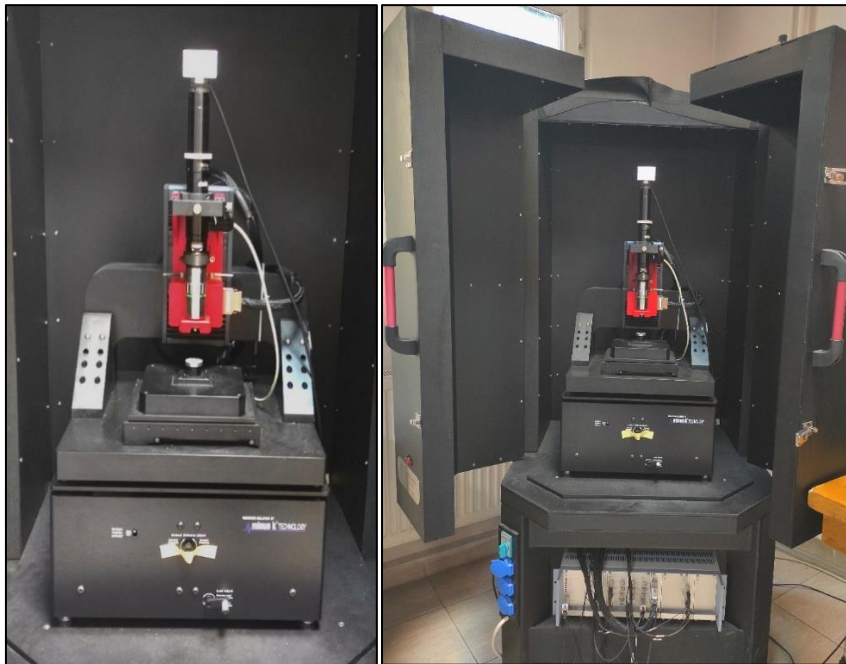
Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) angstrom seviyesinden birkaç yüz mikron seviyesine kadar olan numune yüzeyinin topografik analizi için kullanılan bir tarama mikroskobudur. Numune yüzeyi ile tarayıcı iğnenin atomik etkileşimi sonucu yüzeyin topografik görüntüsü elde edilir. Atomik Kuvvet Mikroskobu atomik boyutlarda bir iğneye sahip cantilever, piezoelektrik tarayıcı ve lazer fotodiyottan meydana gelmektedir. Cantileverın ucuna tutturulmuş, silikon veya silikon nitrürden yapılmış olan atomik boyuttaki iğne ile numune yüzeyi arasında oluşan çekici ve itici kuvvetlerin sebep olduğu etkileşimle, cantileverda aşağı ve yukarı yönlü nanometre mertebesinde sapmalar meydana gelir. Kullanılan lazer cantileverın üzerine yansır, esnek yayda sapmalar oluştuğunda yansıyan lazer ışınında da sapmalar meydana gelir. Konuma duyarlı olan fotodiyot, lazer ışınının sapmalarını algılayarak yüzeyin morfolojik görüntüsünün elde edilmesini sağlar [74].



Şekil 3.5. AFM şematik gösterimi

Atomik Kuvvet Mikroskobu ile numunenin yüzey morfolojisi, tanecik boyutu ve pürüzlülüğü belirlenebilir. Sistemin şematik gösterimi Şekil 3.5’te verildi.

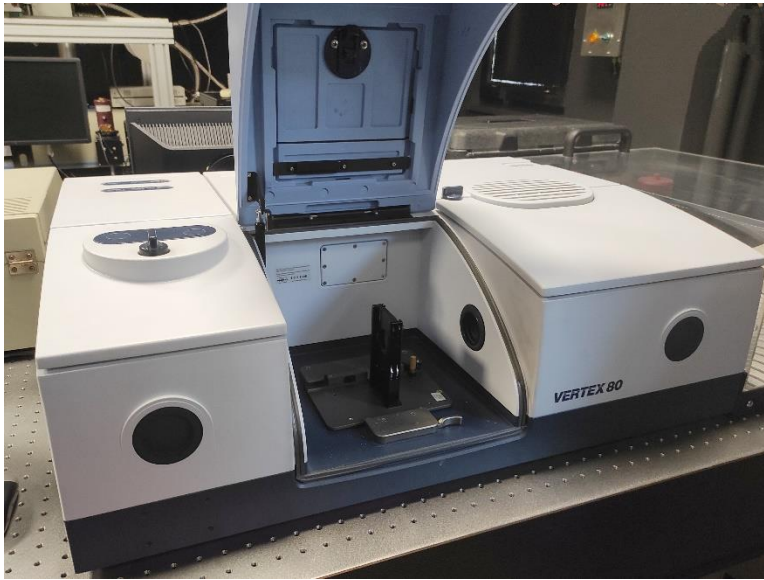
Bu tez kapsamındaki numunelerin topografik analizi Resim 3.3’de verilen Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan NanoMagnetics marka şeklindeki AFM cihazı kullanılarak yapılmıştır.



Resim 3.3. AFM sistemi (NanoMagnetics)

3.2.4. Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrometresi

Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi, titreşim spektroskopisi olmakla beraber malzemelerin kimyasal bağ analizlerinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemin temelinde, moleküllerin arasında oluşan bağların titreşim ve dönme hareketleriyle üzerine düşen kızılötesi ışınları soğurması yatmaktadır. FTIR ölçüm tekniğiyle organik ya da inorganik malzemelerin fonksiyonel gruplar, bağlı olan atomların türü ve durumu belirlenebilir. Bunların yanı sıra malzemenin optik geçirgenlik ve yansıtıcılık özellikleri de ölçülebilmektedir.



Resim 3.4. FTIR sistemi (Bruker Vertex 80)

Bu tez çalışmasında kullanılan numunenin $370 - 7500 \text{ cm}^{-1}$ dalgaboyu aralığındaki optik geçirgenlik ölçümü Gazi Üniversitesi, Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan ve Resim 3.4'te verilen Bruker marka Vertex 80 model FTIR sistemi kullanılarak yapılmıştır. Bu FTIR cihazında, HeNe lazer kaynağı ve 3 adet detektör bulunmaktadır. Bunlar, hava soğutmalı ve yüksek enerjili DLTGS , Broadband MCT ve NIR bölgede çalışan bir InGaAs dedektörleridir.

3.2.5. UV-Vis spektroskopisi

UV-Vis spektrometresi, (UV) morötesi, (Vis) görünür ve (NIR) yakın kızılötesi spektral bölgelerdeki fotonların spektroskopisini kapsamaktadır. UV-Vis spektrometresi, ışık kaynağı (halojen ve döteryum lamba), monokromatör, detektör ve numune tutucu olmak üzere dört

kısımdan oluşur. Bu spektrometrenin amacı, ölçümü yapılan numunenin ışığı yansıtma (R), geçirme (T) ve soğurma (A) özelliklerini analiz etmektir. Alınan optik sinyallerin elektrik sinyallerine dönüştürülmesiyle numunenin optik spektrumu elde edilir. UV-Vis spektroskopisi sonucunda elde edilen geçirgenlik (T) spektrumu ile yarıiletken ince filmlerin enerji bant aralığı (E_g) hesaplanır. E_g ;

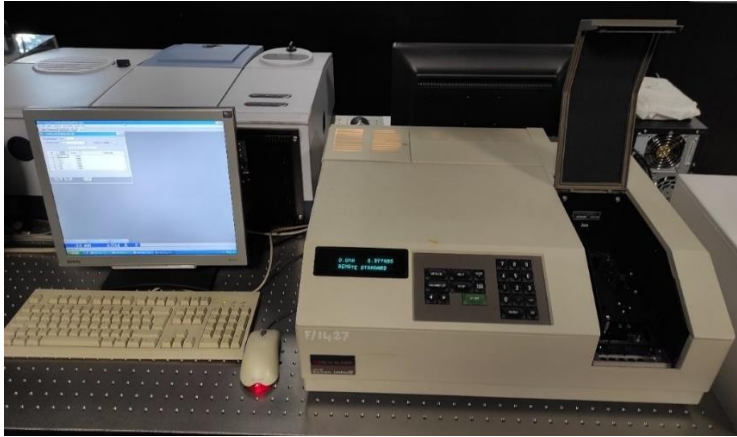
$$ah\nu = A(h\nu - E_g)^m \quad (3.7)$$

Eş. 3.7’de verilen Tauc formülü ile hesaplanır [75]. $h\nu$ gelen fotonun enerjisi, A enerjiden bağımsız bir sabit , m geçiş modu katsayısıdır ve direkt ve indirekt geçiş için sırasıyla $\frac{1}{2}$ ile 2 değerlerini alır [76] ve α soğurma katsayısıdır.

Soğurma katsayısı (α), Beer-Lambert formülü ile belirlenir [77]:

$$\alpha = -\frac{1}{t} \ln T \quad (3.8)$$

eşitlikteki T ince filmin optik geçirgenliği ve t ince film kalınlığıdır.



Resim 3.5. UV-Vis spektrometresi (Perkin Elmer Lambda 2S)

Bu tez çalışmasında, cam alttaşlar üzerine büyütülen ince filmlerin optik analizleri, Resim 3.5’te gösterilen, Perkin Elmer Lambda 2S isimli, 200 - 1100 nm dalgaboyu ölçüm aralığına sahip olan cihazla yapıldı. Bu cihazda 200 - 340 nm dalgaboyu aralığını tarayabilen Döteryum ve 340 - 1100 nm dalga boyu aralığını tarayabilen Halojen olmak üzere iki adet lamba bulunmaktadır.

3.3. Fabrikasyon Sistemi

3.3.1. Termal buharlaştırma sistemi (Evaporasyon)

İnce film üzerine kaplanan metal kontakların oluşturulması için kullanılan en yaygın tekniklerden birisi (evaporasyon) termal buharlaştırmadır. Kontak malzemesi olarak seçilen yüksek buhar basıncına sahip metaller, vakum ortamında yüksek akım sayesinde buharlaştırılarak ince film üzerine biriktirilir.

Bu tez çalışmasında, ZnSe ince film üzerine yapılan metalizasyon aşamaları Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve araştırma Merkezi'nin sahip olduğu Nanovak markalı NVTH-350 model evaporasyon sistemi kullanılarak yapıldı. Termal buharlaştırma sisteminde dört adet bağımsız buharlaştırma potası bulunmaktadır bu sayede aynı veya farklı metal veya alaşımlar aynı anda buharlaştırılabilmektedir. Sistem , maksimum 4 inç çapa sahip numunelerin metalizasyonunda kullanılmaktadır. Buharlaştırma sistemi en fazla 10^{-7} Torr basınç değerine inebilmektedir. Bu sistemde Ag, Al, Au metalleri ve AuGeNi metalik alaşımın metalizasyon işlemi yapılabilmektedir. Sistemdeki alttaş tutucu 30 rpm'e kadar döndürülerek homojen bir kaplama sağlarken aynı zamanda 400°C'ye kadar da ısıtılabilir.

3.3.2. Hızlı ısıt tavlama (RTA) sistemi

Hızlı ısıt tavlama (RTA) sistemi 10^{-6} mbar vakum veya Ar (Argon) ve N (Azot) gibi farklı gaz ortamlarında sahip olduğu halojen lambalı ısıtıcının etkisiyle birkaç saniyeden daha kısa sürede yaklaşık 1000°C gibi çok yüksek sıcaklıklara ulaşabilen bir yarı iletken tavlama fırınıdır. Isı, kuvarz pencere aracılığıyla halojen lambalardan kızılötesi ışınlama ile alttaşa aktarılır. Sistem, saniyede 200°C ısıtma ve soğutma kabiliyetine sahiptir [78]. Bu tez çalışmasında, oluşturulan alt kontakların omik özelliğe sahip olması için gereken ısıt işlem, Gazi Üniversitesi, Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nin sahip olduğu ve Resim 3.6'da gösterilen hızlı ısıt tavlama sisteminde uygulanmıştır.



Resim 3.6. Hızlı ısıt tavlama (RTA) sistemi

3.3.3. Akım-gerilim (I-V) ölçüm sistemi

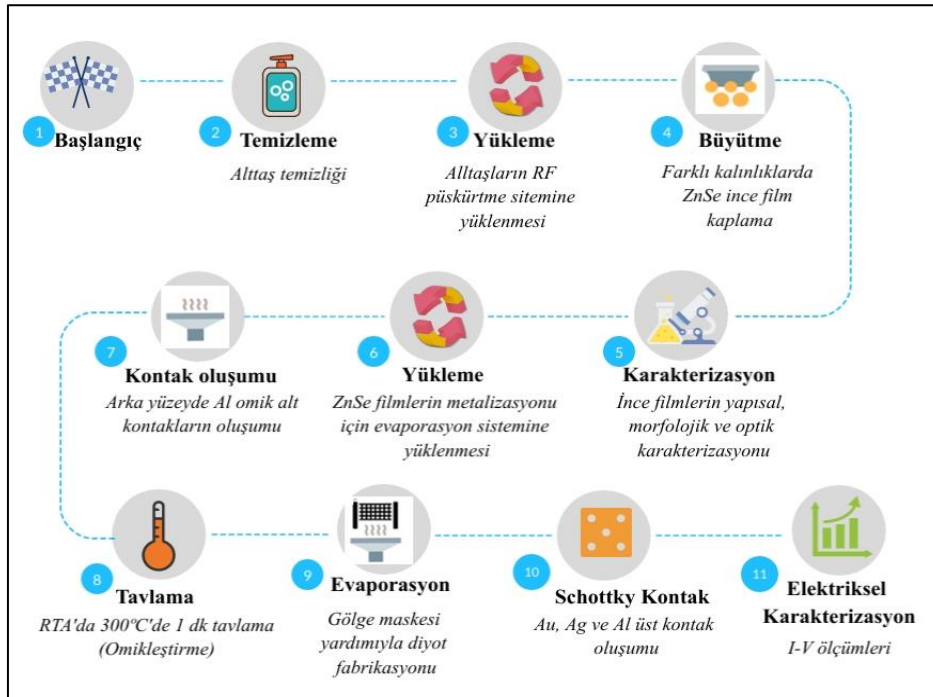
Akım-gerilim (I-V) sisteminde ölçüm için gerekli akım-gerilim kaynakları ve numune tutucu olarak kullanılan ölçüm istasyonu bulunmaktadır. Sistemin sahip olduğu maximum güç 1 A-20 W iken minimum güç ise 100 mA-2 W olarak ayarlanabilmektedir. Sistemin sahip olduğu yazılımla, I-V eğrisi ve belirlenecek olan elektriksel parametreler işlenebilmektedir. Numuneye uygulanan farklı gerilimlerle akım, kapasitans, dielektrik özellikler, bariyer yüksekliği, taşıyıcı yoğunluğu, özdirenç, iletkenlik ve idealite faktörü gibi parametreler hesaplanabilir. Ölçüm istasyonunda I-V ölçümü yapılacak olan numuneden kontak alabilmek için altın iğne uçlarına sahip yaylı kontak pimler ve 4 adet bağlantı noktası bulunmaktadır. Resim 3.7’de gösterilen I-V ölçüm sistemi, Keithley 2602B güç ölçüm ünitesine ve AM1.5 standardında ölçüm yapabilen Newport Oriel Sol1A güneş simülatörüne sahiptir. Bu sistemde karanlık ve aydınlık ortam I-V ölçümleri yapılabilmektedir. Bu çalışmada, Keithley 4200-SCS model yarıiletken karakterizasyon sistemi kullanılarak numunenin aydınlık ve karanlık ortamda elektriksel ölçümleri yapılmıştır (Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi).



Resim 3.7. Keithley 4200-SCS *I-V* sistemi ve NewPort Oriel Sol3A güneş simulators

4. ZnSe İNCE FİLMLERİN ÜRETİLMESİ

Bu tez çalışmasında, üç farklı kalınlığa sahip olan ZnSe ince filmler püskürtme sisteminde büyütüldü. Püskürtme yöntemi, yüksek kristaliteye sahip ince filmlerin büyütülmesine olanak sağlarken aynı zamanda düşük maliyet avantajına da sahiptir. Bu sistemde büyütülen ZnSe ince filmlerin yapısal analizi X ışınları kırınım sistemi (XRD) ve X ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) ile yapıldı. UV- VIS spektroskopisi ile de ince filmlerin optik analizi yapıldı. ZnSe ince filmlerin elektriksel analizi için de öncelikle evaporasyon sistemiyle kaplanan Schottky diyotların fabrikasyon işlemi gerçekleştirildi. Daha sonra I-V ölçüm cihazında ölçüm yapılarak akım – gerilim (I-V) grafikleri elde edildi. Üretilen Au/ZnSe/i-Si Schottky diyotların alttaş temizliğinden başlanarak, karakterizasyon, fabrikasyon ve son olarak I-V ölçümüne kadar olan tüm aşamaları Şekil 4.1’de verildi.



Şekil 4.1. Au/ZnSe/i-Si Schottky diyotların üretim ve karakterizasyonlarının akış şeması

4.1. Altaş Temizleme İşlemi

Büyütülecek olan ince filmlerin homojen olabilmesi için doğru alttaş temizliği en önemli noktalardan birisidir. Üretilen ince filmlerde, yüzey kirliliğinden oluşabilecek her türlü olumsuz etkiyi yok edebilmek için i-Si ile cam alttaşlar çeşitli temizleme işlemlerine maruz

bırakıldı. Si alttaş temizleme sürecinde, öncelikle 10 dakika boyunca ayrı ayrı aseton ve daha sonra izopropanol alkol içerisinde ultrasonik banyo uygulandı. Her kimyasal temizleme adımından sonra deiyonize su ile durulanarak yüksek saflığa sahip Azot (N) gazı yardımıyla kurutuldu. Cam alttaş temizliğinde ise, öncelikle alttaşlar sabunlu suda sünger yardımıyla yüzeyi çizmeyecek şekilde temizlendi. Daha sonra 10 dakika boyunca izopropanol alkolde ultrasonik banyo uygulandı ve deiyonize su ile durulanarak Azot gazı yardımıyla kurutuldu. Temizlik işlemleri bittikten sonra alttaşlar herhangi bir kirliliğe maruz kalmaması için vakit kaybetmeden büyütme işleminin yapılacağı vakumlu sistemlere yüklendi.

4.1.2. ZnSe ince filmlerin eş püskürtme yöntemi ile üretimi

Bu tez çalışmasında üretilmesi planlanan ZnSe ince filmler RF magnetron eş püskürtme tekniği kullanılarak 24°C ortam sıcaklığında büyütüldü. Büyütme aşamasında % 99,99 saflıkta ZnSe bulk haldeki hedef kullanılarak yaklaşık olarak 100, 300 ve 600 nm olmak üzere üç farklı kalınlığa sahip ince filmler büyütüldü. Kullanılan cam alttaş, filmin optik özelliklerinin incelenmesi amaçlanarak kullanıldı. Sistem 10^{-6} Torr basınç değerine ulaştıktan sonra, büyütme işlemi için Argon gazı basıncı 30 mTorr, RF gücü 100W olarak ayarlandı ve Çizelge 4.1’de verilen parametrelerde ince filmler başarılı bir şekilde büyütüldü. Üretimi tamamlanan ince filmlerin kalınlık ölçümleri Veeco - Dektak 150 Yüzey Profilometresi aracılığıyla tamamlandı.

Çizelge 4.1. ZnSe ince filmlerin büyütme parametreleri

<i>Film Kalınlığı</i> (nm)	<i>Kaplama Süresi</i> (Dk)	<i>RF Gücü</i> (W)	<i>P_{base}</i> (Torr)
100	11	100	10^{-6}
300	33	100	10^{-6}
600	55	100	10^{-6}

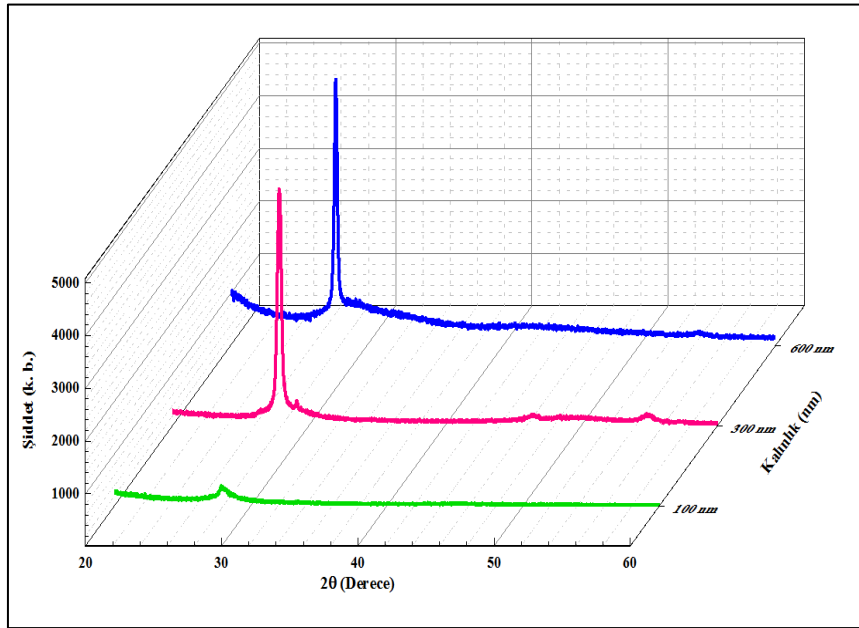
5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Karakterizasyonlar

5.1.1. Yapısal karakterizasyon

XRD Analizi

Üç farklı kalınlığa sahip ZnSe ince filmlerin XRD analizi 2θ moduyla, 20° ile 60° aralığında, 0,019 adımlı tarama ile yapıldı. Şekil 5.1.'de üç farklı kalınlığa sahip filmlerin XRD grafiği verildi. ZnSe ince filmin X ışını kırınım deseninde en yüksek şiddete sahip olan pik $2\theta = 27,857^\circ$ 'de (111) miller düzlemine karşılık gelmektedir. Diğer pikler ise $2\theta = 46,359^\circ$ 'da (220) ve $2\theta = 54,813^\circ$ 'de (311) miller düzlemine karşılık gelmektedir. Bu düzlemlere karşılık gelen pikler elde edilen ZnSe ince filminin kübik örgü yapısında olduğunu göstermektedir (JPDS Card No. 01-081-8293). Şekil 5.1'de görüldüğü gibi, (111) miller düzlemine karşılık gelen keskin pik film kalınlığının artmasıyla daha şiddetli ve daha keskin hale gelmiştir. 600 nm film kalınlığına sahip olan numune (111) miller düzlemindeki yüksek şiddetli keskin ve dar yarı genişlikli pikle, numunenin tek kristal olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.1. ZnSe ince filmlerin X-ışını kırınım desenleri

ZnSe ince filmlerin yapısal özellikleri üzerine film kalınlığı farkının etkisini daha detaylı inceleyebilmek için XRD dataları kullanılarak tanecik boyutu, örgü sabiti gibi kristal yapı parametreleriyle birlikte film gerilmeleri hesaplandı. Elde edilen sonuçlar da Çizelge 5.1’de verildi.

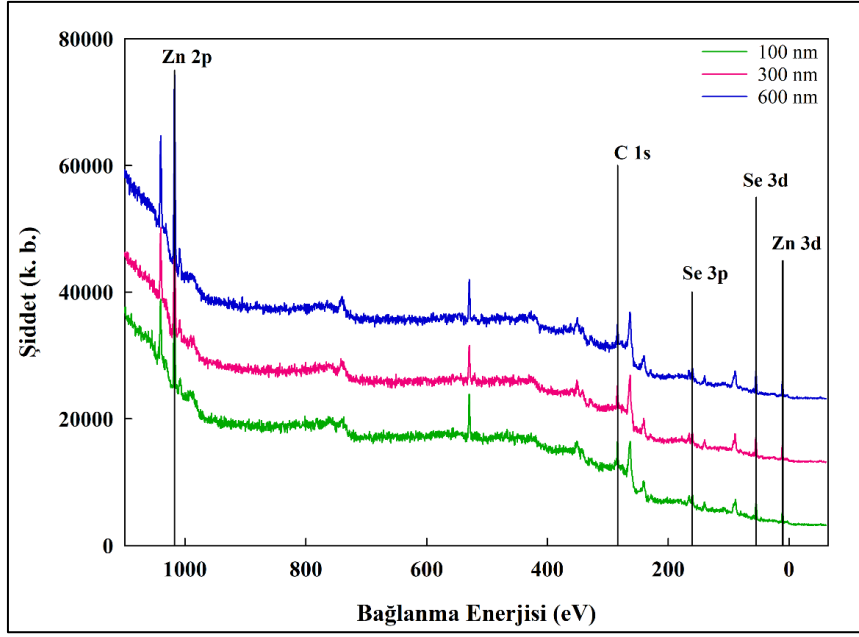
Çizelge 5.1. ZnSe ince filmlerin XRD analizi sonucunda hesaplanan parametreleri

Film Kalınlığı (nm)	hkl	2θ (°)	FWHM (°)	Tanecik Boyutu (nm)	Ortalama Tanecik Boyutu (nm)	Örgü sabiti “a” (Å)	Ortalama Örgü sabiti “a” (Å)	Strain (ε _a)
100	[111]	27,857	0,768	11,14	11,14	5,5471	5,5471	0,006188
	-	-	-	-		-		
	-	-	-	-		-		
300	[111]	27,844	0,342	25,01	18,34	5,5496	5,5479	0,006035
	[220]	46,359	0,602	15,00		5,5395		
	[311]	54,813	0,624	14,99		5,5546		
600	[111]	27,318	0,247	34,63	34,63	5,5726	5,5726	0,00162
	-	-	-	-		-		
	-	-	-	-		-		
Bulk	(JPDS Card No. 01-081-8293)					5,5816		

ZnSe ince filmlerin polikristal yapıda olduğu ve film kalınlığı arttıkça kristalitenin de arttığı gözlemlendi. Kristalitenin film kalınlığı ile arttığı literatürle doğrulandı [79,80]. Kristalite-deki bu artış, kümeleşmenin artmasına, atomların yeniden düzenlenmesine ve film büyütül-mesi sırasında gerilmenin (Stress) azalmasına bağlanabilir [34].

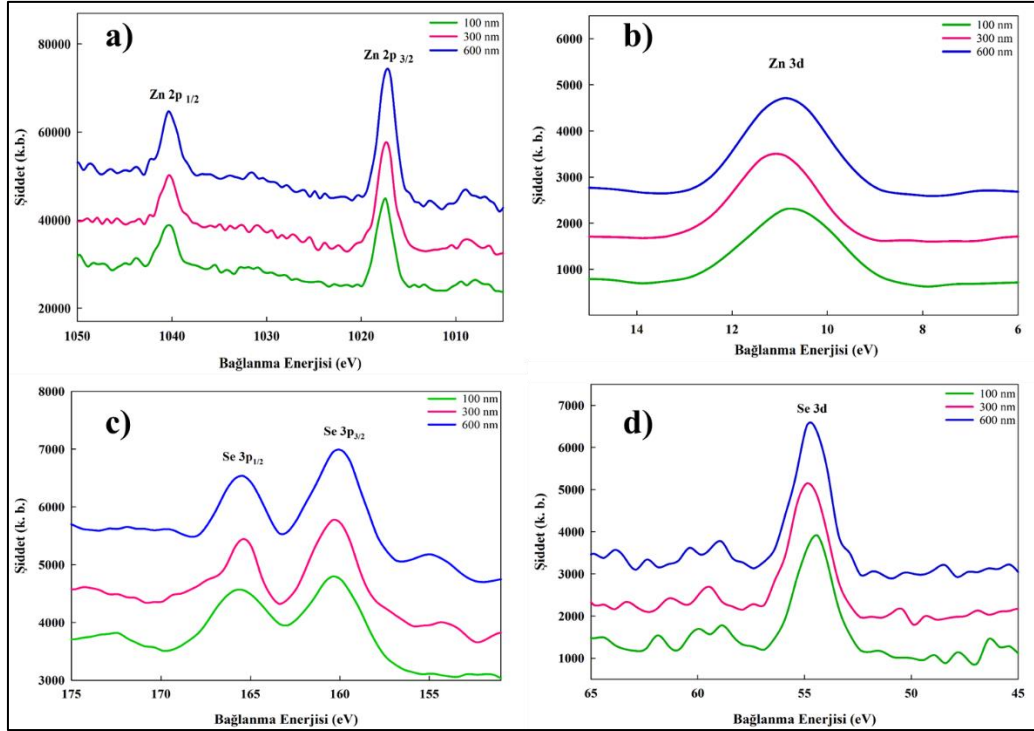
XPS Analizi

Yapılan XPS analizi ile numune yüzeylerinin kimyasal bileşimi ve malzeme yüzeylerinin yüzeyden yaklaşık 4 nm kadar derinlikteki kimyasal durumları belirlenebilir. Şekil 5.2’de ZnSe ince filmlerin XPS tarama spektrumları verildi. Elementlerin bağlanma enerjileri, 284 eV bağlanma enerjisine sahip olan Karbon (C) sinyaline göre kalibre edildi [81]. XPS spektrumunda çizgilerle belirtilen pikler numune içerisinde çinko (Zn), selenyum (Se) ve karbon (C) elementlerinin varlığını doğrulamaktadır.



Şekil 5.2. ZnSe ince filmlerin XPS analizleri

Zn 2p ($\text{Zn } 2p_{1/2}$, $\text{Zn } 2p_{3/2}$) çekirdek seviyelerinin bağlanma enerjileri sırasıyla 1040,40 eV ve 1017,9 eV değerlerine karşılık gelir. Zn 2p spin - yörünge bölünmesi $\Delta E = 23,27$ eV'lik bir enerji ayrımı sergilemektedir [82]. Şekil 5.3b'de gösterilen Zn 3d çekirdek seviyesi bağlanma enerjisi 10,3 eV'dir. Se 3p ($\text{Se } 3p_{1/2}$, $\text{Se } 3p_{3/2}$) çekirdek seviyelerinin bağlanma enerjileri sırasıyla 165,9 eV ve 160,3 eV değerlerine karşılık gelerek literatürle de uyumlu olduğu görüldü [83]. Se 3p $_{1/2}$ ve Se 3p $_{3/2}$ arasındaki spin yörünge bölünmesi 5,6 eV'dir. Se 3d çekirdek seviyesi için bağlanma enerjisi 54,9 eV olarak kaydedilirken çoklu bölünme gözlemlenmedi. Şekil 5.3'te ZnSe ince filminin XPS dar tarama spektrumlarıyla Zn ve Se elementlerinin çekirdek seviyelerinin bağlanma enerjileri gösterildi.

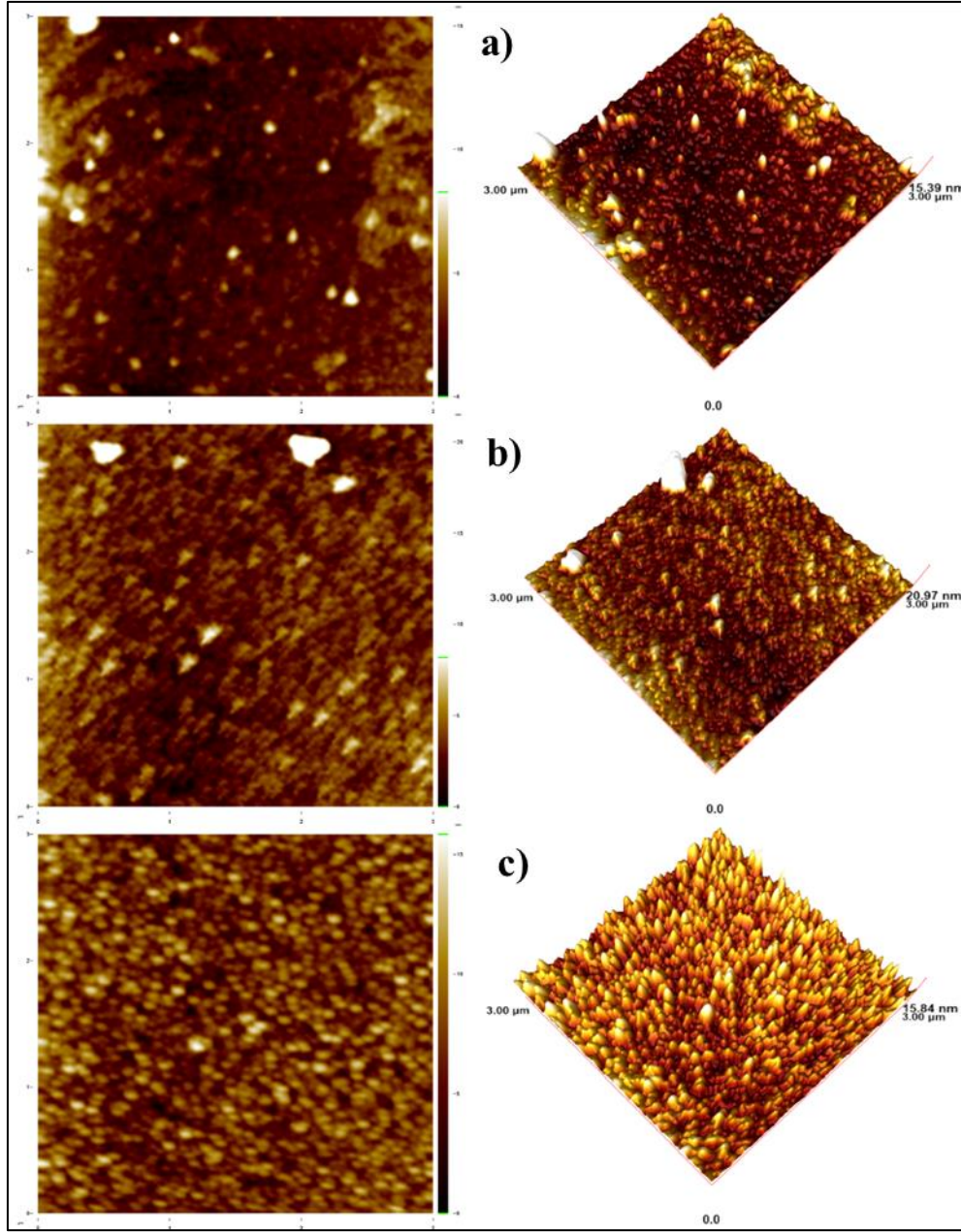


Şekil 5.3. XPS dar tarama a)Zn 2p, b)Zn 3d, c) Se 3p, d)Se 3d spektrumları

5.1.2. Morfolojik karakterizasyon

AFM Analizi

ZnSe ince filmlerin yüzey morfolojisi AFM sistemi ile incelendi. Tüm ölçümler $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ alanda ve oda sıcaklığında yapıldı. Üç farklı film kalınlığına sahip ZnSe ince filmlerin (2D) iki boyutlu ve (3D) üç boyutlu topografik görüntüleri Resim 5.1’de verildi. Görüldüğü gibi üretilen filmlerin yüzey morfolojisi homojendir ve tanecikler düzenli bir şekil ve boyuta sahiptir. Taneciklerin alttaş üzerine dağılımı düzenli bir şekildedir.



Resim 5.1. 2D ve 3D AFM görüntüleri a) 100 nm b) 200 nm c) 600 nm

AFM ölçümünde elde edilen yüzey pürüzlülüğünün kök ortalama kare (RMS) değerleri artan film kalınlığına göre 1,37 nm'den 2,16 nm'ye artış gösterdi ve bu değerler Çizelge 5.2'de verildi. Bu durum film kalınlığı arttıkça yüzey kaplamasının önemli ölçüde iyileştiğini göstermektedir. Film kalınlığındaki artış ile birlikte kristalit aglomerasyondaki artışa bağlı olarak tanecik boyutunun da arttığı gözlemlendi [84,85].

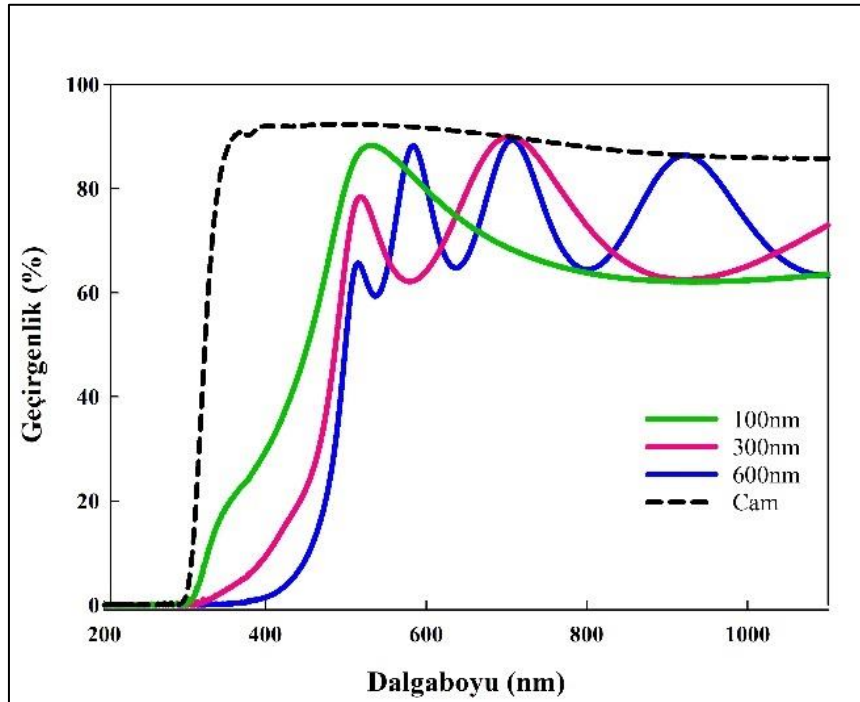
Çizelge 5.2. ZnSe ince filmlerin RMS değerleri

Film Kalınlığı (nm)	Tanecik boyutu (nm)	Rms (nm)
100	16	1,37
300	34	1,49
600	45	2,16

5.1.3. Optik karakterizasyon

UV-Vis Analizi

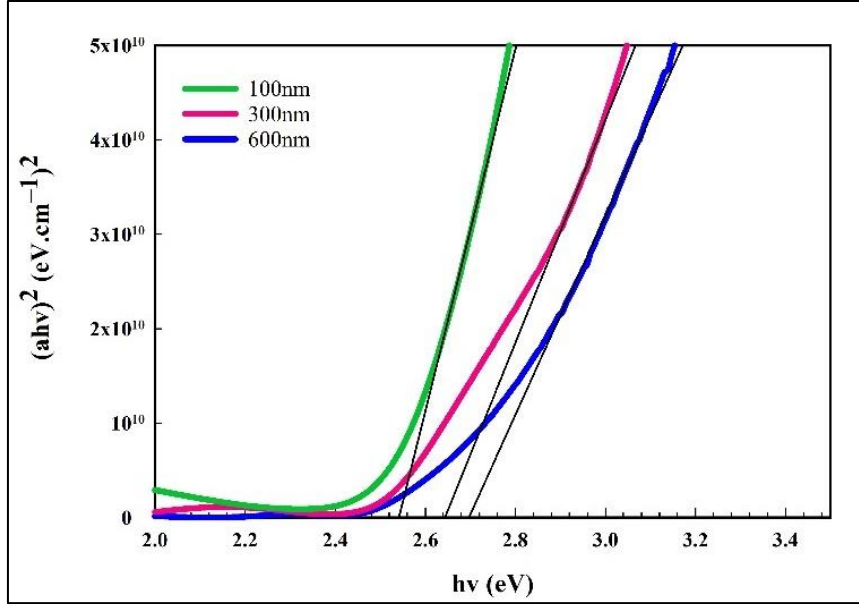
Cam alttaşı üzerine büyütülen ZnSe ince filmlerin kalınlığa bağlı optik geçirgenlik spektrumları 200 nm ile 1100 nm dalga boyu aralığında UV-Vis sistemi yardımıyla analiz edildi. Şekil 5.4'te üç farklı kalınlıktaki ZnSe ince filmler ile boş cam alttaştın ölçülen dalga boyu aralığındaki geçirgenlik (%) ölçümleri verildi.



Şekil 5.4. ZnSe ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumları

300 nm ile 500 nm dalga boyları arasında tüm kalınlardaki geçirgenlik yüzdesinde ani bir artış gözlemlendi. Bu durum da iyi kalitede ince film üretimi yapıldığını göstermektedir.

Geçirgenlik spektrumunda gözlemlenen salınımlar büyütülen filmlerin homojenliğini gösteren girişim fenomeninden kaynaklanmaktadır [85]. Tüm numunelerin görünür bölgedeki geçirgenlikleri % 24 ile % 90 arasında değişiklik göstermektedir. Şekil 5.4'te görüldüğü gibi geçirgenlik, 500 nm dalgaboyunda film kalınlığından önemli ölçüde etkilenmiştir.



Şekil 5.5. ZnSe ince filmlerin Tauc eğrileri

İnce film kalınlığının optik enerji bant aralığına (E_g) olan etkisi optik geçirgenlik spektrumundan yararlanarak belirlendi. Optik soğurma katsayısı (α) Beer-Lambert bağıntısı kullanılarak hesaplanabilir [86].

$$\alpha = \frac{1}{t} \ln \frac{1}{T} \quad (5.1)$$

T, optik geçirgenliği, t ise film kalınlığını ifade eder. Yüksek soğurma bölgesinde enerji bant aralığı (E_g) Tauc modeli kullanılarak hesaplandı [87].

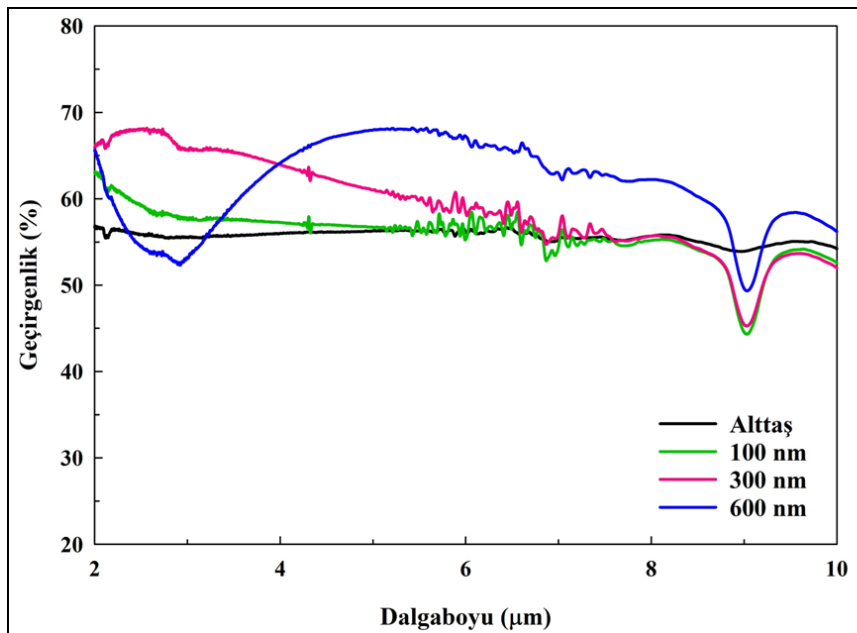
$$(\alpha h\nu) = K(h\nu - E_g)^n \quad (5.2)$$

Bu denklemde, $h\nu$, fotonun enerjisi, E_g , enerji bant aralığı, K sabit ve n ise elektronun değerlik ve iletim bandı arasındaki geçişine bağlı olan bir sayıdır [34]. Enerji bant aralığı, Şekil 5.5'te verildiği gibi, foton enerjisine ($h\nu$) karşı $(\alpha h\nu)^2$ grafiği çizildiğinde yatay eksen

kesen düz çizgiden bulunur. Bu grafikler, ZnSe ince film kalınlığı 100 nm'den 600 nm'ye arttıkça enerji bant aralığının da 2,54 eV'den 2,70 eV'ye arttığını göstermektedir. Hassanen ve arkadaşlarının da yapmış olduğu çalışmada ZnSe yapısının 224 nm'den 633 nm'ye artan film kalınlığı ile 2,69 eV'den 2,81 eV'ye artış gösteren optik enerji bant aralığına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir [34]. Film kalınlığı arttıkça, yığılmış elektron sayısı serbest elektron sayısından daha fazla olacağından iletim bandındanki elektronların sayısı değerlik bandından daha az olacaktır. İletim bandındaki elektronların az olması enerji bant aralığının genişlemesine neden olur [33].

FTIR Analizi

FTIR yarıiletken malzemelerde fonksiyonel grupları ve kimyasal bağları araştırmak için kullanılan önemli bir analitik yöntemdir. Farklı kalınlıklarda büyütülen ZnSe ince filmlerin kimyasal bağ yapısını incelemek için alınan FTIR ölçümleri 400 – 1300 cm^{-1} aralığında kaydedilerek Şekil 5.6'da gösterildi. 517 ve 610 cm^{-1} 'de gösterilen pikler Zn-Se titreşimlerine aittir [88]. 750 ve 889 cm^{-1} 'de bulunan tepe noktaları C-H bağına karşılık gelirken 1520, 1563 ve 1725 cm^{-1} 'deki pikler numunenin açık atmosfere maruz kalmasından kaynaklanan O-H karakteristik titreşimlerine atfedilmiştir [89,90]. 600 nm kalınlığa sahip olan ince film (3 – 5 μm) dalgaboyu aralığında yaklaşık %70 civarında geçirgenliğe sahiptir.



Şekil 5.6. ZnSe ince filmlerin FTIR spektrumları

5.1.4. Elektriksel karakterizasyon

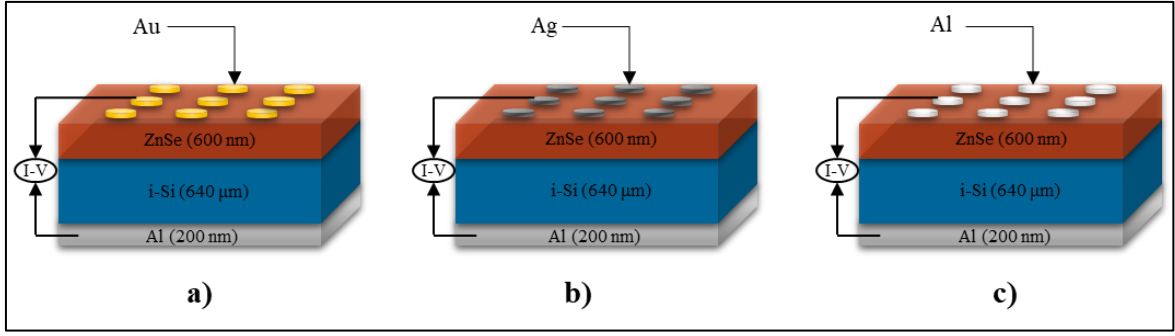
Schottky Diyot Fabrikasyonu

Üç farklı kalınlıkta büyütülen ZnSe ince filmlerin yapısal ve optik karakterizasyonları kapsamlı bir şekilde değerlendirildi. Yapılan karakterizasyonlar sonucunda, yüksek kristal kalitesine ve yüksek enerji bant aralıklı, 600 nm kalınlığına sahip ince film üzerine üretilen metal kontaklar ile Schottky diyot fabrikasyon çalışmaları yapıldı. 600 nm kalınlığındaki ZnSe ince filmin optoelektronik uygulamalarda kullanımına yönelik Schottky diyot performansını da incelemek amacıyla film üzerine Au , Ag ve Al olmak üzere üç farklı metal kontak alınarak Schottky diyot üretimi gerçekleştirildi.

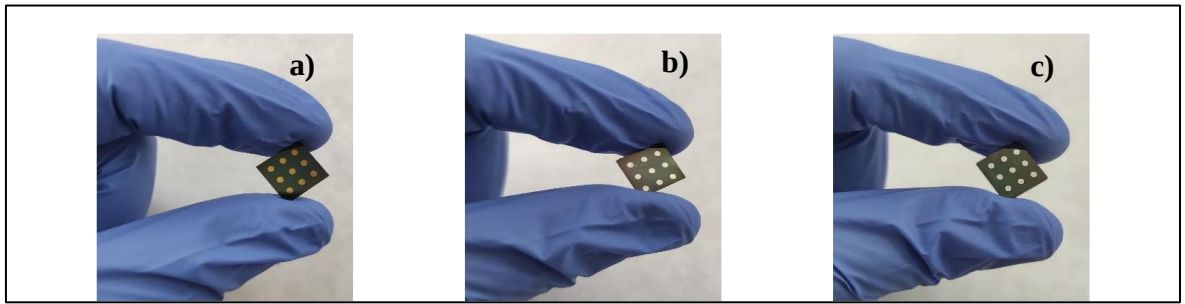
Çizelge 5.3. Kontak kaplama parametreleri

<i>Parametre</i>	<i>Au</i>	<i>Ag</i>	<i>Al</i>
P _{base} (Torr)	2 x 10 ⁻⁶	2 x 10 ⁻⁶	3 x 10 ⁻⁶
P _{kaplama} (Torr)	8 x 10 ⁻⁶	1 x 10 ⁻⁵	1 x 10 ⁻⁵
Alttaş Dönme Hızı (rpm)	5	5	5
Alttaş Sıcaklığı (°C)	Oda sıcaklığı	Oda sıcaklığı	Oda sıcaklığı
Kaplama Gücü (W)	280W	250W	230W
Kalınlık (nm)	200	200	200

Si alttaş üzerine büyütülen 600 nm kalınlıktaki ZnSe ince film 3 eşit (1x1 cm) parçaya bölündü. Diyotların fabrikasyon sürecinde kullanılan parametreler Çizelge 5.3'te verildi. ZnSe ince filmlerin arka yüzeyleri uygun maske yardımıyla beraber evaporasyon sistemine yüklenerek yaklaşık 200 nm kalınlığında Al katmanı, 3 x 10⁻⁶ Torr basınç ve oda sıcaklığında, % 99,999 saflıktaki Al metalinin biriktirilmesiyle oluşturuldu. Daha sonra RTA sistemi yardımıyla , 300°C'de 1 dakika tavlama yapılarak filmlerin arka yüzeyinde omik kontak oluşturuldu. Ön yüzeylerine, 9 adet 2 mm çapa sahip gölge maskesi yardımıyla, oda sıcaklığında, 3 x 10⁻⁶ Torr basınçta yaklaşık 200 nm kalınlıkta, sırasıyla yüksek saflıktaki Au, Ag ve Al (%99,999) metalleriyle Schottky kontaklar yapıldı. Elde edilen kontakların şematik diyagramları Şekil 5.7'de gösterilirken, kontakların görüntüleri de Resim 5.2'de verildi.



Şekil 5.7. a) Au, b) Ag ve c) Al Schottky kontak yapılarının şematik gösterimi

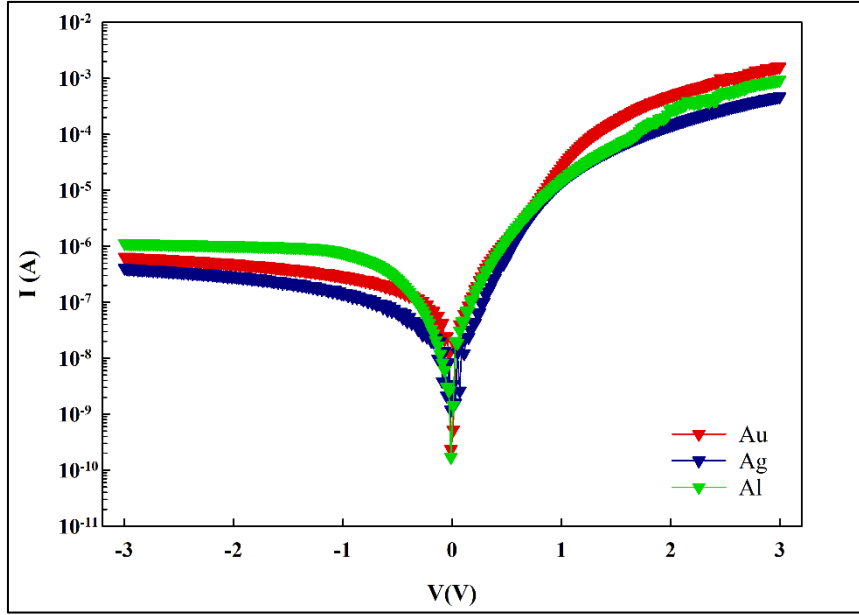


Resim 5.2. Üretilen a) Au, b) Ag ve c) Al kontakların fotoğrafları

I-V Analizi

ZnSe yarıiletkeni ile metal kontak arasındaki Schottky davranışına bağlı sınır etkisini analiz etmek ve büyütülen ZnSe ince filmle geliştirilebilecek cihazlar için I-V karakteristiği detaylı bir şekilde incelendi. Bu çalışmada 600 nm kalınlığa sahip üç adet (1 x 1 cm) ZnSe ince filmin üzerine oluşturulan Au / ZnSe / i-Si, Ag / ZnSe / i-Si ve Al / ZnSe / i-Si MS yapılı Schottky diyotları için I-V ölçümleri yapıldı. İdealite faktörü (η), bariyer yüksekliği (Φ_{b0}) ve seri direnç (R_s) gibi elektriksel parametreleri belirlemek için, üretilen Schottky diyotların I-V ölçümleri karanlıkta ve oda sıcaklığında gerçekleştirildi.

Schottky diyotun temel elektriksel parametreleri termoiyonik emisyon teorisi, Cheung ve Norde fonksiyonu olmak üzere üç farklı metot kullanılarak hesaplandı. Bu yöntemlerin tercih edilmesinin sebebi, güvenilir ve geçerli sonuçlar elde etmek ve bunların birbiriyle kıyaslanabilir olmasıdır. Hesaplanan parametreler, modelin doğası ve uygulanan voltaj aralığı gibi nedenlerle yöntemden yönteme farklılık gösterebilir. Şekil 5.8’de üç farklı metal kontakın I-V grafikleri gösterilmektedir. Bu grafikler incelendiğinde üretilen diyotların doğrultucu (Schottky) karakterde bir diyot olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 5.8. Schottky diyotların I-V grafikleri

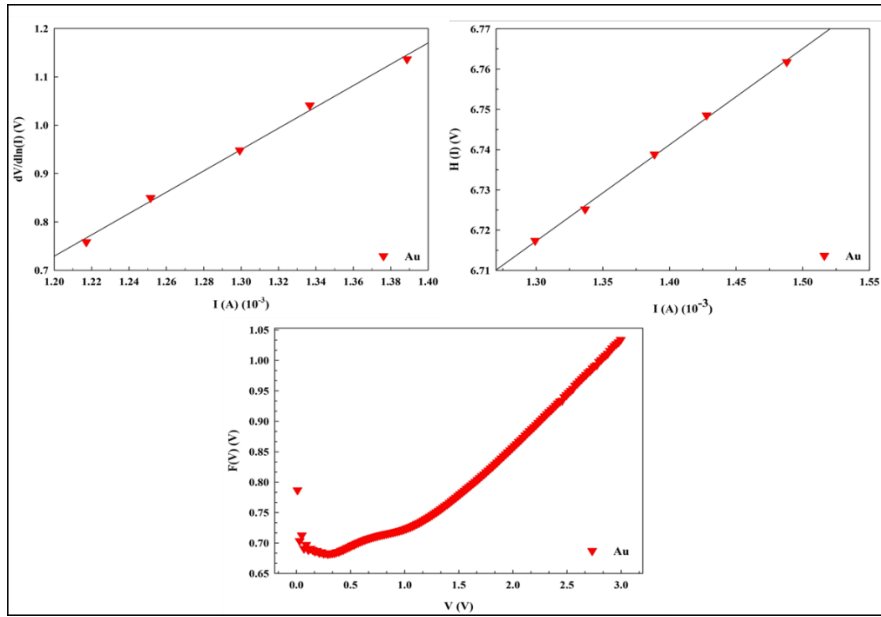
Üç farklı metod yardımıyla hesaplanan farklı metal kontakların elektriksel parametrelerinin (η , Φ_{b0} , R_s) karşılaştırılması Çizelge 5.4'te verildi.

Çizelge 5.4. Üç farklı metal kontak için Termoyonik Emisyon, Cheung ve Norde metotlarıyla elde edilen η , Φ_{b0} ve R_s değerlerinin karşılaştırılması

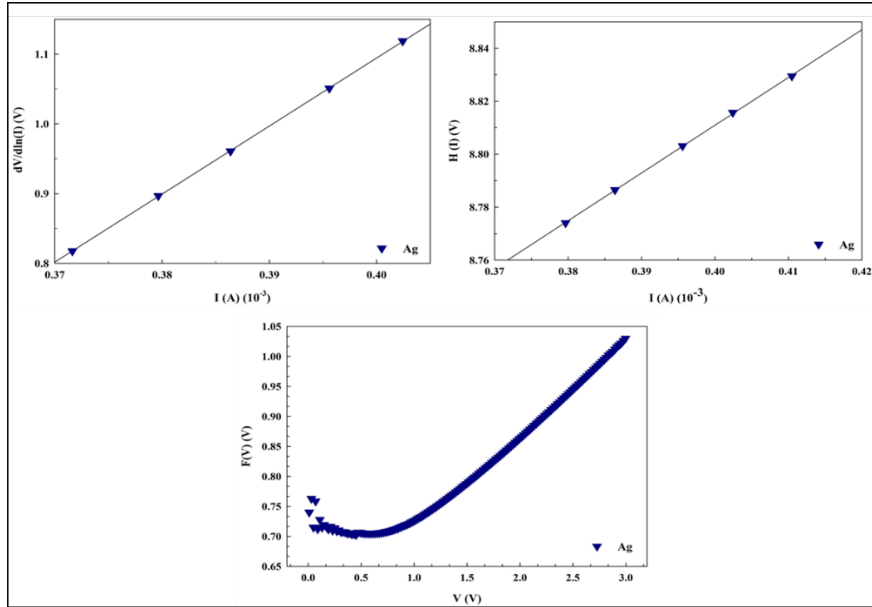
Parametreler	Metot	Au kontak	Ag kontak	Al kontak
η	lnI-V	3,81	4,10	4,68
	dV/dln(I)	7,67	11,24	11,76
$\Phi_{b0}(\text{eV})$	lnI-V	0,755	0,779	0,747
	H(I)	0,835	0,719	0,662
	F(V)	0,718	0,766	0,725
$R_s(\Omega)$	lnI-V	1867	6346	3190
	dV/dln(I)	1865	9763	4878
	H(I)	239	1803	967
	F(V)	7294	5349	3742

Seri direnç, SBD'un elektriksel parametreleri arasında önemli bir yere sahiptir. Seri direnç, seri dirençlerin ve cihazdaki akım yönündeki direncin toplamına eşittir. R_s değeri ikinci Cheung fonksiyonu olan Eş.2.18 ile hesaplanır.

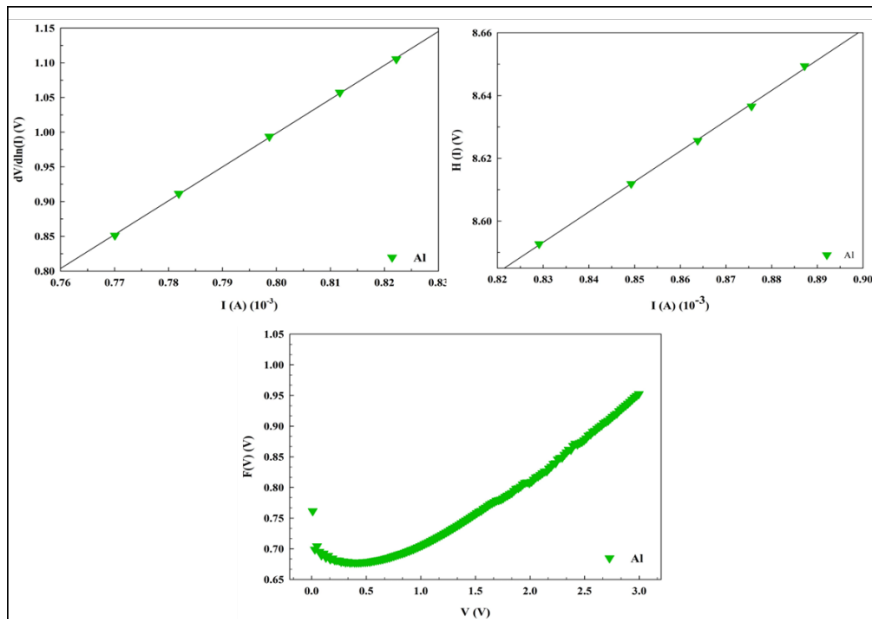
Diyotların idealite faktörlerinin $\eta > 1$ olması, yarıiletken ile metal arasında bir arayüz tabakasının oluştuğunu gösterir. Bu katman fabrikasyon süreci sırasında veya omik kontak oluşumundaki tavlama sırasında oluşmuş olabilir. Çizelge 5.4'te verilen iki metotla hesaplanan η değerleri birbirinden oldukça farklıdır. Bu farklılık, ara yüzeyin özelliklerine (dielektrik, kalınlık gibi), kullanılan metoda ve engelin homojen olmamasına bağlanmaktadır [91]. Termoiyonik emisyon, Cheung ve Norde metoduyla hesaplanan seri direnç ve engel yüksekliği değerleri de birbirinden farklıdır. Bunun nedeni de kullanılan metotların farklı voltaj bölgelerine karşılık gelmesidir. Termoiyonik emisyon doğru beslemedeki I-V eğrisinin doğrusal kısmını, Cheung fonksiyonu I-V eğrisinin kıvrılmaya başladığı noktadaki doğrusal olmayan kısmı ve Norde fonksiyonu I-V eğrisinin tamamındaki verileri kullanmaktadır. Bu nedenle de Norde fonksiyonu yardımıyla elde edilen seri direnç değerleri Cheung fonksiyonundan hesaplanan değerlere nazaran daha büyüktür. [92]. Çakıcı ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmada Au/ZnSe/p-Si/Al yapıli kontağın idealite faktörü 3 bulunurken, bariyer yüksekliği de 0,84 eV olarak hesaplanmıştır [93]. Bu sonuçların bizim çalışmamızla uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 5.9. Au kontak için $F(V)$ - V , $dV/d\ln(I)$ - I ve $H(I)$ - I grafikleri



Şekil 5.10. Ag kontak için $F(V) - V$, $dV/d\ln(I) - I$ ve $H(I) - I$ grafikleri



Şekil 5.11. Al kontak için $F(V) - V$, $dV/d\ln(I) - I$ ve $H(I) - I$ grafikleri

Schottky bariyer diyotları için çizilen, $dV/d\ln(I) - I$ grafiğinin y – eksenini kesen noktası idealite faktörünü verirken grafiğin eğimi, seri direnci vermektedir. $H(I) - I$ grafiğinde ise yine grafiğin eğimi seri direnci verirken, y – eksenini kestiği nokta bariyer yüksekliğini vermektedir. Her iki grafikten elde edilen seri direnç değerlerinde, Au / ZnSe / i-Si diyot en düşük değere sahiptir. [53].

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, II-VI grubundan olan ZnSe ince filminin fiziksel karakteristikleri belirlenerek Schottky diyot fabrikasyonu ile optoelektronik cihazlarda kullanılabilirliğinin incelenmesi hedeflendi. İnce filmler RF magnetron püskürtme yöntemiyle, film kalınlığının fiziksel karakterizasyona olan etkisini inceleyebilmek için 100 nm, 300 nm ve 600 nm olmak üzere üç farklı kalınlıkta büyütüldü. Filmler yapısal, morfolojik ve optik olarak karakterize edildi. Yapılan karakterizasyonlar sonucunda, yüksek kristal kalitesine, düzgün morfolojiye sahip ve yüksek enerji bant aralıklı 600 nm kalınlığa sahip olan ince film üzerine üretilen farklı metal kontaklar ile Schottky diyot fabrikasyon çalışmaları yapıldı.

İnce filmlerin büyütülmesinde düşük sıcaklık, düşük maliyet, düşük kirlilik seviyesi ve kaplamada hassas kontrol imkanı gibi avantajlarından dolayı püskürtme sistemi tercih edildi. Film kalınlığı için gerekli optimizasyonlar yapılarak üç farklı kalınlıkta ZnSe ince filmler üretildi.

Yapılan yapısal analiz sonuçları, üretilen filmlerin başarılı bir şekilde büyütüldüğünü gösterdi. XRD eğrileri incelendiğinde, ZnSe ince filmlerin (111) yöneliminde, kübik kristal yapısında büyütüldüğü belirlendi ve film kalınlığı arttıkça pik şiddetinin de arttığı gözlemlendi. XRD verilerinden, tanecik boyutu, örgü sabiti ve gerilme değerleri hesaplandı. Film kalınlığının artmasıyla beraber tanecik boyutunun 11,14 nm'den 34,63 nm'ye arttığı görüldürken, gerilim değerinin azaldığı belirlendi. Bu veriler de, film kalınlığı artışının kristaliteyi artırdığını destekler niteliktedir. XPS ölçümleri de ZnSe filminin başarılı bir şekilde büyütüldüğünü gösterdi. Yüzey morfolojisi ölçümlerinde de film kalınlığı arttıkça tanecik boyutunun da 16 nm'den 45 nm'ye arttığı gözlemlendi. Ayrıca AFM görüntüleri, kalınlık artışıyla filmde daha homojen bir yüzeye sahip olunduğunun kanıtı niteliğindedir.

Optik geçirgenlik ölçüm sonuçlarıyla elde edilen Tauc eğrileriyle, ZnSe ince filmlerin enerji bant aralıkları hesaplandı. Film kalınlığının artmasıyla, enerji bant aralığı da 2,54 eV'den 2,70 eV arttığı belirlendi. FTIR ölçüm sonuçlarından, 600 nm kalınlığa sahip olan ince filmin (3 – 5 μ m) dalgaboyu aralığında yaklaşık % 70 üzerinde geçirgenliğe sahip olduğunu gözlemlendi.

Yapılan karakterizasyonlar sonucunda, Schottky diyot fabrikasyonu yüksek kristal kalitesine, düzgün morfolojiye sahip ve yüksek enerji bant aralıklı, 600 nm kalınlıklı ZnSe ince film üzerine gerçekleştirildi. Schottky diyot uygulamasında farklı metal kontakların elektriksel parametreler üzerine olan etkisini araştırmak için ZnSe ince film üzerine Au, Ag ve Al metal kontaklar üretildi. Öncelikle ZnSe ince filmlerin arka yüzeylerine alt kontak olarak, evaporasyon sisteminde 3×10^{-6} Torr basınç altında ve yaklaşık 200 nm kalınlıkta Al katmanı oluşturuldu. Arka kontak RTA sisteminde 300°C 'de 1 dakika tavlansak omik hale getirildi. Daha sonra Au, Ag ve Al üst kontakları oluşturuldu. Bu kontaklar yine evaporasyon sisteminde 3×10^{-6} Torr basınç altında, 9 adet 2 mm çapa sahip dairelerden oluşan gölge maskesi yardımıyla, yaklaşık 200 nm kalınlığa sahip olarak oluşturuldu.

Üretilen yapıların (Au/ZnSe/i-Si, Ag/ZnSe/i-Si, Al/ZnSe/i-Si) optoelektronik uygulamalarda kullanımına yönelik Schottky diyot performanslarını incelemek amacıyla I-V ölçümleri yapıldı. Ölçüm sonuçları, üretilen kontakların doğrultucu (Schottky) davranış sergilediğini gösterdi. Bu ölçümlerin analizinde bir sonraki hedef olarak belirlenen, elektriksel parametrelerin belirlenmesinde, Termionik Emisyon Teorisi, Cheung ve Norde olmak üzere üç farklı metot kullanılarak, elde edilen sonuçlar karşılaştırıldı. Kullanılan metotların yardımıyla idealite faktörü, bariyer yüksekliği ve seri direnç gibi önemli elektriksel parametreler hesaplandı.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında farklı kalınlıklarda ZnSe yapısının ince film olarak biriktirilmesi ve yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel karakterizasyonlarının yapılması amaçlanmıştır. Yapılan bu karakterizasyonlar sonucunda ZnSe ince filmin optoelektronik uygulamalar için uygun bir malzeme olduğu belirlenmiştir. Bu tez çalışması, uygun film kalınlığı ve metal kontak seçimiyle ince film teknolojisine dayalı optoelektronik cihazların geliştirilmesinde ülkemize önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Piprek, J. (2005). *Optoelectronic Devices: Advanced Simulation and Analysis*. New York: Springer Science Business Media, 293-311.
2. Rahman, M. M. (2018). *Synthesis and characterization of zinc selenide thin film semiconductor by thermal evaporation technique*. Master's Thesis, Dhaka University, Gazipur.
3. Kumar, T. R., & Vedamalai, M. (2018). Morphological and photoluminescence properties of ZnSe: Ce thin film deposition by chemical bath deposition. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 119(12), 6877-6886.
4. Jain, R. K., Kaur, J., Khanna, A., & Chawla, A. K. (2019). Tailoring the structural, electrical, optical and wettability properties of ZnSe films by oblique angle thermal evaporation. *Materials Research Express*, 6(11), 116451.
5. Komissarova, T. A., Lebedev, M. V., Sorokin, S. V., Klimko, G. V., Sedova, I. V., Gronin, S. V., Komissarov, K. A., Calvet, W., Drozdov, M. N., & Ivanov, S. V. (2017). Electronic, structural and chemical properties of GaAs/ZnSe heterovalent interfaces as dependent on MBE growth conditions and ex situ annealing. *Semiconductor Science and Technology*, 32(4), 045012.
6. Hunt, A. W., Orme, C., Williams, D. R. M., Orr, B. G., & Sander, L. M. (1994). *Instabilities in MBE growth*. *EPL (Europhysics Letters)*, 27(8), 611.
7. Hao, H., Yao, X., & Wang, M. (2007). Preparation and optical characteristics of ZnSe nanocrystals doped glass by sol-gel in situ crystallization method. *Optical Materials*, 29(5), 573-577.
8. Dhanasekaran, V., Mahalingam, T., Rhee, J.-K., & Chu, J. P. (2013). Structural and optical properties of electrosynthesized ZnSe Thin films. *Optik*, 124(3), 255-260.
9. Yudar, H. H., Pat, S., Korkmaz, Ş., Özen, S., & Şenay, V. (2017). Zn/ZnSe thin films deposition by RF magnetron sputtering. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(3), 2833-2837.
10. Isshiki, M., & Wang, J. (2017). Wide-bandgap II-VI semiconductors: growth and properties. *Springer handbook of electronic and photonic materials*, 325-342.
11. Korkmaz, S. (2005). *Characterization Of Cds Thin Films And Schottky Barrier Diodes*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
12. Milnes, A. G., Feucht, D.L. (1982). *Heterojunctions and metal-semiconductor junctions*, Pittsburg: Academic Press, 156-192.
13. Fu, Y.-sheng, Li, J., & Li, J. (2019). Metal/semiconductor nanocomposites for photocatalysis: Fundamentals, structures, applications and properties. *Nanomaterials*, 9(3), 359.
14. Jang, M. (2016). Scalability of schottky barrier metal-oxide-semiconductor transistors. *Nano Convergence*, 3(1), 1-7.

15. Zhang, J., Qin, Z., Zeng, D., & Xie, C. (2017). Metal-oxide-semiconductor based gas sensors: screening, preparation, and integration. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 19(9), 6313–6329.
16. Seol, J.-H., & Hahm, S.-H. (2019). Selective ohmic contact formation on Schottky type algaln/GaN UV sensors using local breakdown. *IEEE Sensors Journal*, 19(8), 2946–2949.
17. Dastgeer, G., Khan, M. F., Cha, J., Afzal, A. M., Min, K. H., Ko, B. M., Liu, H., Hong, S., & Eom, J. (2019). Black phosphorus-igzo van der waals diode with low-resistivity metal contacts. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(11), 10959–10966.
18. Saha, B., Sarkar, K., Bera, A., Deb, K., & Thapa, R. (2017). Schottky diode behaviour with excellent photoresponse in NiO/FTO heterostructure. *Applied Surface Science*, 418, 328–334.
19. Yokoyama, M., Chen, N. T., & Ueng, H. Y. (2000). Growth and characterization of ZnSe on si by atomic layer epitaxy. *Journal of Crystal Growth*, 212(1-2), 97–102.
20. Venkatachalam, S., Mangalaraj, D., Narayandass, S. K., Velumani, S., Schabes-Retchkiman, P., & Ascencio, J. A. (2007). Structural studies on vacuum evaporated ZnSe/p-Si Schottky diodes. *Materials Chemistry and Physics*, 103(2-3), 305–311.
21. Coskun, E., Gullu, H. H., Colakoglu, T., Emir, C., Bozdogan, E., & Parlak, M. (2019). Effects of SI nanowire on the device properties of N-ZnSe/p-si heterostructure. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(5), 4760–4765.
22. Zhang, X., Wu, D., & Geng, H. (2017). Heterojunctions based on II-VI compound semiconductor one-dimensional nanostructures and their optoelectronic applications. *Crystals*, 7(10), 307.
23. Sato, K., Seki, Y., Matsuda, Y., & Oda, O. (1999). Recent developments in II–VI substrates. *Journal of Crystal Growth*, 197(3), 413–422.
24. Asahi, T., Oda, O., Taniguchi, Y., & Koyama, A. (1996). Growth and characterization of 100 mm diameter CdZnTe single crystals by the vertical gradient freezing method. *Journal of Crystal Growth*, 161(1-4), 20–27.
25. Green, M. A. (2006). *Third generation photovoltaics advanced solar energy conversion*. Sidney: Springer Natures, 71–72.
26. Krishnan, B., Shaji, S., Acosta-Enríquez, M. C., Acosta-Enríquez, E. B., Castillo-Ortega, R., Zayas, M. A. E., Castillo, S. J., Palamà, I. E., D’Amone, E., Pech-Canul, M. I., D’Amone, S., & Cortese, B. (2019). Group II–VI semiconductors. *Semiconductors*, 397–464.
27. Lee, S. H., Jung, C., Jun, Y., & Kim, S.-W. (2015). Synthesis of colloidal inas/ZnSe quantum dots and their quantum dot sensitized solar cell (QDSSC) application. *Optical Materials*, 49, 230–234.

28. Peng, Z., Liu, Y., Zhao, Y., Chen, K., Cheng, Y., Kovalev, V., & Chen, W. (2014). ZnSe passivation layer for the efficiency enhancement of CuInS₂ quantum dots sensitized solar cells. *Journal of Alloys and Compounds*, 587, 613–617.
29. Kondrotas, R., Colina, M., Guc, M., Neuschitzer, M., Giraldo, S., Alcobé, X., Oliva, F., Sánchez, Y., Pistor, P., Izquierdo-Roca, V., Pérez-Rodríguez, A., & Saucedo, E. (2017). Towards in-reduced photovoltaic absorbers: Evaluation of zinc-blende CuInSe₂-ZnSe solid solution. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 160, 26–33.
30. Zhu, J., Koltypin, Y., & Gedanken, A. (1999). General Sonochemical method for the preparation of Nanophasic selenides: synthesis of ZnSe nanoparticles. *Chemistry of Materials*, 12(1), 73–78.
31. Haberern, K. W., Baude, P. F., Flamholtz, S. J., Buijs, M., Horikx, J. J., Law, K. K., Haase, M. A., Miller, T. J., & Haugen, G. M. (1997). II-VI index-guided lasers for optical recording. *In-Plane Semiconductor Lasers: from Ultraviolet to Midinfrared*. 101-105.
32. Chu, T. L., Chu, S. S., Chen, G., Britt, J., Ferekides, C., Wu, C. Q. (1992). Zinc selenide films and heterojunctions. *Journal of Applied Physics*, 71(8), 3865–3869.
33. Sayeed, M. A., Rouf, H. K., & Hussain, K. M. A. (2020). Effect of thickness on characteristics of ZnSe thin film synthesized by vacuum thermal evaporation. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 14, 251-259.
34. Hasaneen, M. F., Alrowaili, Z. A., & Mohamed, W. S. (2020). Structure and optical properties of polycrystalline ZnSe thin films: Validity of SWANEPOL's approach for calculating the optical parameters. *Materials Research Express*, 7(1), 016422.
35. Grundmann, M. (2006). *The physics of semiconductors an introduction including devices and nanophysics*. Berlin: Springer, 1-9.
36. Pech-Canul, M. I., & Ravindra, N. M. (2019). *Semiconductors: Synthesis, properties and applications*. Springer International Publishing, 1-36.
37. Kitovski, V. B. (1998). Electronic Devices and circuit theory, 6th edition, R. Boylestad and L. Nashelsky, Prentice Hall International Inc., *Microelectronics Journal*, 29(8), 574.
38. Neamen, D. A. (2008). *An introduction to semiconductor devices*. (3. Baskı). New Mexico: McGraw-Hill Higher Education, 1-60.
39. Terna, A. D., Elemike, E. E., Mbonu, J. I., Osafire, O. E., & Ezeani, R. O. (2021). The future of semiconductors nanoparticles: Synthesis, properties, and applications. *Materials Science and Engineering: B*, 272, 115363.
40. Colinge, J.-P., & Colinge, C. A. (2005). *Physics of semiconductor devices*. San Jose: Springer, 29-31.
41. Sharon, M. (2016). *An introduction to the physics and electrochemistry of semiconductors: fundamentals and applications*. Tokyo: Scrivener Publishing, 32-36.

42. Badsha, M. A., Kabir, M. H., & Rashid, M. A. (2020). Coherent perfect absorption in unpatterned thin films of intrinsic semiconductor. *Journal of Optics*, 49(3), 342–350.
43. Erol, A., & Balkan, N. (2015). *Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamaları*. (2. Baskı). İstanbul: Seçkin Yayıncılık, 5-92.
44. Shackelford, J. F. (2005). *Introduction to materials science for engineers*. London: Pearson Prentice Hall., 460-482.
45. Seeger, K. (2004). *Semiconductor physics: An introduction*. Berlin: Springer, 1-45.
46. Rhoderick, E. H. (1982). Metal-semiconductor contacts. *IEE Proceedings I Solid State and Electron Devices*, 129(1), 10–84.
47. Sze, S. N. (1981). *Physics of semiconductor devices*. (2. Baskı). New York: John Wiley, 249-402.
48. Sharma, B. L. (1984). Fabrication and characterization of metal-semiconductor Schottky barrier junctions. *Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications*, 113–159.
49. Rhoderick, R. H., Williams, E.H. (1988). *Metal-Semiconductor Contacts*. London: Oxford University Press, 257–267.
50. Alialy, S., Altındal, Ş., Tanrikulu, E. E. and Yıldız, D. E. (2014). Analysis of temperature dependent current-conduction mechanisms in Au/TiO₂/n-4H-SiC (metal/insulator/semiconductor) type Schottky barrier diodes. *Journal of Applied Physics*, 116, 083709-9.
51. Cheung, S. K., & Cheung, N. W. (1986). Extraction of schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49(2), 85–87.
52. Mönch Winfried. (1995). *Semiconductor surfaces and interfaces* (Second Edition). Berlin: Springer, 72-79.
53. Güllü, Ö., Biber, M., Van Meirhaeghe, R. L., & Türot, A. (2008). Effects of the barrier metal thickness and hydrogen pre-annealing on the characteristic parameters of Au/n-GaAs metal–semiconductor Schottky contacts. *Thin Solid Films*, 516(21), 7851–7856.
54. Norde, H. (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50(7), 5052–5053.
55. Azizian-Kalandaragh, Y., Farazin, J., Altındal, Ş., Shahedi Asl, M., Pirgholi-Givi, G., Delbari, S. A., & Sabahi Namini, A. (2020). Electrical and dielectric properties of Al/(PVP: Zn-TeO₂)/p-si heterojunction structures using current–voltage (I–V) and impedance-frequency (Z–F) measurements. *Applied Physics A*, 126(8), 635.
56. Sayeed, M. A., & Rouf, H. K. (2018). *Fabrication and characterization of zinc selenide (ZnSe) thin film in Solar Cell Applications*. 2018 International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISSET), Bangladesh, 247-250.

57. Liu, W., Gu, D., & Li, X. (2019). Ultrasensitive NO₂ detection utilizing mesoporous ZnSe/ZnO heterojunction-based chemiresistive-type sensors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(32), 29029–29040.
58. Feng, G., Yang, C., & Zhou, S. (2012). Nanocrystalline Cr²⁺-doped ZnSe nanowires laser. *Nano Letters*, 13(1), 272–275.
59. Yacobi, B. G. (2003). *Semiconductor materials an introduction to basic principles*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 144-148.
60. Zharikov, I. A., Rud', V. Y., Rud', Y. V., Davydov, V. V., & Terukov, E. I. (2019). Polarization sensitivity of ZnSe single crystals based structures. *Journal of Physics: Conference Series*, 1410, 012088.
61. İnternet: Zinc selenide (ZnSe). (2012). Crystran Web: <https://www.crystran.co.uk/optical-materials/zinc-selenide-ZnSe> Erişim Tarihi: 04.05.2022
62. Wyckoff, R. W. G. (1963). *Crystal Structures*. Interscience Publishers, 110-145.
63. Merz, J. L., Kukimoto, H., Nassau, K., & Shiever, J. W. (1972). Optical properties of substitutional donors in ZnSe. *Physical Review B*, 6(2), 545–556.
64. Cormier, P.-A., Thomann, A.-L., Dolique, V., Balhamri, A., Dussart, R., Semmar, N., Lecas, T., Brault, P., Snyders, R., & Konstantinidis, S. (2013). IR emission from the target during plasma magnetron sputter deposition. *Thin Solid Films*, 545, 44–49.
65. Wasa, K., Kitabatake, M., & Adachi, H. (2004). *Thin Film Materials Technology: Sputtering of control compound materials*. Heidelberg: Wiliam Andrew, 135-151.
66. Depla, D., Mahieu, S., & Greene, J. E. (2010). Sputter deposition processes. *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings*, 253–296.
67. Greenberg, J. (2018). *X-ray diffraction imaging: Technology and applications*. CRC Press, 141-165.
68. Suryanarayana, C., & Norton, M. G. (1998). *X-ray diffraction: a practical approach*. Springer Science & Business Media, 43-52.
69. Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2015). *Elements of X-ray diffraction*. Pearson India Education Services, 42-50.
70. Wagner, J.-M., & Bechstedt, F. (2002). Properties of strained wurtzite GaN and AlN: Ab initio studies. *Physical Review B*, 66(11), 115202.
71. Öztürk, M. K., Altuntaş, H., Çörekçi, S., Hongbo, Y., Özçelik, S., & Özbay, E. (2011). Strain–stress analysis of AlGaIn/GaN heterostructures with and without an AlN buffer and interlayer. *Strain*, 47, 19-27.
72. Stevie, F. A., & Donley, C. L. (2020). Introduction to X-ray photoelectron spectroscopy. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 38(6), 063204.

73. Watts, J. F., & Wolstenholme, J. (2020). *An introduction to surface analysis by Xps and Aes*. John Wiley & Sons, 1-17.
74. Gavara, N. (2016). A beginner's Guide to Atomic Force Microscopy probing for Cell Mechanics. *Microscopy Research and Technique*, 80(1), 75–84.
75. Hassanien, A. S., Aly, K. A., & Akl, A. A. (2016). Study of optical properties of thermally evaporated ZnSe thin films annealed at different pulsed Laser Powers. *Journal of Alloys and Compounds*, 685, 733–742.
76. Makuła, P., Pacia, M., & Macyk, W. (2018). How to correctly determine the band gap energy of modified semiconductor photocatalysts based on UV–vis spectra. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 9(23), 6814–6817.
77. Borah, D. J., Mostako, A. T. T., Saikia, P. K., & Dutta, P. (2019). Effect of thickness and post deposition annealing temperature on the structural and optical properties of thermally evaporated molybdenum oxide films. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 93, 111–122.
78. Kubacka, D., Eggeler, Y. M., Volz, N., Neumeier, S., & Spiecker, E. (2020). Using rapid thermal annealing for studying early stages of high-temperature oxidation of superalloys. *Superalloys*, 763–770.
79. Elsaedy, H. I., Hassan, A. A., Yakout, H. A., & Qasem, A. (2021). The significant role of ZnSe layer thickness in optimizing the performance of ZnSe/CdTe solar cell for optoelectronic applications. *Optics & Laser Technology*, 141, 107139.
80. Prasada Rao, T., & Santhoshkumar, M. C. (2009). Effect of thickness on structural, optical and electrical properties of nanostructured zno thin films by spray pyrolysis. *Applied Surface Science*, 255(8), 4579–4584.
81. Moulder, J. F., Stickle, W. F., Sobol, P. E., & Bomben, K. D. (1992). Handbook of X-ray photoelectron spectroscopy; Chastain, J. *Perkin-Elmer Corp., Eden Prairie*, 16-29.
82. Güder, F., Danhof, J., Hartel, A., Schwarz, U. T., & Zacharias, M. (2011). Improved optical properties of zno thin films by concurrently introduced interfacial voids during thermal annealing. *Applied Physics Letters*, 99(2), 023105.
83. Shallenberger, J. R., & Hellgren, N. (2020). Zinc selenide analyzed by XPS. *Surface Science Spectra*, 27(1), 014020.
84. Rusu, G. I., Diciu, M., Pîrghie, C., & Popa, E. M. (2007). Structural characterization and optical properties of ZnSe Thin Films. *Applied Surface Science*, 253(24), 9500–9505.
85. Khalfi, R., Talantikite-Touati, D., Tounsi, A., & Merzouk, H. (2020). Effect of deposition time on structural and optical properties of ZnSe thin films grown by CBD method. *Optical Materials*, 106, 109989.
86. Gümüş, C., Ozkendir, O., Kavak, H., Ufuktepe, Y. (2006) Structural and optical properties of zinc oxide thin films prepared by spray pyrolysis method. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 8(1), 299–303.

87. Tauc, J., Grigorovici, R., & Vancu, A. (1966). Optical properties and electronic structure of amorphous germanium. *Physica Status Solidi (b)*, 15(2), 627–637.
88. Ahamed, A. J., Ramar, K., & Kumar, P. V. (2016). Synthesis and characterization of ZnSe nanoparticles by Co-precipitation method. *Journal of nanoscience and technology*, 2(3) 148-150.
89. Nesheva, D., Šćepanović, M. J., Aškrabić, S., Levi, Z., Bineva, I., & Popović, Z. V. (2009). Raman scattering from ZnSe nanolayers. *Acta Physica Polonica A*, 116(1), 75 – 77.
90. Khan, T. M., Mehmood, M. F., Mahmood, A., Shah, A., Raza, Q., Iqbal, A., & Aziz, U. (2011). Synthesis of thermally evaporated ZnSe thin film at room temperature. *Thin Solid Films*, 519(18), 5971–5977.
91. Taşçıoğlu, İ., Altındal, Ş., Polat, İ., & Bacaksız, E. (2013). The effect of metal work function on the barrier height of metal/CdS/SnO₂/In–Ga structures. *Current Applied Physics*, 13(7), 1306–1310.
92. Yilmaz, M., Kocyigit, A., Cirak, B. B., Kacus, H., Incekara, U., & Aydogan, S. (2020). The comparison of Co/hematoxylin/n-Si and Co/hematoxylin/p-Si devices as rectifier for a wide range temperature. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 113, 105039.
93. Çakıcı, T., Özdal, M., Kundakcı, M., & Kayalı, R. (2019). ZnSe and CuSe NP's by microbial green synthesis method and comparison of IV characteristics of Au/ZnSe/p-Si/Al and Au/CuSe/p-Si/Al structures. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 103, 104610.



GAZİ GELECEKTİR...