

**ZnSe/CuS İNCE FİLM HETEROEKLEM YAPISININ
ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

Kürşat BOLAT



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ZnSe/CuS İNCE FİLM HETEROEKLEM YAPISININ ÜRETİLMESİ VE
KARAKTERİZASYONU**

Kürşat BOLAT
0000-0002-9542-4900

Prof. Dr. Sertan Kemal AKAY
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

BURSA – 2020
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Kürşat BOLAT tarafından hazırlanan “ZnSe/CuS İNCE FİLM HETEROEKLEM YAPISININ ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Sertan Kemal AKAY

Başkan : Prof Dr. Ahmet PEKSÖZ
0000-0001-5730-9541
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Fen Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Sertan Kemal AKAY
0000-0002-7597-1528
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Fen Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Emrah SARICA
0000-0002-9339-5114
Bursa Teknik Üniversitesi,
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

.././.....

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

30/12/2020


Kürşat BOLAT

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ZnSe/CuS İNCE FİLM HETEROEKLEM YAPISININ ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Kürşat BOLAT

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sertan Kemal AKAY

ZnSe/CuS heteroeklem yapı, indiyum kalay oksit (ITO) kaplı alttaş üzerine çinko selenit (ZnSe) ve bakır sülfid (CuS) ince filmlerin Termal buharlaşma tekniği kullanılarak üretilmesiyle elde edildi. Üretilen yapının, yüzey morfolojisi ve kristal yapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve x-ışınları kırınımı (XRD) ile incelendi. XRD sonuçları üretilen yapının her iki fazı kapsadığını göstermektedir. SEM görüntülerinde kristallerin homojen dağılımı gözlenmiştir. Hall Etkisi ölçümü ile ZnSe ve CuS ince filmlerin elektriksel iletkenliği, taşıyıcı yük yoğunluğu, iletkenlik türü belirlendi. Üretilen yapının, oda sıcaklığı ve karanlık ortamda gerçekleştirilen akım-voltaj ölçümleri ile idealite faktörü 1,60, bariyer yüksekliği 0,61 eV ve ters doyma akımı $1,40 \times 10^{-6}$ A olarak hesaplanarak elektriksel parametreleri elde edildi. UV-VIS spektrofotometresi kullanılarak ZnSe ve CuS ince filmlerin optik geçirgenlik ve soğurma spektrumları ölçüldü.

Anahtar Kelimeler: ZnSe/CuS heteroeklem, Termal buharlaştırma, İnce film,

2020, x + 49 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF ZnSe/CuS THIN FILM HETEROJUNCTION STRUCTURE

Kürşat BOLAT

Bursa Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physic

Supervisor: Prof. Dr. Sertan Kemal AKAY

The ZnSe/CuS heterojunction structure was obtained by producing zinc selenide (ZnSe) and copper sulfide (CuS) thin films on the indium tin oxide (ITO) coated glass substrate by using thermal evaporation technique. Surface morphology and crystal structure of the produced structure examined by scanning electron microscope (SEM) and x-ray diffraction (XRD). XRD results show that the produced structure includes both phases. Homogeneous distribution of morphology was observed in SEM images. Electrical conductivity, carrier density and conductivity type of ZnSe and CuS thin films were determined by Hall Effect measurements. The dark current-voltage measurements were obtained to determine electrical parameters of the structure. It was found that the ideality factor, barrier height and reverse saturation current calculated as 1,60, 0,61 eV and $1,40 \times 10^{-6}$ A, respectively. The optical transmittance and absorption spectra of the ZnSe and CuS thin films were measured with a UV-VIS spectrophotometer.

Key words: ZnSe/CuS heterojunctions, Thermal evaporation, Thin film,

2020, x + 49 pages.

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarımı yönlendiren ve her aşamasında bilgi, tavsiye ve yardımlarını esirgemeyen gerek akademik ortam gerekse beőerî iliőkilerde engin fikirleriyle geliőmeme katkıda bulunan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Sertan Kemal AKAY'a (Uludağ Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı) en derin saygılarım ve sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Bilgi birikiminin yanı sıra malzeme desteklerini de esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Ahmet PEKSÖZ'e (Uludağ Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı) teőekkürlerimi sunarım.

Elektronik Mühendisliği Öğretim Üyesi Doç. Dr. Umut AYDEMİR'e sunduğu laboratuvar imkanlarından dolayı teőekkürleri sunarım.

Tez çalıőmam süresince laboratuvar çalışmalarında yanımda yol arkadaőı olan değerli arkadaőlarım baőta Hüseyin Kaan KAPLAN'a, Ali OLKUN ve Serhat SARSICI'ya teőekkürlerimi sunarım.

Yanımda hep desteğini hissettiğim arkadaőım Neslihan AKGÜN'e teőekkürlerimi sunarım.

Eğitim öğretim hayatımın her safhasında yanımda bulunan amcam Abdurrahman BOLAT'a teőekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, her zaman yanımda bulunan, babam Nusrat BOLAT ve annem Hafize BOLAT'a teőekkürlerimi sunarım.

Kürşat BOLAT

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	4
2.1. Yarıiletkenler.....	4
2.1.1. Katkılı Yarıiletkenler.....	10
2.1.2. PN Eklemler.....	15
2.1.3. Homoeklemler ve Heteroeklemler.....	19
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	23
3.1. Materyal.....	23
3.1.1. Çinko Selenit (ZnSe).....	23
3.1.2. Bakır Sülfür (CuS).....	23
3.1.3. Gümüş (Ag).....	24
3.2. Termal buharlaştırma yöntemi.....	24
3.3. Deneysel Çalışmalar.....	26
3.3.1. Cam/ITO/CuS/ZnSe/Ag Heteroeklem Yapısının Üretimi.....	28
3.3.2. Ölçüm ve Analizler.....	29
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	31
4.1. Yapısal ve Morfolojik Özellikler.....	31
4.2. Optik Özellikler.....	36
4.3. Elektriksel Özellikler.....	39
5. SONUÇ.....	45
KAYNAKLAR.....	46
ÖZGEÇMİŞ.....	49

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A	Akım
Al	Alüminyum
Å	Angström
Sb	Antimon
As	Arsenik
Cu	Bakır
Φ	Bariyer Yüksekliği
k	Boltzmann Sabiti
B	Bor
p_0	Boşluk Yoğunluğu
Zn	Çinko
λ	Dalga Boyu
δ	Dislokasyon Yoğunluğu
V_d	Diyot Yapı Potansiyeli
I_0	Doyma Akımı
n_0	Elektron Yoğunluğu
q	Elektron Yüğü
eV	Elektronvolt
E	Enerji
A	Etkin Diyet Alanı
A^*	Etkin Richardson Sabiti
E_f	Fermi Enerjisi
Pb	Fosfor
Ga	Galyum
Ge	Germanyum
Ag	Gümüş
In	İndiyum
n	İdealite Faktörü
E_c	İletim Bandı
σ	İletkenlik
C	Karbon
θ	Kırınım Açısı
D	Kristal Tane Boyutu
S	Kükürt
β	Maksimum Yarısı Tam Genişlik
Mo	Molibden
K	Mutlak Sıcaklık
nm	Nanometre
Ω	Ohm
O	Oksijen
ϵ	Örgü Gerilmesi
Se	Selenyum
R_s	Seri Direnç

Si	Silisyum
α	Soğurma Katsayısı
Ta	Talyum
n_i	Taşıyıcıların Yoğunluğu
Te	Tellür
W	Tungsten
E_v	Valans Bandı
W	Watt
E_g	Yasak Enerji Bant Aralığı
V_b	Yapı Potansiyeli

Kısaltmalar	Açıklama
I-V	Akım-Voltaj
SILAR	Ardışık İyonik Tabaka Adsorpsiyon ve Reaksiyonu
APCVD	Atmosfer Basınçlı Kimyasal Buhar Biriktirme
ALD	Atomik Katman Kaplama
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
CuS	Bakır Sülfür
ZnO	Çinko Oksit
ZnS	Çinko Sülfid
ZnTe	Çinko Tellürit
ZnSe	Çinko Selenit
DC	Doğru Akım
LPCVD	Düşük Basınçlı Kimyasal Buhar Biriktirme
ENIAC	Elektronik Sayısal Entegreli Hesaplayıcı
GaAs	Galyum Arsenik
GaP	Galyum Fosfor
LED	Işık Yayan Diyot
InSb	İndiyum Antimonit
InAs	İndiyum Arsenit
ITO	İndiyum Kalay Oksit
CdO	Kadmiyum Oksit
CdS	Kadmiyum Sülfid
CdSe	Kadmiyum Selenit
CdTe	Kadmiyum Tellürit
FWHM	Maksimum Yükseklikteki Bant Genişliği
MOCVD	Metal Organik Buhar Fazı Epitaksisi
MBE	Molekül Demeti Epitaksisi
PECVD	Plazma ile Güçlendirilmiş Kimyasal Buhar Biriktirme
RF	Radyo Frekansı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
UV-VIS	Ultraviyole Görünür Spektroskopisi
ICDD	Uluslararası Kırınım Verileri Merkezi
XRD	X Işınları Kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Yarıiletkenlerin enerji bantları.....	5
Şekil 2.2.	Jenerasyon ve rekombinasyon oluşumu	6
Şekil 2.3.	Bant geçişleri E-k grafiği a) dolaylı – b) doğrudan geçişler.....	6
Şekil 2.4.	Elektriksel özelliklerine göre sınıflandırılan malzemelerin enerji bant diyagramları a) iletken b) yarıiletken c) yalıtkan.....	7
Şekil 2.5.	Saf Silisyum kristalinin temsili kovalent bağ gösterimi	8
Şekil 2.6.	Katkısız yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi gösterimi	9
Şekil 2.7.	n – tipi ve p – tipi yarıiletken kristalleri.....	11
Şekil 2.8.	Si kristaline antimon katkılanması ve temsili kovalent bağ gösterimi	12
Şekil 2.9.	Enerji bant diyagramında donör atomlarının enerji seviyesi gösterimi.....	12
Şekil 2.10	Si kristaline bor katkılanması ve temsili kovalent bağ gösterimi.	13
Şekil 2.11.	Enerji bant diyagramında akseptör atomlarının enerji seviyesi gösterimi.....	14
Şekil 2.12.	Basit bir pn yapısının gösterimi	16
Şekil 2.13.	PN eklemde elektrik alan oluşumu ve gösterimi	16
Şekil 2.14.	a) Termal denge durumunda b) ileri yönde polarlama c) ters polarlamanın şematik gösterimi	18
Şekil 2.15.	a) Eklem oluşturulmadan önce n – tipi ve p – tipi yarıiletkenlerin enerji bant yapısı b) pn eklemi oluşturulduktan sonra enerji bant yapısı ve fakirleşmiş bölge.....	20
Şekil 2.16.	a) Eklem oluşturulmadan önce n – tipi Si ve p – tipi Ge yarı iletkenlerin enerji bant yapısı b) pn heteroeklemi oluşturulduktan sonra enerji bant yapısı.....	22
Şekil 3.1.	Termal buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi.....	24
Şekil 3.2.	Termal buharlaştırma sistemi	25
Şekil 3.3.	İnce film kaplama hazırlık aşamaları.....	27
Şekil 3.4.	Tavlama fırını ve argon tüpü	28
Şekil 3.5.	Üretilen heteroeklem yapının şematik gösterimi	28
Şekil 3.6.	Cam ve ITO üzerine biriktirilen ince filmler	29
Şekil 3.7.	CuS/ZnSe heteroeklemin I–V ölçümü yapılan sistemin genel görüntüsü...30	
Şekil 4.1.	Cam üzerine biriktirilmiş CuS/ZnSe ince filmin x-ışınımı kırınımı spektrumu.....	31
Şekil 4.2.	CuS ince filmin 10.00 KX görüntü büyütmesi	33
Şekil 4.3.	CuS ince filmin 20.00 KX görüntü büyütmesi	34
Şekil 4.4.	ZnSe ince filmin 20.00 KX görüntü büyütmesi.....	34
Şekil 4.5.	ZnSe ince filmin 40.00 KX görüntü büyütmesi.....	35
Şekil 4.6.	CuS/ZnSe ince filmin kesitinden alınan SEM görüntüsü.....	35
Şekil 4.7.	Cam/CuS/ZnSe ince filmin 3 boyutlu AFM görüntüsü	36
Şekil 4.8.	CuS için optik soğurma ve geçirgenlik – dalga boyu spektrumları	37
Şekil 4.9.	CuS için $(\alpha hv)^2 - hv$ grafiği	38
Şekil 4.10.	ZnSe için optik soğurma ve geçirgenlik – dalga boyu spektrumları	38
Şekil 4.11.	ZnSe için $(\alpha hv)^2 - hv$ grafiği	39
Şekil 4.12.	ITO/CuS/ZnSe/Ag heteroeklemin karanlıkta yarı logaritmik I-V grafiği ...40	

Şekil 4.13. ITO/CuS/ZnSe/Ag heteroeklemin I – V verilerinden elde edilmiş F(V;V)-V eğrisi.....43

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Silisyum ve Germanyum yarıiletkenlerinin bazı özellikleri	7
Çizelge 2.2. II - VI yarıiletken bileşikleri ve özellikleri	15
Çizelge 3.1. ZnSe - CuS Yarıiletkenlerinin bazı özellikleri.....	23
Çizelge 3.2. Termal buharlaştırma sistemi, heteroeklem üretim parametreleri	27
Çizelge 4.1. XRD analizi sonucu belirlenen parametreler	31
Çizelge 4.2. EDS analizi sonucu belirlenen elemental yüzdeler.....	32
Çizelge 4.3. CuS ve ZnSe ince filmler için Hall etkisi ölçüm sonuçları.....	40
Çizelge 4.4. ITO/CuS/ZnSe/Ag heteroeklemin I-V incelemesi.....	42

1. GİRİŞ

III. Sanayi devrimi ile başlayıp günümüze kadar önemi günbegün artan yarıiletken ve yarıiletken bileşikler elektronik teknolojisinin gelişiminde etkin bir rol oynamıştır. Bu süreçte milat olarak yarıiletken transistörün yapımı kabul edilebilir. Günümüzde çok büyük boyutlara sahip devre elemanları yerine çok çok küçük bir alana komple devre veya sistem sığdırılmaktadır. İlk bilgisayar olarak bilinen ENIAC, II. Dünya Savaşı sırasında Amerikalı bilim insanları tarafından icat edilmiştir. ENIAC, 167 m² bir alan kaplamakta aynı zamanda 30 ton ağırlığındaydı. Devre elemanlarının ENIAC örneğine bakarak, zaman içerisinde boyut olarak ne kadar küçüldükleri görülebilmektedir.

Günümüzde insanlar, hayatın her alanında (cep telefonu, bilgisayar, güneş pilleri, radar, uydu ve elektrikli ev aletleri vb.) yarıiletken malzemelerin bulunduğu ve temelini oluşturduğu teknoloji ile sürekli temas halindedir. İnsan hayatının vazgeçilmez haline gelen bu elektronik cihazların gelişimini yarıiletken teknolojisi oluşturmakta ve her geçen gün gelişmektedir.

Yarıiletken teknolojisi içerisinde yer alan ince filmler önemli bir yere sahiptirler. Yarıiletken ince filmler gerek bilimsel araştırmalarda gerekse günümüz teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. İnce filmler, birçok biriktirme tekniği kullanılarak oluşturulabilir. Genel olarak, kaplanmak istenen malzemenin atom veya moleküllerinin bir alt taş üzerine dizilmesiyle elde edilirler. Kalınlıkları birkaç Å ile birkaç µm arasında değişiklik gösterebilir. Birçok biriktirme tekniği ile elde edilen ince filmler, optiksel ve elektriksel özellikleri sebebiyle güneş pilleri, LED'ler, medikal, askeri, uzay ve havacılık gibi alanlarda kendine yer edinmişlerdir.

İnce film biriktirme teknikleri, fiziksel ve kimyasal biriktirme teknikleri olarak kategorize edilebilir. Kimyasal Buhar Biriktirme; Atmosferik Basınçta Kimyasal Buhar Biriktirme (APCVD), Düşük Basınçta Kimyasal Buhar Biriktirme (LPCVD), Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme (PECVD), Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) ve Atomik Katman Kaplamadan (ALD) oluşmaktadır.

Fiziksel Buhar Biriktirme teknikleri ise, Rezistans ile Buharlaştırma, Elektron Demeti ile Buharlaştırma, Lazer Demeti ile Buharlaştırma, Ark Demeti ile Buharlaştırma, Manyetik Alanda Sıçratma, RF (Radyo Frekans) Sıçratma, DC (Doğru Akım) Diyot Sıçratma ve Moleküler Demet Epitaksi (MBE) olarak verilebilir.

Periyodik cetvelin IV. grup elementlerinden silisyum (Si) ve germanyum (Ge) diğer gruptaki element veya yarıiletken bileşiklere göre araştırmalara daha fazla konu olmuş malzemelerdir. II. ve VI. grup elementlerinden oluşan II-VI bileşikleri ise Si ve Ge göre daha yeni yarıiletken malzemelerdir. II-VI grubu bileşiklerinin yasak enerji aralıkları geniştir. Bu yüzden bileşikler iyi bir lüminesans özellik göstermektedir. Ayrıca diyot, lazer ve güneş pili yapımında kullanılmaktadır (Erel 1996).

Çinko Selenit bileşiği (ZnSe) periyodik cetvelin II. grubunda yer alan çinko (Zn) elementi ve VI. grubunda yer alan selenyum (Se) elementinin birleşimidir. ZnSe ile ilgili çalışmaların önemi artarak hala devam etmektedir. ZnSe, tercih sebeplerinin başında geniş optik bant aralığına sahip olması gelmektedir. Bu geniş bant aralığı yarıiletken bileşiğe geniş kullanım alanı sağlamaktadır. Örneğin, optik, mavi – yeşil diyot lazer, güneş enerjisi, sensör uygulamaları vb. verilebilir. Turuncu renge sahip bu bileşik toz veya parçacık halde bulunabilir. ZnSe n – tipi bir yarıletkendir (Jiang ve ark. 2006).

Çinko Selenit, üzerine günümüze kadar birçok çalışmalar yapılmıştır. Dhanasekaran ve ark. (2013) kimyasal biriktirme tekniklerinden elektrokimyasal yöntem ile ZnSe ince film elde etmişler ve bu ince filmi x-ışını kırınımı (XRD) kullanarak yapısal özelliklerini incelemişlerdir. Yüzey merkezli kübik yapıya sahip olduğunu görmüşlerdir. Yıldırım (2013) kimyasal buharlaştırma tekniği ile ZnSe ince filmleri üretmiştir. Hava ortamı ve farklı sıcaklıklarda tavlamanın üretilen filmin özelliklerine (elektriksel, optik ve yapısal) etkilerini incelemiştir. Selek (2015) RF tekniği ile ZnSe ince film üretmiştir. Üretim süresi sabit tutulurken güç değiştirilmiş (50W ve 100W) ve bu güç değişimin üretilen ince film üzerindeki etkilerini incelemiştir.

Bakır Sülfid bir metal bileşigi kalkojenidir. Son zamanlarda fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı geniş çapta incelenmeye başlanmıştır. Önemli bir p – tipi yarıiletken olan bu bileşik güneş pilleri, elektro iletken kaplamalar, lityum iyon piller vb. gibi birçok yapıda yer almaktadır (Sahoo ve ark. 2015).

Bakır sülfid de birçok çalışmaya konu olmuştur. Habiboğlu ve Gümüş (2018) kimyasal depolama yöntemi kullanarak CuS ince filmleri cam alt tabanlar üzerine büyütülmüştür. Cam alt tabanların sıcaklıklarını değiştirerek elde edilen ince filmlerin karakterizasyonu yapılmıştır. Taşdemirci (2019) cam alt taşlara SILAR yöntemi kullanarak oda sıcaklığında CuS ince filmler elde etmiş molarite ve kalınlık özelliklerini araştırmış ve molarite ve film kalınlığını artırarak daha homojen ince filmler elde etmişlerdir.

Yukarıda yer alan çalışmalarda, ZnSe ve CuS ince filmleri farklı büyütme teknikleri kullanılarak üretilmiştir. Bu tez çalışmasında ise Termal Buharlaştırma Tekniği ile ZnSe/CuS heteroeklem yapı üretilmiştir. Üretilen yapının yapısal, elektriksel ve optiksel özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. Termal buharlaştırma yönteminin seçilme sebebi ise kaplama hızının yüksek ve üretim maliyetinin düşük olmasıdır.

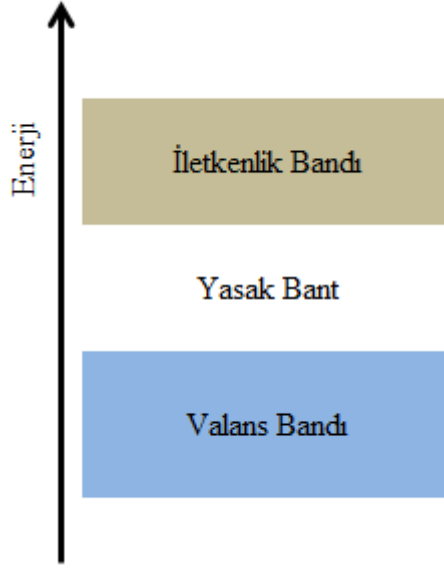
2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Yarı İletkenler

Malzemeleri sınıflandırırken birçok özellik dikkate alınabilir. Malzemenin elektrik ilgisi ve iletimi önemli özelliklerindedir. Elektriksel özelliklerine göre maddeler, üç başlık altında toplanabilirler. Bunlar iletkenler, yalıtkanlar ve yarıiletkenlerdir. Elektriksel özelliği ile ifade edilmek istenen maddenin sahip olduğu özdirenç değeridir. İletkenlerin özdirençleri çok düşüktür yalıtkanların ise tam tersi çok büyüktür. Yarıiletkenler ise özdirenç değerleri ile iletkenler ve yalıtkanlar arasında yer almaktadır.

Yarıiletkenleri, iletkenlerden ayıran farklardan birisi de sıcaklık ile olan ilgilidir. Sıcaklık artırıldığında yarıiletkenlerin de iletkenlikleri artmaktadır. Sıcaklığın yanı sıra ışık altında da yarıiletkenler iletken hale gelebilmektedir. Yarıiletkenlerin iletkenlik özelliği, yukarıdaki etkiler yardımıyla yeterli enerji valans elektronlarına verildiğinde serbest hale gelmesi ve iletkenlik bandına uyarılarak serbest elektron ve hol çiftleri oluşturmasından kaynaklanmaktadır.

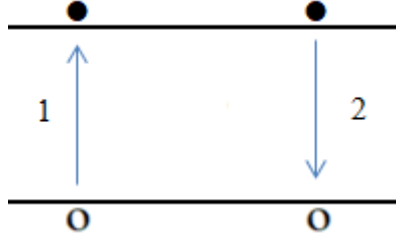
Yasak bant genişliği malzemenin elektriksel karakteristiğini belirlemektedir. Bant yapısı hakkında ayrıntılı bilgi vermek için valans (değerlik) ve iletkenlik bantlarından söz etmek gerekmektedir. Katılarda elektronlar en düşük enerji seviyesinden dolmaya başlar ve üst enerji seviyelerini doldurarak devam ederler. Fakat bazı enerji seviyeleri yasaklı olabilmektedir. İzinli enerji seviyeleri ise bir bant gibi davranabilirler. $T=0$ K'de tamamen doldurulmuş bu bant değerlik bandı, Şekil 2.1'de de görüldüğü üzere bu bandın üstündeki bant ise iletkenlik bandı olarak bilinir (Özkan 2010).



Şekil 2.1. Yarıiletkenlerin enerji bantları.

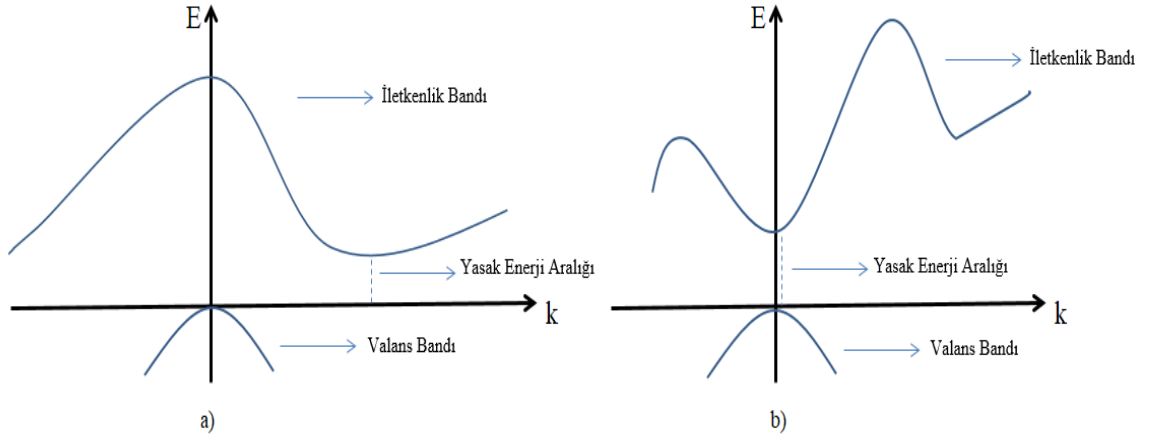
Şekil 2.1'e baktığımızda E_c iletkenlik bandının minimum seviyesinde yer alan elektronların, E_v ise valans bandının maksimum seviyesinde bulunan elektronların enerjisidir. E_g , yasak enerji bant genişliği olup, bu iki enerji bandı arasındaki farkı vermektedir ($E_g = E_c - E_v$). Yarıiletkenlerde elektronlar yasak bant içinde bulunamamaktadır.

Mutlak sıcaklıkta saf yarıiletkenlerde serbest elektronlar bulunmadığı için bütün elektronlar valans bandında yer alır. Mutlak sıcaklık derecesinin üstüne çıktığında elektronlar uyarılarak valans bandından yasak bandı aşarak iletkenlik bandına geçebilirler. Valans bandından ayrılıp iletkenlik bandına geçen elektronlar, eksikliklerinden dolayı arkalarında bir boşluk bırakırlar. Bu boşluklar pozitif bir yük gibi davranır ve hole, deşik veya boşluk olarak adlandırılırlar. Bu olay elektron – boşluk çiftlerinin oluşmasıdır ve jenerasyon olarak adlandırılmaktadır. Yarıiletkenlerde iletim iletkenlik bandındaki elektron ve valans bandındaki holler tarafından sağlanır. Aynı zamanda bu olayın tersini gözlemlemekte mümkündür. Elektron – boşluk çiftinin birleşmesi ise rekombinasyon olarak adlandırılır. Şekil 2.2'de jenerasyon ve rekombinasyon şematik olarak gösterilmektedir (Caferov 1998).



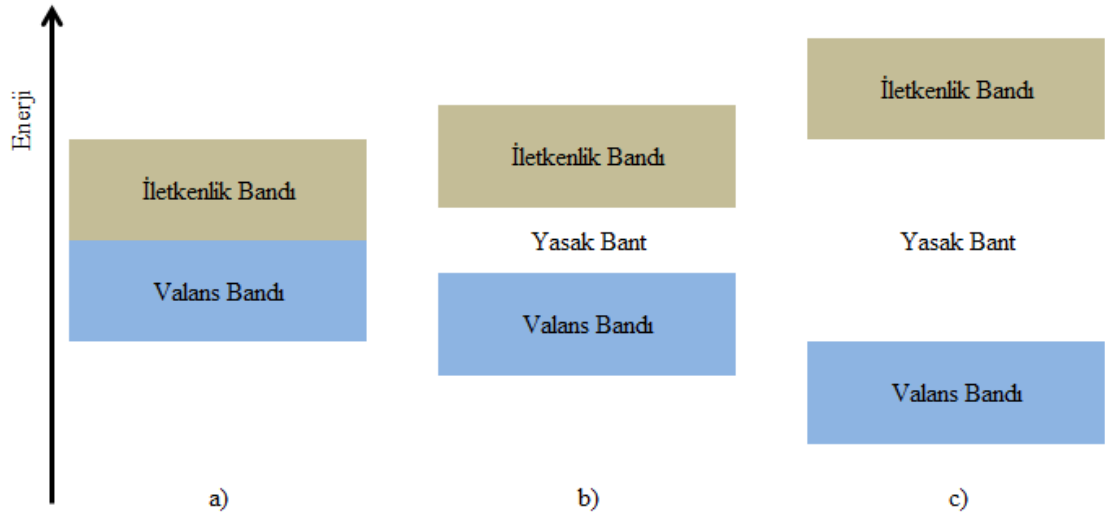
Şekil 2.2. Jenerasyon ve rekombinasyon oluşumu (Caferov 1998).

Yarıiletken malzemelerin bant yapıları doğrudan ve dolaylı bant olarak adlandırılmaktadır. Enerji – momentum uzayında doğrudan bant aralıklı yarıiletkenler; valans bandının maksimum noktası ile iletkenlik bandının minimum noktası aynı k değerinde, dolaylı bant aralıklı yarıiletkenler ise valans bandının maksimum noktası ile iletkenlik bandının minimum noktası farklı k değerinde olmaktadır. Şekil 2.3'te k değerleri gösterilmektedir. Yarıiletken malzemelerin doğrudan veya dolaylı bant yapısına sahip olması optik uygulamaları için oldukça önemlidir.



Şekil 2.3. Bant geçişleri E-k grafiği a) dolaylı - b) doğrudan geçişler

İletkenlerde valans ve iletkenlik bandı enerjisi hemen hemen aynı düzeydedir bu yüzden valans bandındaki elektronların küçük bir enerji ile serbest hale geçmesi çok kolaydır. Yarıiletkenlerde bant genişliği kadar enerji gerekmektedir, yalıtkanlarda ise yasak bant aralığı çok geniştir ve büyük bir enerji gerekmektedir. Şekil 2.4'te elektriksel özelliklerine göre sınıflandırılan malzemelerin enerji diyagramları gösterilmiştir.



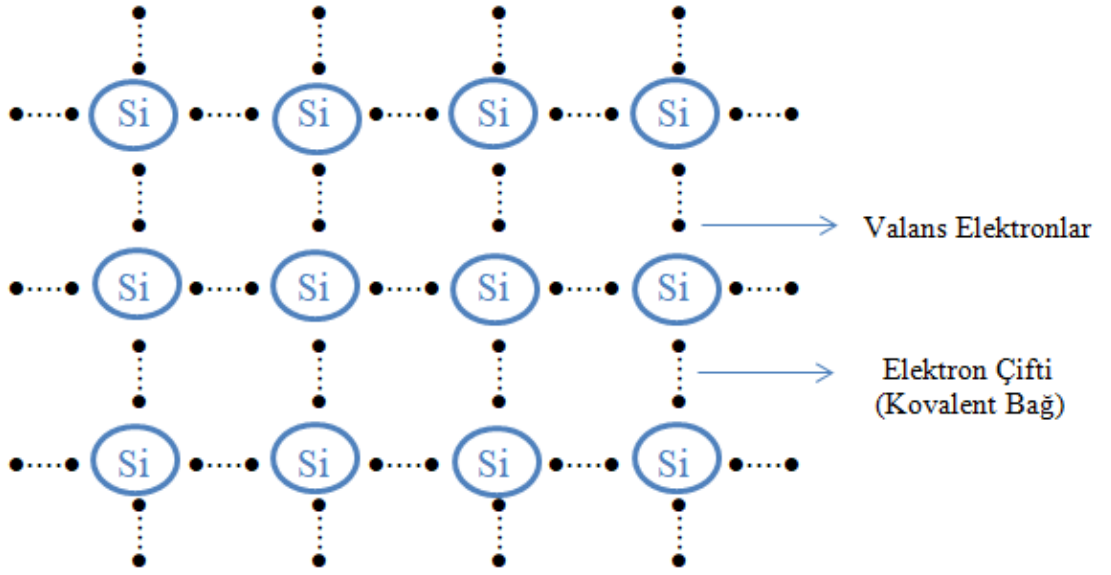
Şekil 2.4. Elektriksel özelliklerine göre sınıflandırılan malzemelerin enerji bant diyagramları a) iletken b) yarıiletken c) yalıtkan.

Yarıiletken malzemelerin bazıları element iken bazıları ise bileşiktir. Yarıiletken elementlerin en bariz örnekleri olarak periyodik cetvelin IV. grubunda bulunan Si ve Ge verilebilir. Bu elementlerin bant aralıkları saf haldeyken değişmez. Çizelge 2.1’de bu iki elementin bazı özellikleri listelenmiştir.

Çizelge 2.1. Germanyum ve Silisyum yarıiletkenlerinin bazı özellikleri (Caferov 1998).

Özellikler	Silisyum	Germanyum
Ergime Noktası (°C)	1420	936
Örgü Parametresi (nm)	0,534	0,565
Yoğunluk (g/cm ³)	2,33	5,33
Yasak Bant Aralığı (eV)	1,1	0,67
Elektronların Mobilitesi (cm ² /V.s)	1350	3800
Hollerin Mobilitesi (cm ² /V.s)	480	1800
Yük Taşıyıcılarının Konsantrasyonu 300K (cm ⁻³)	1,5×10 ¹⁰	2,4×10 ¹³
Dielektrik Katsayısı	12	16
Kırınım İndisi	3,9	4

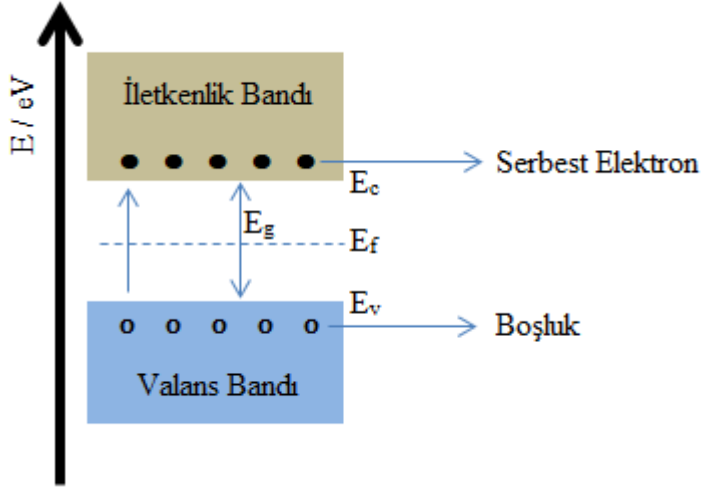
Si ve Ge yarıiletken elementlerinin atomları normal koşullarda son yörüngedeki elektronlarının ortaklaşa kullanımları ile kovalent bağ oluştururlar. Si'un her kovalent bağında iki elektron bulunmaktadır. Şekil 2.5'te son yörüngedeki elektronların bağ yaptığını ve boşta elektron olmadığı görülmektedir. Saf kristallere örnek olarak Si ve Ge verilebilir. Yarıiletken Si yapısı elmas (C) kristalin yapısına benzemektedir. Elektronik devrelerde sıklıkla kullanılan Si ve Ge saf olarak kullanılamaz. Bu yarıiletkenler ancak katkılama yapılarak kullanılabilirler.



Şekil 2.5. Saf Silisyum kristal yapının temsili kovalent bağ gösterimi.

Elemental haldeki yarıiletkenlerden sonra bileşik haldeki yarıiletkenlere örnek olarak III-V grubu bileşikleri; Galyum Arsenit (GaAs), İndiyum Altimonit (InSb), Galyum Fosfor (GaP), İndiyum Arsenit (InAs) ve son zamanlarda önemi artan II-VI grubu bileşikleri olarak ZnSe (Çinko Selenit), ZnS (Çinko Sülfür), ZnO (Çinko Oksit), ZnTe (Çinko Tellürit), CdO (Kadmiyum Oksit), CdS (Kadmiyum Sülfür), CdSe (Kadmiyum Selenit) ve CdTe (Kadmiyum Tellürit) verilebilir.

Yarıiletkenler iki sınıfta incelenmektedir. Bunlar, katkılı ve katkısız yarıiletkenlerdir. Katkısız yarıiletkenler içerisinde yabancı atom bulundurmeyen yarıiletkenlere denir. Katkısız yarıiletkenlerde her bir serbest elektrona karşılık bir boşluk vardır. Yani valans (değerlik) bandındaki boşluk yoğunluğu ile iletkenlik bandındaki elektron yoğunlukları birbirine eşittir. Şekil 2.6’da temsili olarak bu durum gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Katkısız yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi gösterimi.

Eğer yarıiletken tamamen saf ve kristal yapıda ise n_0 ve p_0 yoğunluklarının eşitliğinden söz edebiliriz. n_0 ve p_0 sırasıyla iletkenlik bandı elektronlarının yoğunluğu ve valans bandı boşluklarının yoğunluğunu ifade etmektedir. Elektron ve hole yoğunluğunu eşitse taşıyıcı yoğunluğunu, n_i ifadesi (denk 2.1) bağıntısı ile verilir (Sze 2002).

$$n_0 = p_0 = n_i \quad (2.1)$$

Katkısız yarıiletkenlerde serbest iletkenlik bandı elektronları ve serbest valans bandı boşluklarının yoğunluklarının eşit olması, Fermi seviyesini hemen hemen yasak enerji bandının tam ortasına (Şekil 2.6) getirir. Katkısız yarıiletkenler için elektronlar tarafından işgal edilebilecek olası enerji seviyeleri Fermi – Dirac Dağılım Fonksiyonu ile verilmektedir.

Fermi – Dirac Dağılım Fonksiyonu;

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_f)/kT}} \quad (2.2)$$

Burada E_F Fermi enerji seviyesi, k Boltzman sabiti ve T 'de mutlak sıcaklıktır. T sıcaklığında bulunan bir sistemde bir elektronun bir E enerji seviyesini işgal edebilme olasılığını vermektedir. Elektronların denge durumunda bulunabileceği en yüksek enerji seviyesi; Fermi enerji seviyesidir (Riveros ve ark, 2002).

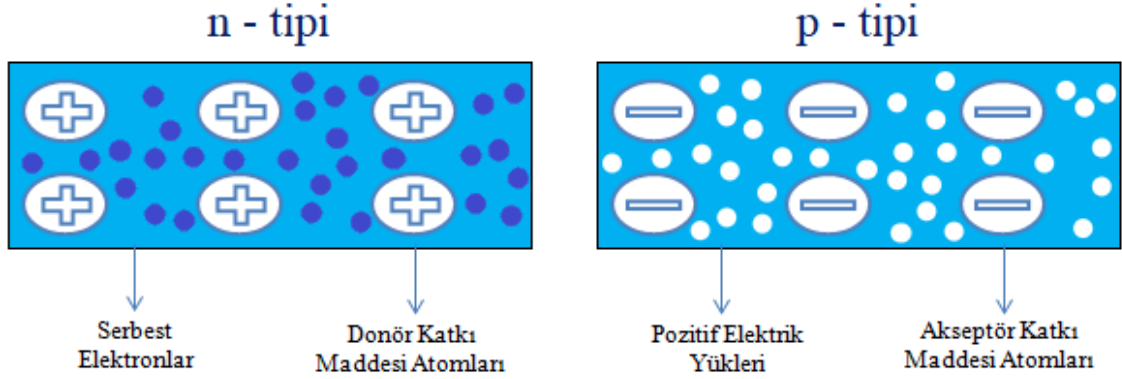
2.1.1. Katkılı Yarı İletkenler

Katkısız yarıiletkenlere katkı yapıldığında yani yabancı bir atom (safsızlık atomu) eklediğinde yarıiletkenin bazı özellikleri değişebilir. Safsızlık atomlarından sonra oda sıcaklığında elektriksel özellikleri önemli ölçüde etkilenir. Katkı yapılarak iletkenliği belirlenen yarıiletkenler katkı yarıiletkenler olarak ifade edilir.

Periyodik tabloya bakıldığında IVA grubu elementleri olan Si ve Ge dört valans elektronuna sahiptir. Şekil 2.5'de 2 boyutlu olarak gösterilen Si atomunun diğer Si atomlarıyla elektronlarını ortaklaşa kullanması sonucu kovalent bağ yaptığı görülmektedir. Si veya Ge atomuna IIIA grubu elementleri olan ve üç valans elektronuna sahip B, Al, In, Ga veya VA grubu elementleri olan ve beş valans elektronuna sahip P, As, Sb katkılanabilir. Bu katkılanma neticesinde safsızlık meydana gelir.

İstenilen elektriksel özellikler katkılanma oranı değiştirilerek elde edilebilir. Boşluk veya elektron sayılarının çoğaltılması malzemenin iletkenliğine pozitif etki yapmaktadır. Bunun tam tersi durumda yani boşluk veya elektron sayılarının azaltılması da dirence pozitif etki yapmaktadır. Yarıiletkene katkılanan atomlar elektron alıcı (akseptör) veya elektron verici (donör) olarak görev yaparlar. Bu katkılama işlemleri sonucu iki tür n – tipi ve p – tipi yarıiletken ortaya çıkar. Katkılanma işleminde p – tipi yarıiletkenler alıcı (akseptör) atomları ve n – tipi yarıiletkenler elektron verici (donör)

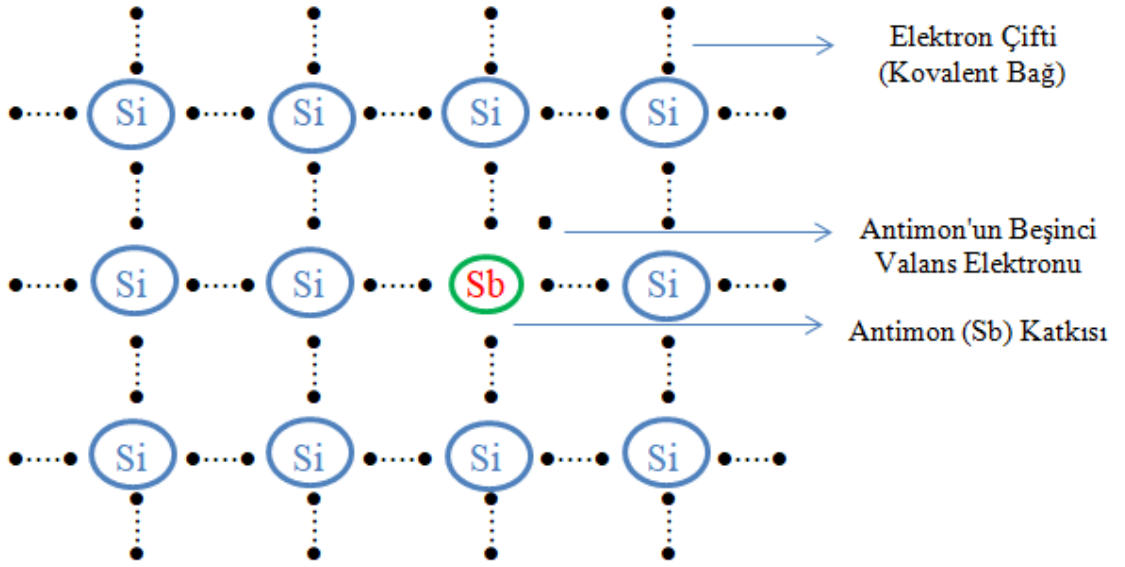
atomları ile yapılmaktadır. n – tipi ve p – tipi kristallere ait özellikler Şekil 2.7’de gösterilmiştir (Hu 2010).



Şekil 2.7. n ve p tipi yarıiletken kristalleri (Sarı 2009).

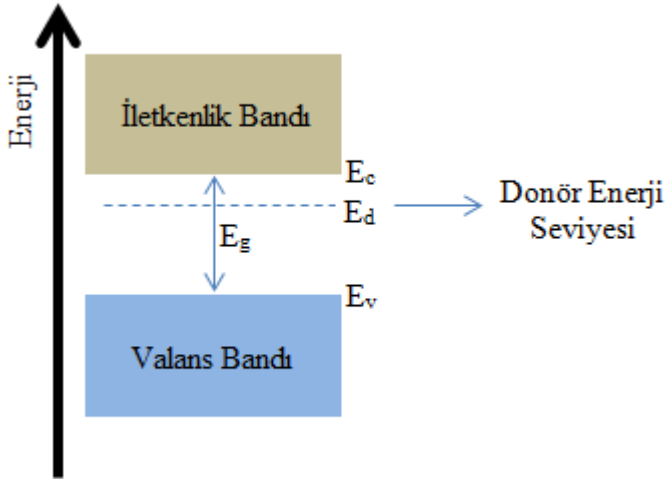
Periyodik cetvelin IVA grubunda yer alan Si’un dört valans elektronuna sahip olduğu önceki bölümde bahsedilmişti. Saf Si atomunda; her Si atomu kendisine komşu diğer atomların valans elektronlarını ortak kullanarak bir bağ oluşturur (Şekil 2.5). Her atom sekiz valans elektronunun oluşturduğu yapı sayesinde kimyasal kararlılığını sağlar.

Si kristaline Antimon (Sb) katkılıandığı varsayalım. Bu katkılama Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Si elementinin dört tane valans elektronu varken, Sb’in beş tane valans elektronu vardır. Kristalde Sb atomunun dört valans elektronunu Si atomunun elektronları ile kovalent bağ oluşturur. Sb’in beşinci valans elektronu ise kristal içerisinde düşük bir enerji ile serbest hale gelebilmekte ve iletkenliği artırmaktadır. Elektronun, serbest hareket edebilmesinin nedeni zayıf elektriksel kuvvetle Sb atomuna bağlı olmasıdır. Çok az bir enerji ile iyonlaşabilir. Burada Si kristalinde bir elektron fazlalığı olmuştur. Bu yüzden antimon atomuna verici diğer adıyla donör atom diyebiliriz.



Şekil 2.8. Silisyum kristaline Antimon katkılanması temsili kovalent bağ gösterimi.

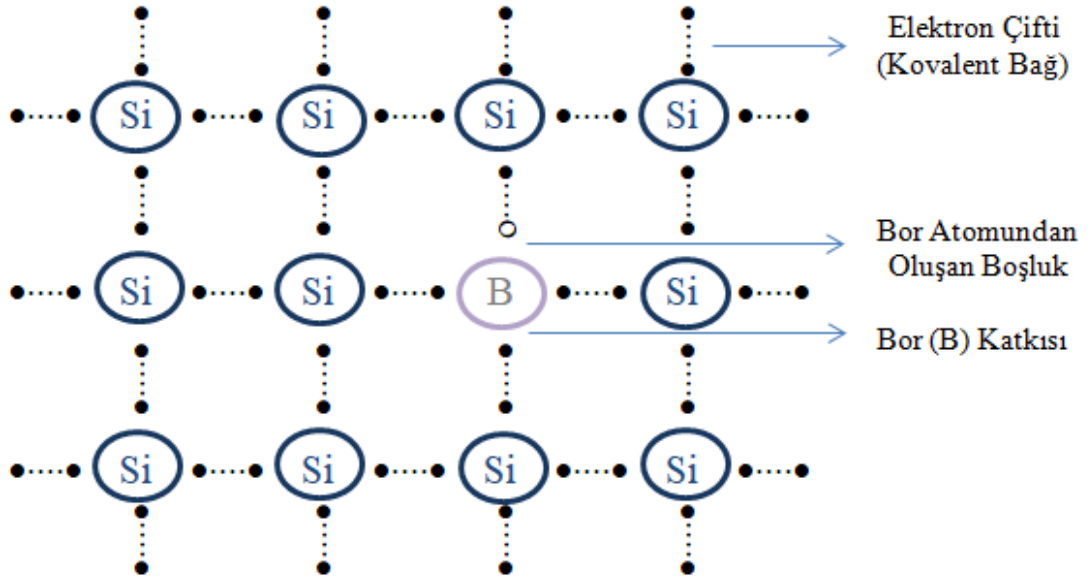
Donör atomlarının bulunduğu enerji seviyeleri donör enerji seviyesi olarak adlandırılır ve E_d ile ifade edilir. Donör enerji seviyesine baktığımızda yasak enerji bandında yer aldığını görürüz ve iletkenlik bandına yakındır. Şekil 2.9'da donör atomlarına ait enerji seviyesi gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Enerji bant diyagramında donör atomlarının enerji seviyesi gösterimi.

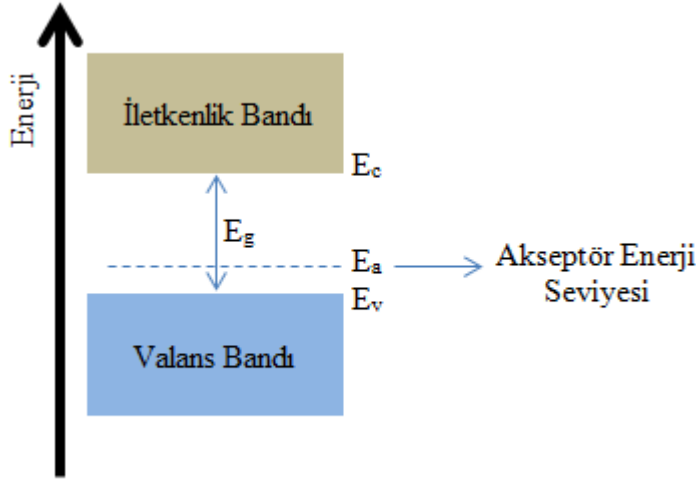
n – tipi yarıiletkenlerdeki serbest haldeki elektron sayısı fazla olduğundan elektronlar çoğunluk taşıyıcıları olarak adlandırılır ve akım iletiminde baskındır. n – tipi yarıiletkenlerde boşluklar ise azınlık taşıyıcılarıdır.

Si kristaline Bor (B) katkılındığını farz edelim. Bu katkılama Şekil 2.10’da gösterilmiştir. Si elementinin dört tane valans elektronu varken, Bor’un üç tane valans elektronu vardır. Kristalde Bor atomu ve Si atomu üçer valans elektronunu ortaklaşa kullanarak aralarında kovalent bağ oluşturur. Fakat Si atomlarında bir elektron Bor ile bağ oluşturamaz. Bu durumda elektron eksikliği meydana gelir. Bor atomunda meydana gelen bu yapı, boşluk olarak adlandırılır ve pozitif yüklüdür. Elektron yakalamaya uygun Bor atomuna alıcı diğer adıyla akseptör atom denilmektedir.



Şekil 2.10. Silisyum kristaline Bor katkılanması temsili kovalent bağ gösterimi.

Akseptör atomlarının bulunduğu enerji seviyeleri ise akseptör enerjisi seviyesi olarak adlandırılır ve E_a ile ifade edilir. Akseptör enerji seviyesine baktığımızda yasak enerji bandında yer aldığını görürüz ve valans bandına yakındır. Şekil 2.11’de akseptör atomlarına ait enerji seviyesi gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Enerji bant diyagramında akseptör atomlarının enerji seviyesi gösterimi.

p – tipi yarıiletkenlerde boşluklar yani holler çoğunluk taşıyıcılarıdır. Akım iletiminde boşluklar daha baskındır. p – tipi yarıiletkenlerde elektronlar ise azınlık taşıyıcılarıdır.

Tek veya çoklu kristal halde gruplandırılan yarıiletkenler Si ve Ge gibi element halinde bulunurken, farklı yöntemlerle ikili, üçlü veya dörtlü bileşikler halinde de elde edilebilmektedir.

Periyodik cetvelin II. grubunda yer alan Çinko (Zn) veya Kadmiyum (Cd) elementlerinin VI. grup elementleri (O, S, Se, Te) ile yaptıkları bileşikler IV. grup elementlerine göre üstünlük sağlamaktadırlar. Bunun nedeni mevcut ve ucuz hammaddelerden yüksek saflıkla elde edilebilmesindedir.

Son yıllarda periyodik cetvelin II – VI grubu bileşikleri özelliklerinden dolayı araştırmaların önemli bir konusu olmuştur. II – VI grubu bileşikleri geniş bir bant aralığına sahip olmakla beraber görünür bölgede ışımaya yaparak iyi bir lüminesans özelliği göstermektedir. Ayrıca bu bileşikler elektriği oldukça iyi iletmektedirler.

Yarıiletken teknolojisinde II – VI grubu bileşikleri önemli avantajlarından dolayı büyük bir öneme sahip olmuşlardır. Özellikle de ışık yayan veya algılayan cihaz uygulamaları için de idealdirler. Yasak enerji aralıkları geniştir. II-VI grubu bileşiklerine örnek olarak

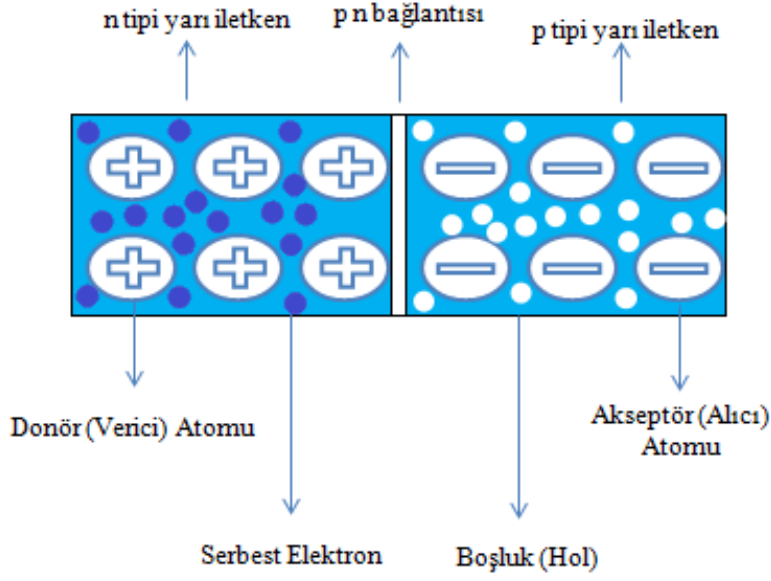
ZnS (Çinko Sülfid), ZnO (Çinko Oksit), ZnTe (Çinko Tellürit), ZnSe (Çinko Selenit), CdS (Kadmiyum Sülfid), CdO (Kadmiyum Oksit), CdTe (Kadmiyum Tellürit) ve CdSe (Kadmiyum Selenit) gösterilebilir. Bu yarıiletkenlerin bazı özellikleri Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. II – VI grubu yarıiletken bileşiklerin bazı özellikleri (Akaltun 2006).

II-IV Grubu Bileşikleri	Yasak Bant Aralığı, 300 K (eV)	Kristal Yapısı
ZnO	3,4	W (D)
ZnS	3,7 – 3,9	ZB (D) – W (D)
ZnSe	2,7	ZB (D)
ZnTe	2,3	ZB (D)
CdO	2,28	
CdS	2,5	W (D)
CdSe	1,8	W (D) – C (D)
CdTe	1,5	ZB (D)

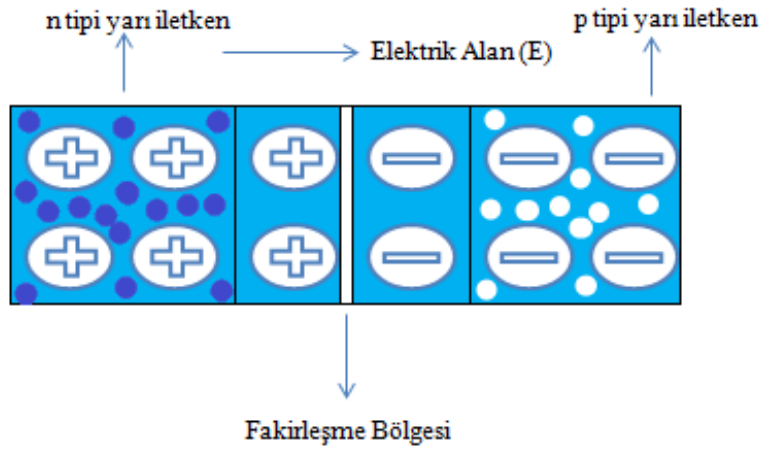
2.1.3. PN Eklemler

PN eklemler tüm yarıiletken devre elemanları olsun, yarıiletken düzenekler (diyot, transistör, fotovoltaik) olsun bunların temel yapı taşıdır. Yani elektronik endüstrisinin vazgeçilmez elemanıdır. Daha önceki bölümlerde de bahsedilen saf yarıiletkenlerin; alıcı (akseptör) atomlarıyla katkılanması sonucu p – tipi yarıiletkenler, verici (donör) atomları ile katkılanması sonucu ise n – tipi yarıiletkenler oluşmaktaydı. Teorik olarak baktığımızda pn eklemi n – tipi ve p – tipi yarıiletkenlerin birleştirilmesidir. Şekil 2.12’de pn yapısının gösterimi mevcuttur. Fakat bu iki yarıiletken n ve p tipi ayrı ayrı oluşturulup birleştirilmez. PN eklemi kristalin büyütülmesi sırasında p ve n tipi bölgeler arasında oluşturulur.



Şekil 2.12. Basit bir pn yapısının gösterimi.

Üç kısımdan oluşan pn eklemi; n – tipi bölge, p – tipi bölge ve bu ikisi arasında yer alan fakirleşme bölgesinden oluşmaktadır. Yukarıda bahsedilen bölgeler Şekil 2.13’te gösterilmiştir.

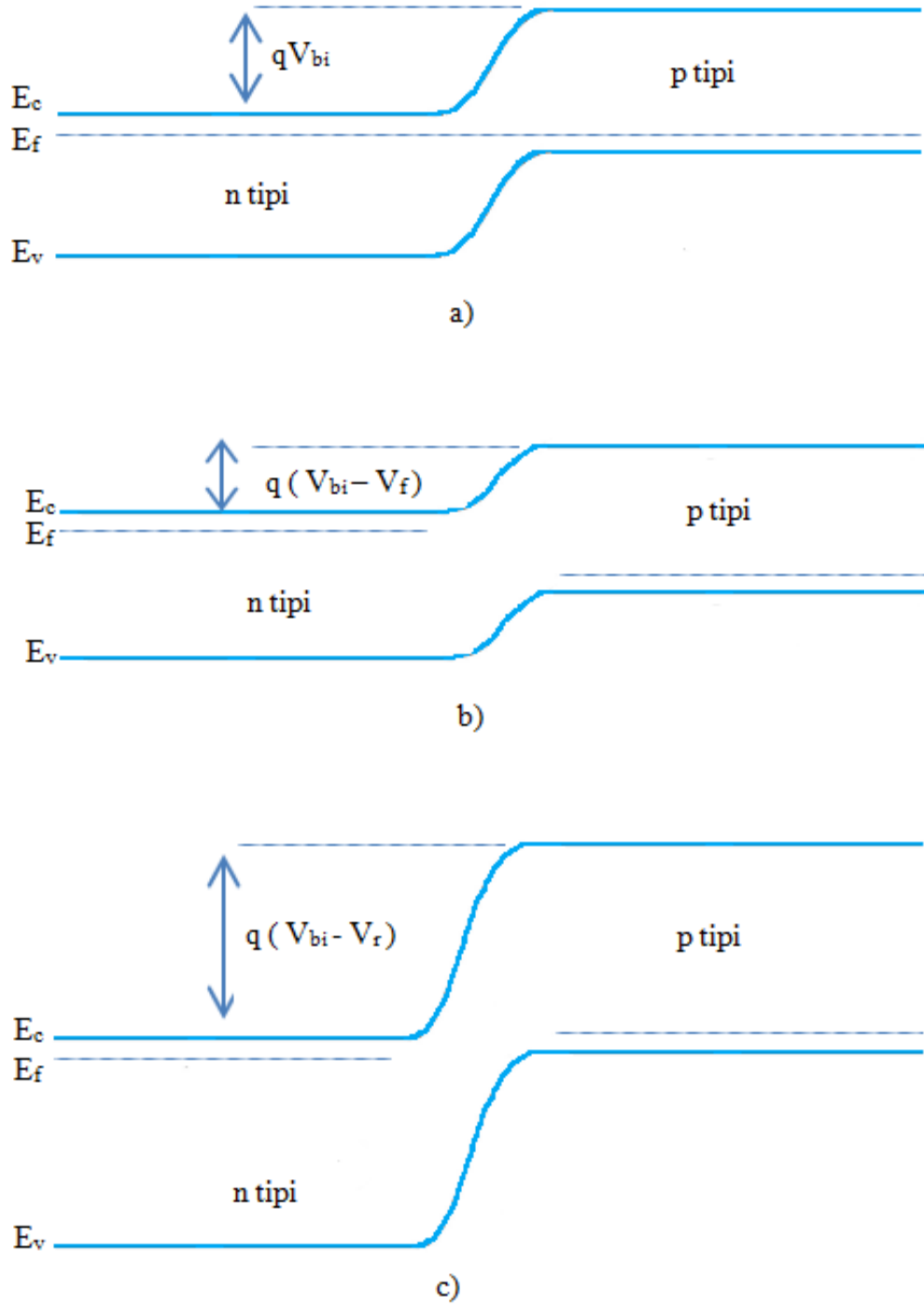


Şekil 2.13. PN eklemde elektrik alan oluşumu gösterimi.

PN eklem bölgesinde hareketli yüke rastlanmaz. Bu nedenle hareketli yükleri azaltan bu bölgeye fakirleşme bölgesi adı verilmektedir. Eklem her iki tarafında da farklı taşıyıcı yoğunluklarında bölgeler mevcuttur. N – tipi bölgede çoğunluk yük taşıyıcıları

elektronlar ve p – tipi bölgede ise çoğunluk yük taşıyıcıları boşluklardır. Azınlık yük taşıyıcıları ise tam tersi şekilde adlandırılır. N – tipi bölgesinin çoğunluk yük taşıyıcıları p - tipi bölgesine, p-tipi bölgesinin çoğunluk yük taşıyıcıları ise n – tipe bölgeye geçerler. Bu geçiş neticesinde eklemin her iki bölgesindeki atomlar iyonlaşır. Çoğunluk yük taşıyıcıları yoğunluklarının az olduğu bölgeye doğru geçerler, bu geçiş termal denge sağlanıncaya kadar devam eder. Bu geçiş her iki bölgenin Fermi enerji seviyeleri eşit olduğunda durur ve fakirleşme bölgesi çevresinde bir elektrik alan oluşur. Şekil 2.13'te bu elektrik alanın yönü gösterilmektedir.

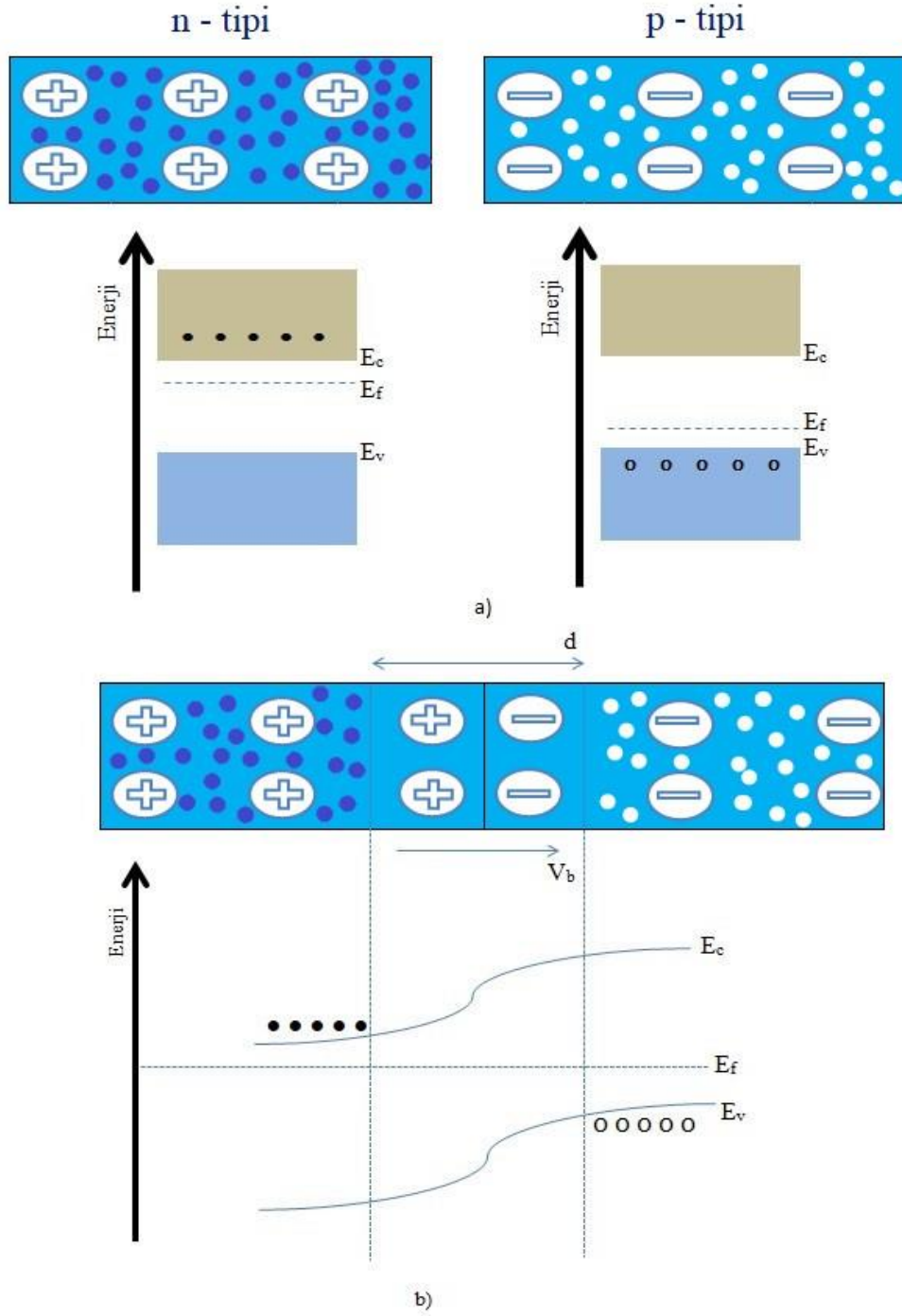
PN eklemin iki ucundan voltaj uygularsak, voltajın polaritesi bize serbest yük taşıyıcılarının eklemden geçişleri hakkında bilgi vermektedir. Diyotlar genel olarak akımı tek yönde geçiren elemanlardır. Bu durum diyotun ileri polarlama veya ters polarlamalarına göre değişmektedir. Şayet diyotun p – tipi katkılı bölgesine pozitif voltaj uygulanmışsa ileri polarlanmış veya negatif voltaj uygulanmışsa ters polarlanmış olarak adlandırılır. Şekil 2.14'te ileri polarlamada potansiyel engelin küçüldüğü, ters polarlama da ise engelin büyüdüğü görülmektedir (Kaplan 2017).



Şekil 2.14. a) Termal denge durumunda b) ileri yönde polarlama c) ters polarlamanın şematik gösterimi (Kaplan 2017).

2.1.4. Homoeklemler ve Heteroeklemler

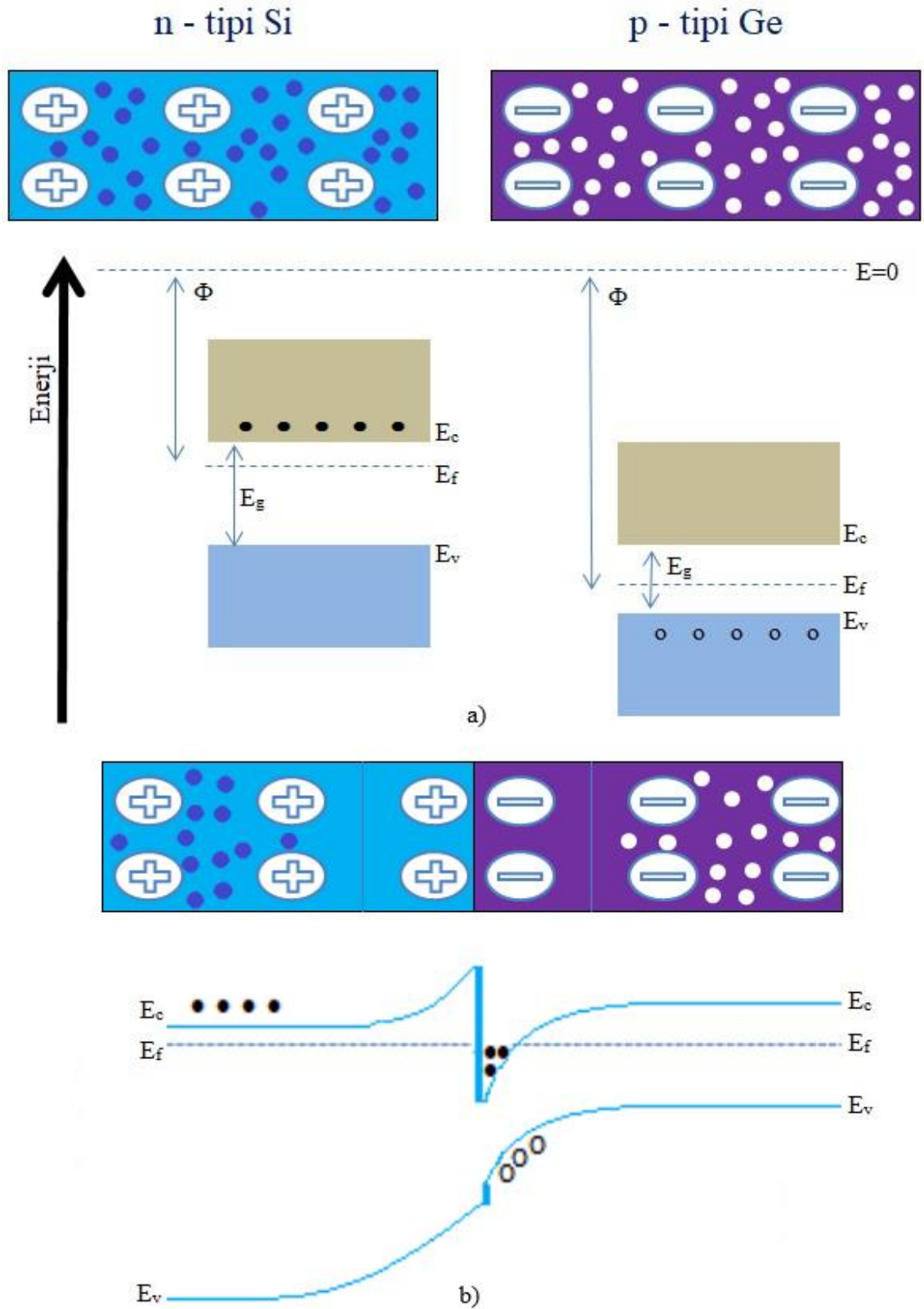
Saf yarıiletkene, farklı atomlarla katkı yaparak n ve p tipi yarıiletken elde edilebilir. Elde edilen aynı tip yarıiletken kristallerin büyütülmesi sırasında p ve n tipi bölgeler arasında homoeklem adı verilen eklem oluşmaktadır. Bu eklemde p ve n tarafındaki yük yoğunlukları farklıdır. Eklem olduğu sırada p – tipi bölgedeki boşluklar n – tipi bölgeye, elektronlar ise n – tipi bölgeden p – tipi bölgeye difüzyon ile geçerler. Bu geçiş esnasında elektron ve boşluklar birleşerek eklem çevresinde hareketli yüklerin yer almadığı fakirleşme bölgesini oluşturur. Difüzyon süresi Fermi seviyeleri eşitleninceye kadar devam eder. Hareketli yüklerin yer almadığı fakirleşme bölgesinde yalnızca iyonlaşmış katkı atomları yer alır ve aynı zamanda eklem bölgesinin iki tarafında zıt yüklü bölgeler oluşturur. Sabit zıt yüklü iyonlar eklemde karşılıklı geçişe engel olan bir potansiyeli oluşturur. Yani engel bölgesine giren elektron veya boşluk geri iten bir kuvvetle karşılaşır. Burada dengelenmemiş yükten kaynaklı elektrik alan oluşur. Fermi seviyesi farkları aslında bu yapı potansiyelini oluşturur. Termodinamik denge durumunda pn eklemde Fermi seviyesinin sabit olması gerekmektedir. Bu sabit durumdan dolayı eklemde bant bükülmesi gerçekleşir (Yacobi 2003). Eklem oluşturulmadan önce ve oluşturulduktan sonra ortaya çıkan enerji bant yapıları Şekil 2.15’te gösterilmiştir.



Şekil 2.15. a) Eklem oluşturulmadan önce n ve p – tipi yarıiletkenlerinin enerji bant yapısı b) p – n eklemi oluşturulduktan sonra enerji bant yapısı ve fakirleşmiş bölge (Sarı 2009).

Daha önceki bölümlerde Si ve Ge kristallerine katkılama yaparak p – tipi ve n – tipi yarıiletkenleri oluşturmuştuk. Heteroeklemler ise farklı türdeki p – tipi ve n – tipi

yarıiletkenin bir araya gelmesiyle oluşan yapılardır. Şekil 2.16'da p – tipi Ge yarıiletken ile n – tipi Si yarıiletkenden oluşan heteroeklem görülmektedir. Enerji – bant grafiği de Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



Şekil 2.16. a) Eklem oluşturulmadan önce n – tipi Si ve p – tipi Ge yarıiletkenlerinin enerji bant yapısı **b)** p – n heteroeklemi oluşturulduktan sonra enerji bant yapısı ve (Sarı 2009).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Tez çalışmasında üretilen ve incelenen Cam/ITO/CuS/ZnSe heteroeklem yapının yarıiletken bileşenleri ZnSe ve CuS, ön kontak olan Ag özelliklerinden bahsedilmiştir.

3.1.1. Çinko Selenit (ZnSe)

Çinko Selenit, oda sıcaklığında 2,7 eV'luk yasak bant aralığına sahip, lazer diyotlar, yeşil-mavi ışık yayan diyotlar ve güneş pillerindeki geniş uygulama alanları bulunan II-VI grubu yarıiletken malzemelerindendir (Kalita ve Ark 2000). ZnSe kübik kristal yapıya sahiptir. Çizelge 3.1'de özelliklerinden detaylı olarak bahsedilmiştir.

3.1.2. Bakır Sülfid (CuS)

Katmanlı bir yapıya sahip olan bileşik, p – tipi şeffaf bir yarıiletken olup 1,6 eV yasak enerji aralığına sahiptir. (Shin-Ichino ve ark., 2001). Elektronik, sensörler – dedektörler, güneş hücreleri vb. gibi birçok uygulama alanları mevcuttur. Çizelge 3.1'de özelliklerinden detaylı olarak bahsedilmiştir.

Çizelge 3.1. ZnSe – CuS yarıiletkenlerinin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri

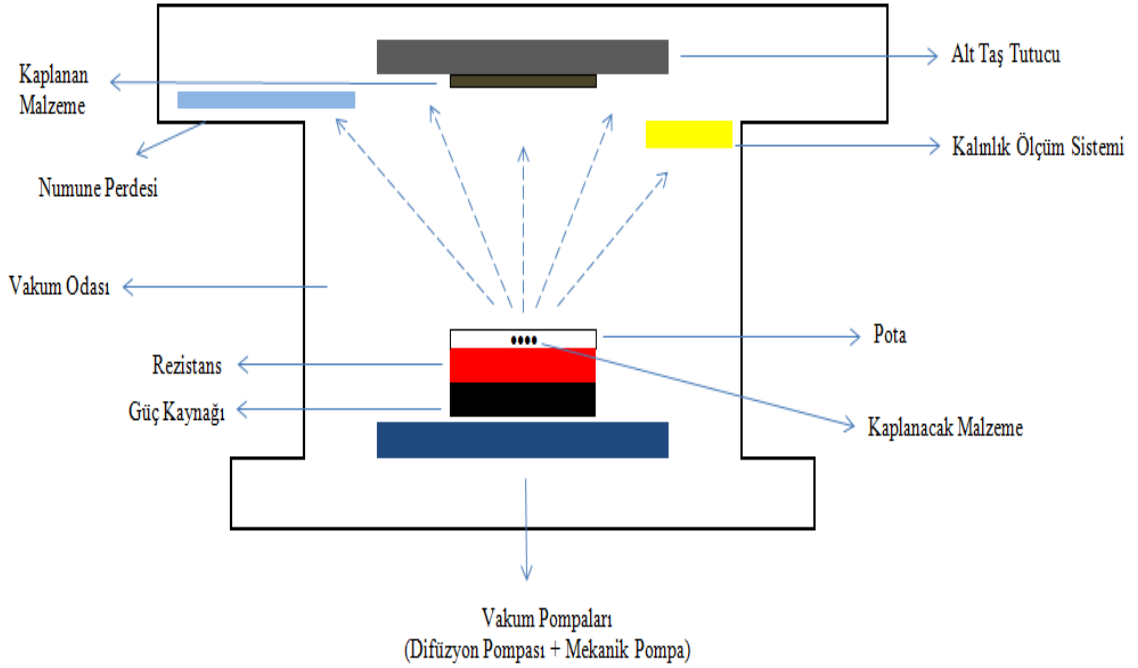
Özellikler	ZnSe	CuS
Ergime Noktası (°C)	1525	500
Örgü Parametresi (Å)	5,66	0,25
Yoğunluk (g/cm ³)	5,27	4,76
Görünüm	Açık sarı katı	Siyah toz
Molar Kütle g/mol	144,35	95,611
Kristal Yapısı	Kübik	Hegzagonal
Kırınım İndisi	2,67	1,45

3.1.3. Gümüş (Ag)

Heteroeklem diyota ohmik nokta şeklinde kontak yapmak için Termal buharlaştırma ile gümüş (Ag) kaplanmıştır. Ticari olarak alınan alınan Ag, %99,95+ saflıktadır. Yoğunluğu $10,49 \text{ g/cm}^3$, ergime noktası $961,78 \text{ }^\circ\text{C}$, molar kütlesi $107,86 \text{ g/mol}$, kristal yapısı yüzey merkezli kübik ve görünüm olarak parlak beyaz renklidir.

3.2. Termal Buharlaştırma Yöntemi

Termal buharlaştırma sistemini oluşturan temel kısımlar Şekil 3.1’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Termal buharlaştırma sistemi şematik gösterimi.

Termal buharlaştırma sistemi genel olarak vakum odası, vakum pompaları, güç kaynağı, rezistans, pota (W, Mo, Ta vb), kalınlık ölçer, numune perdesi ve alt taş tutucu kısımlarından oluşmaktadır.

Termal buharlaştırma yönteminde ilk olarak kaplama malzemesine uygun pota seçilmektedir. Potalar ısıya dayanıklı malzemelerden oluşmaktadır. Uygun pota seçildikten sonra potaya kaplama malzemesi eklenir ve vakum odası (kazanı) kapatılır. Difüzyon ve mekanik pompa yardımıyla vakum odası istenilen basınç değerine getirilir. Genellikle basınç değeri 1×10^{-5} Torr civarındadır. İstenilen basınç değerine geldiğinde vakuma alma işlemi tamamlanmış olur. Güç kaynağı açılarak rezistans yavaş yavaş ısıtılmaya başlanır. Kaplama malzemesi buharlaşmaya kadar akım değeri artırılır. Kaplama malzemesi, vakum ortamında alttaş tutucuda bulunan kaplanmak istenen alttaşın üzerine birikmeye başlar. Homojen bir film elde etmek için alttaş tutucu kendi ekseninde dönmektedir. İstenilen kalınlık, sistemde yer alan kuartz kristal kalınlık ölçer vasıtasıyla takip edilmektedir. Kalınlık ölçer sistemi hem kaplama hızını hem de kaplanan malzemenin kalınlığını göstermektedir. Belirlenen kalınlığa gelene kadar kaplama işlemi devam eder. İnce filmde istenilen kalınlık elde edildikten sonra rezistans üzerindeki potaya verilen akım değeri sıfıra getirilir. Güç kesildikten sonra sistem vakumdan çıkarılır ve alttaş kaplama malzemesi ile kaplanmış olur.



Şekil 3.2. Termal buharlaştırma sistemi.

3.3. Deneysel Çalışmalar

3.3.1. Cam/ITO/CuS/ZnSe Heteroeklem Yapısının Üretimi

Alttaş olarak kullanılan ITO ve cam, elmas kesici ve cetvel yardımıyla ortadan ikiye kesilerek kırıldı. Bu işlemden sonra beher içerisinde saf su ile yıkandı. Beher içerisinde saf su ile ultrasonic banyoda temizlenmesi için 10 dakika kadar bekletildi. Temizleme işleminin ikinci aşamasında beher içerisinde saf su yerine aseton ve son olarak aseton ile temizleme yapıldıktan sonra izopropil alkol konularak alttaş temizliği bitirildi. Temizlenen alttaşlar kurumaya bırakıldı. Kuruyan alttaşlardan ITO'nun iletken tarafına voltmetre ile bakılarak kırılan parçalardan bir tanesi alt taş tutucu üzerine temizlenen cam ile birlikte sabitlendi. Termal buharlaştırma sistemine yerleştirilen bu alttaş tutucunun yanı sıra Molibden (Mo) potaya da kaplama malzemesi olan CuS konuldu. Bunlar yapıldıktan sonra vakum kazanı kapatılıp vakum alma işlemi başlatıldı. Vakum alma işlemi bittikten sonra vakum kazanı içerisindeki basınç değeri 1×10^{-5} Torr'a getirildi. Sistemin vakum alma işlemi 22 dakikada tamamlandı. Bundan sonra güç kaynağı açıldı ve akım değeri potadaki kaplama malzemesi olan CuS buharlaşana kadar yavaş yavaş artırıldı. Akım 95 A'e kadar çıktı ve kaplama kalınlığına ulaşana kadar sabit kaldı. Bu kaplamanın sonunda ITO kaplı cam ve boş cam alttaşlar, 300 nm CuS ince filmiyle kaplandı. Kaplama hızı yani kalınlık artışı yaklaşık 10 Å/s olarak gerçekleşti. İnce film daha sonra tavlama ocağına alındı (Şekil 3.4). Tavlama ocağında 200 °C'de 10 dakika boyunca Argon (Ar) akışı altında tavlandı. Sistem 200 °C'ye 228 saniyede ulaştı. Tavlanan ince filmler 600 nm kalınlıkta ZnSe kaplanmak üzere alt taş tutucunun üzerine sabitlendi. Pota ZnSe'e uygun hale getirilip Tungsten (W) olarak değiştirildi. CuS kaplama işleminde olduğu gibi kazan kapatıldı, sistem vakuma alındı. Akım değeri artırılarak ZnSe'nin buharlaşması sağlandı. Akım 101 A'e kadar ulaştı. ZnSe ince film 600 nm kalınlığında kaplandı. Kaplama hızı yaklaşık 9 Å/s ile gerçekleşti. 600 nm kaplanan ince filmler tekrar tavlamanın üzere tavlama fırınına bırakıldı. Bu sefer tavlama sıcaklığı 180 °C süre ise 15 dakika oldu. Tavlama ocağının 180 °C'ye ulaşması 215 saniye aldı. ITO üzerine kaplanan numune 0,5 mm'lik noktasal maske kullanılarak 100 nm Ag kaplandı ve 100 °C'de tavlandı. Tüm bu işlemler sonucunda Cam/ITO/CuS/ZnSe/Ag heteroeklem yapısı üretildi.

Çizelge 3.2. Termal buharlaştırma sistemi, heteroeklem üretim parametreleri.

Parametreler	ZnSe	CuS
Biriktirme Kalınlığı (nm)	600	300
Buharlaştırma Akımı (A)	101	95
Biriktirme Hızı (Å/s)	9	10
Vakum Altında Basınç (Torr)	1×10^{-5}	1×10^{-5}
Kullanılan Pota	W	Mo



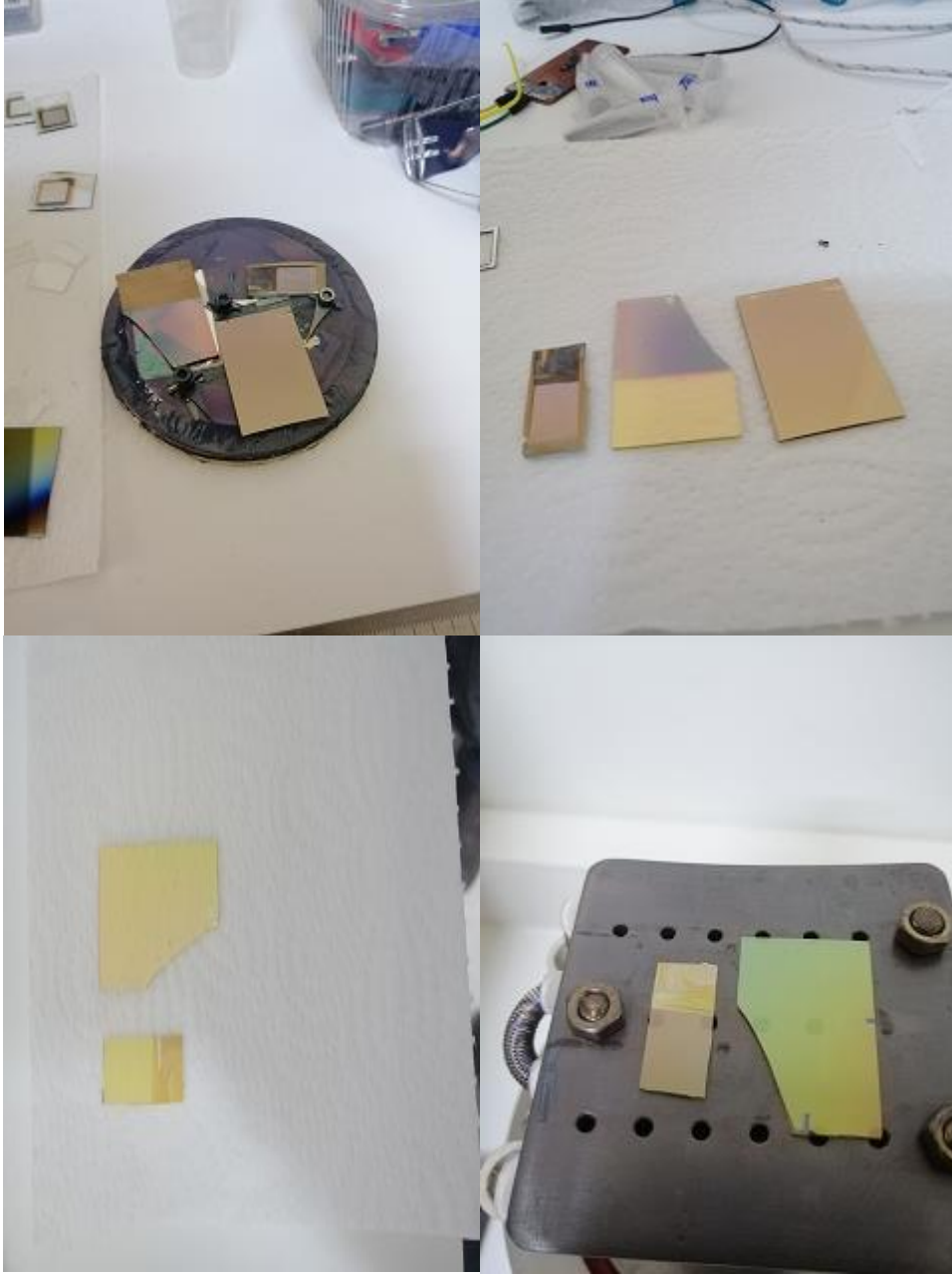
Şekil 3.3. İnce film kaplama hazırlık aşamaları.



Şekil 3.4. Tavlama ocağı ve argon tüpü.



Şekil 3.5. Üretilen heteroeklem yapının şematik gösterimi.



Şekil 3.6. Cam ve ITO üzerine biriktirilen CuS/ZnSe ince filmler.

3.3.2. Ölçüm ve Analizler

CuS/ZnSe ince filmin, geçirgenlik ile soğurma spektrumları cam üzerine biriktirilen numuneden UV-VIS spektrofotometresi (Shimadzu UV/VIS 2600) ile ölçüldü. Yüzey morfolojisi hakkında bilgi edinmek ve incelemek için taramalı elektron mikroskobu (Zeiss, GeminiSEM 300) kullanıldı. CuS/ZnSe ince filmin kristal özelliklerini incelemek

için x-ışınları difraksiyonu (XRD, Bruker D8 Discover) kullanıldı. Heteroeklemin karanlık akım – voltaj (I – V) ölçümleri (Fytronix 7000 SourceMeter ve Fy 7000 güneş hücresi simülatörü) ile yapılmıştır. Hall etkisi ölçümleri (Ecopia HMS 3000) ile yarıiletken tipi ve taşıyıcı yoğunluğu belirlenmiştir. Ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır.

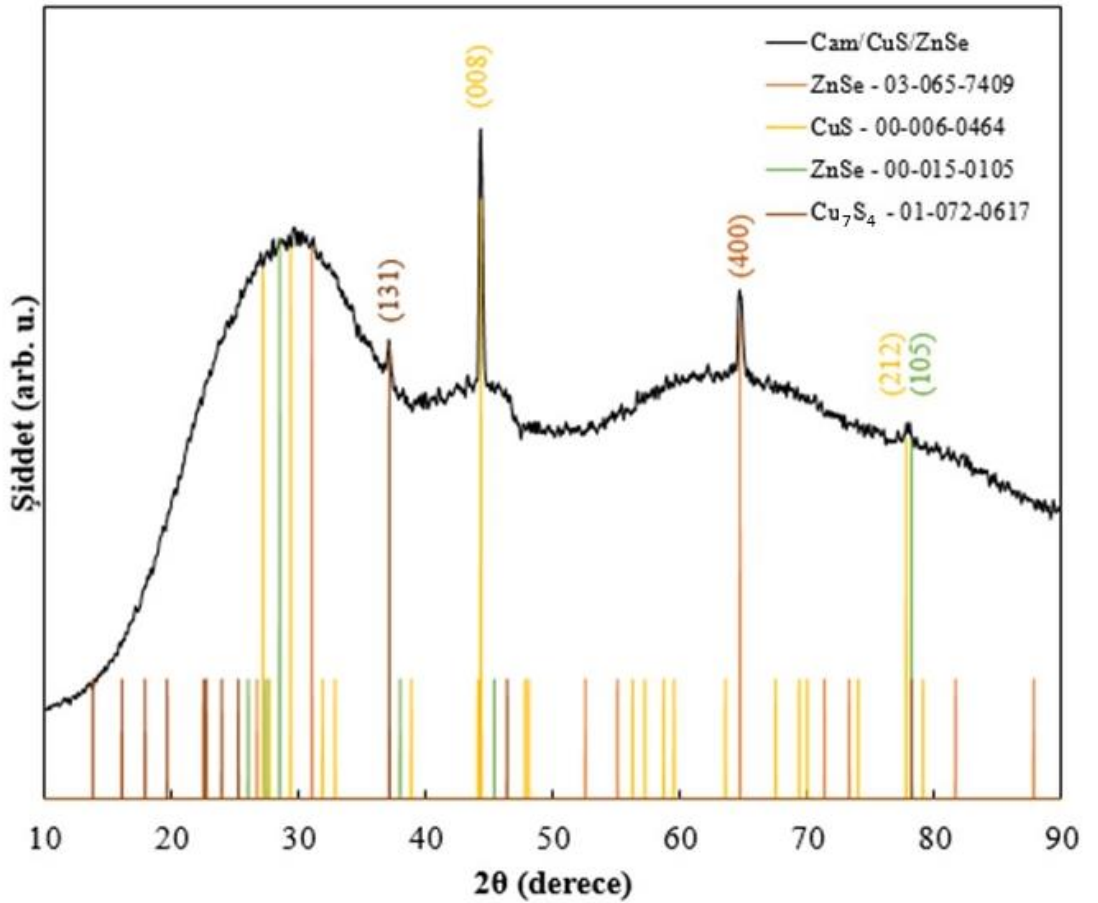


Şekil 3.7. CuS/ZnSe heteroeklemin I – V ölçümü yapılan sistemin genel görüntüsü (Fytronix 7000 SourceMeter ve Fy 7000 güneş hücresi simülatörü).

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Yapısal ve Morfolojik Özellikler

Şekil 4.1’de oluşturulan yapının XRD spektrumu verilmiştir. XRD ölçümlerinden her iki fazın elde edildiği görülmektedir. Ayrıca CuS’un başka kararlı bir durumuna ait olan Cu₇S₄ oluşumu da tespit edilmiştir. XRD analizinden, CuS ince filmi baskın olmakla birlikte, polikristal yapıların oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.1. Cam üzerine biriktirilmiş CuS/ZnSe ince filmin X-ışınımı kırınım spektrumu.

XRD pikleri, ICDD (Uluslararası Kırınım Verileri Merkezi) kullanılarak tanımlanmıştır. ICDD-PDF No: 01-072-0617, 00-006-0464, 03-065-7409, 00-006-0464, 00-015-01057 XRD pikleri yukarıda yer alan referans kartları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca (1 3 1), (0 0 8), (4 0 0), (2 1 2), (1 0 5) kristal yönelimleri 37,11°, 44,30°, 64,69°, 77,77° ve 78,18°

kırınım açılarına karşılık gelmektedir. Ortalama kristalin boyutu D, Scherrer formülü kullanılarak hesaplanabilir (Cullity 1978).

$$D = \frac{0,9 \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta} \quad (4.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\beta \cdot \cos \theta}{4} \quad (4.2)$$

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (4.3)$$

Denklem 4.1’de λ dalga boyu, θ kırınım açısı β ise radyan cinsinden yarım maksimumda tam genişlik (FWHM) değeridir. Denklem 4.2 ε örgü gerilimi ve denklem 4.3’te dislokasyon yoğunluğu δ ile gösterilmiştir. Yukarıdaki denklemler kullanılarak bileşikler için çizelge 4.1’deki parametreler hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1. XRD analizi sonucu belirlenen parametreler

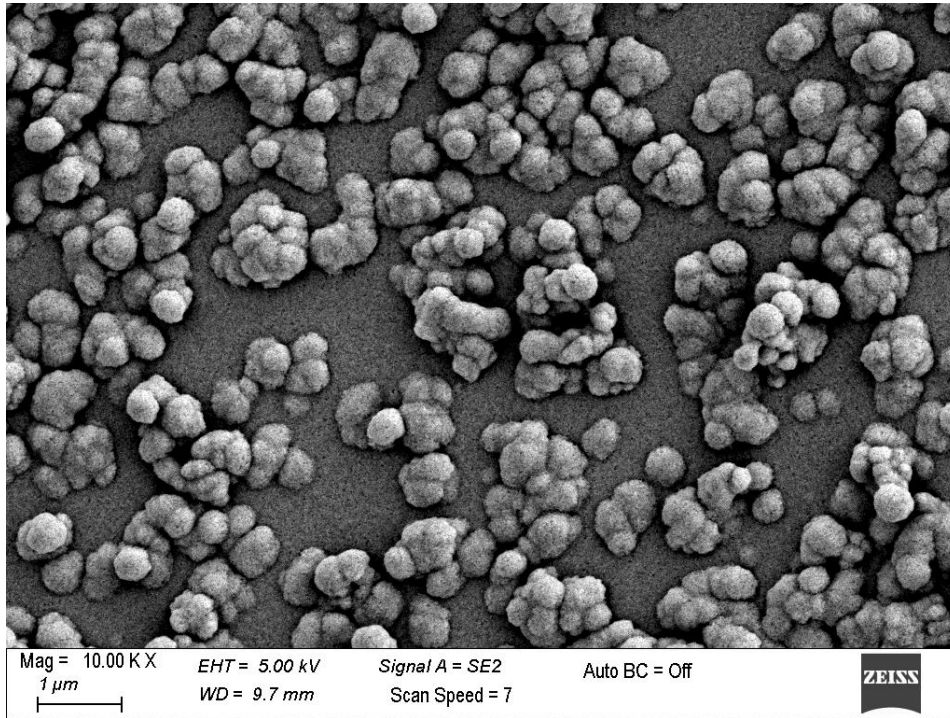
2 θ	Bileşik Adı	Miller İndisleri	Kristal Boyutu (nm)	Örgü Gerilmesi ε	Dislokasyon yoğunluğu δ (nm ⁻²)
37,11	Cu ₇ S ₄	(1 3 1)	25,94	1,34×10 ⁻³	1,49×10 ⁻³
44,30	CuS	(0 0 8)	29,37	1,18×10 ⁻³	1,16×10 ⁻³
64,69	ZnSe	(4 0 0)	41,79	8,29×10 ⁻⁴	5,73×10 ⁻⁴
77,77	CuS	(2 1 2)	-	-	-
78,18	ZnSe	(1 0 5)	-	-	-

10 keV hızlandırma voltajı ile yapılan EDS analizinden elde edilen (EDS - Bruker / XFlash 6 I 100) elemental analiz sonuçları çizelge 4.2’de verilmiştir.

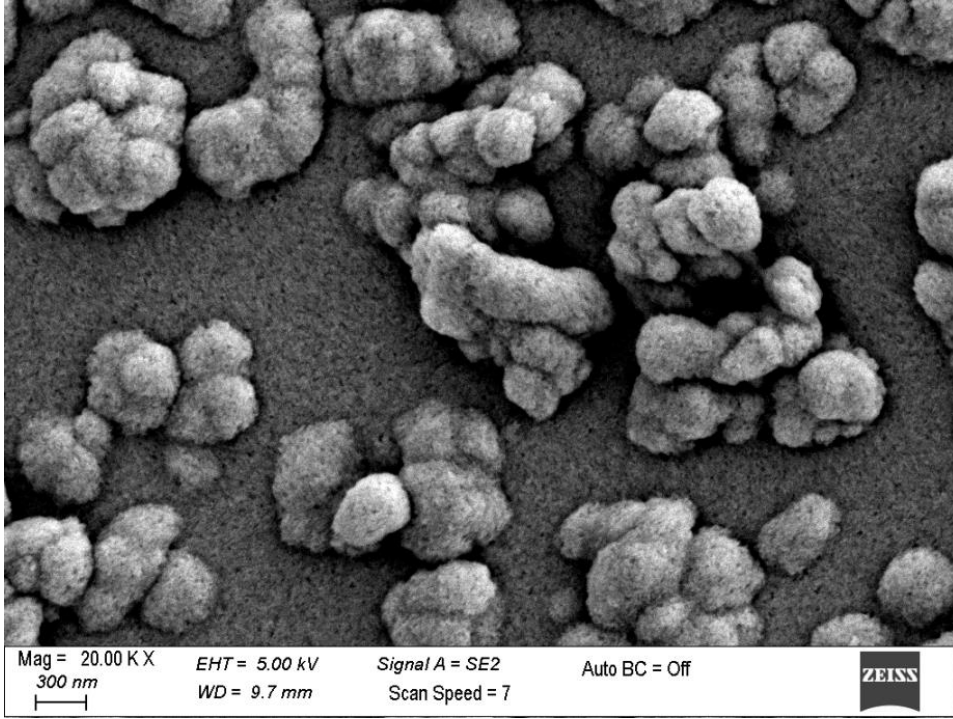
Çizelge 4.2. EDS analizi sonucu belirlenen elemental yüzdeler.

Element	Çinko	Selenyum	Bakır	Kükürt
%	18,74	21,71	34,10	25,45

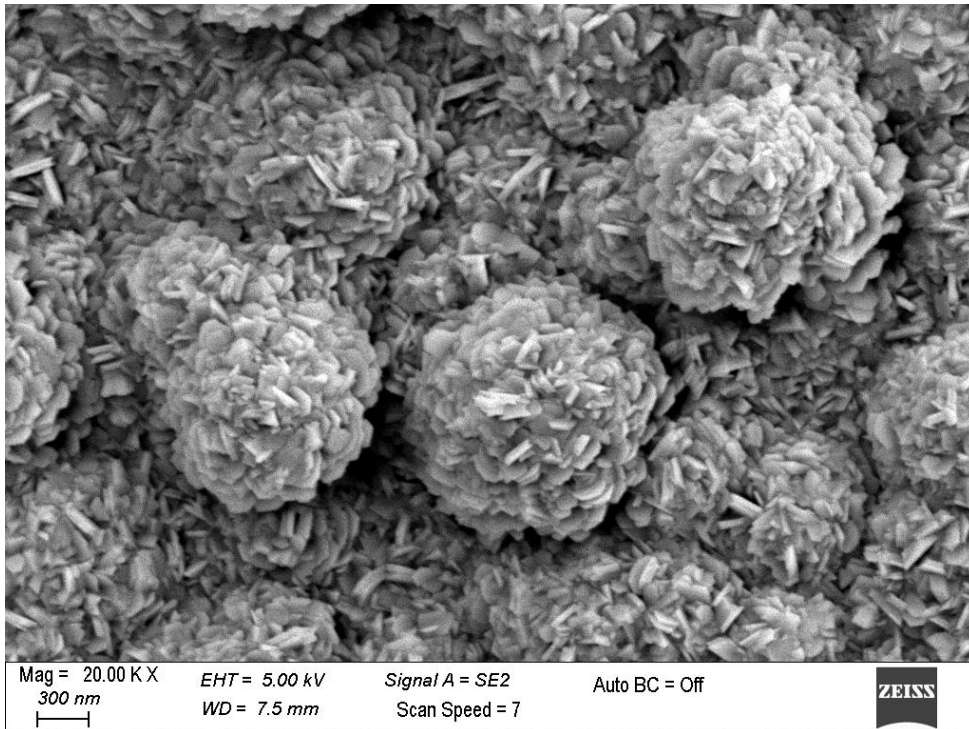
Cam üzerine biriktirilen CuS/ZnSe ince filmin yüzey morfolojisi SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) ile incelenmiştir. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 CuS üzerinden alınan, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 ZnSe üzerinden alınan farklı büyütme oranlarına sahip görüntüler verilmiştir. SEM görüntülerinde taneciklerin dağılımı homojen, tanecik boyutlarının birbirine eşit olduğu gözlenmektedir. Ayrıca tavlamanın etkisiyle yer yer topaklaşmalar oluşmuştur. XRD analizinden elde edilen pikler yardımı ile hesaplanan tanecik boyutları ile SEM görüntüleri yardımıyla ölçeklenen tane boyutları uyuşmaktadır.



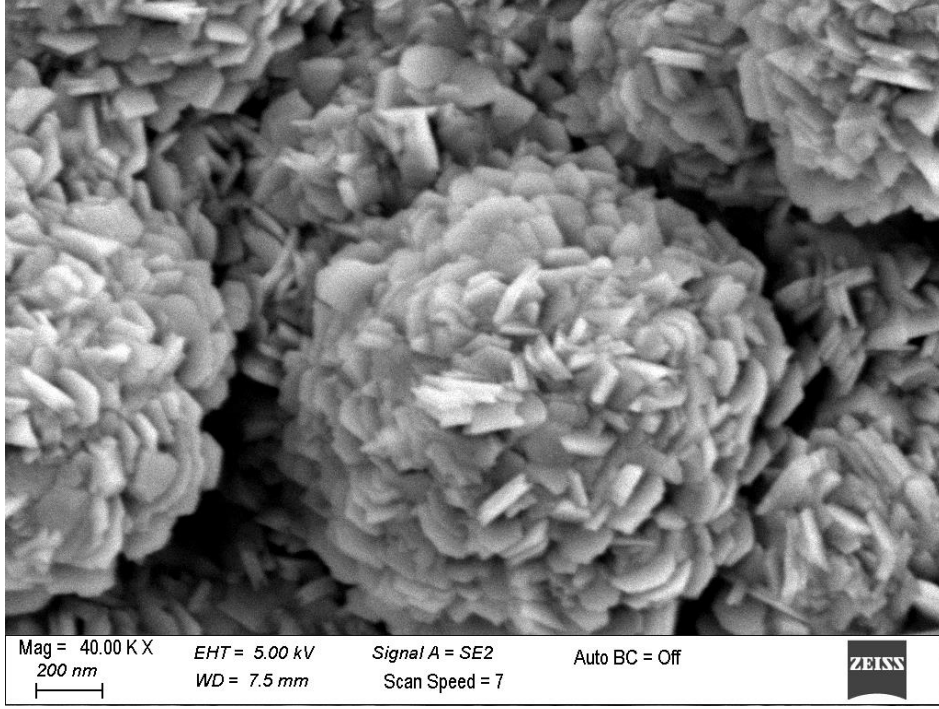
Şekil 4.2. CuS ince filmin 10.00 KX görüntü büyütmesi.



Şekil 4.3. CuS ince filmin 20.00 KX görüntü büyütmesi.

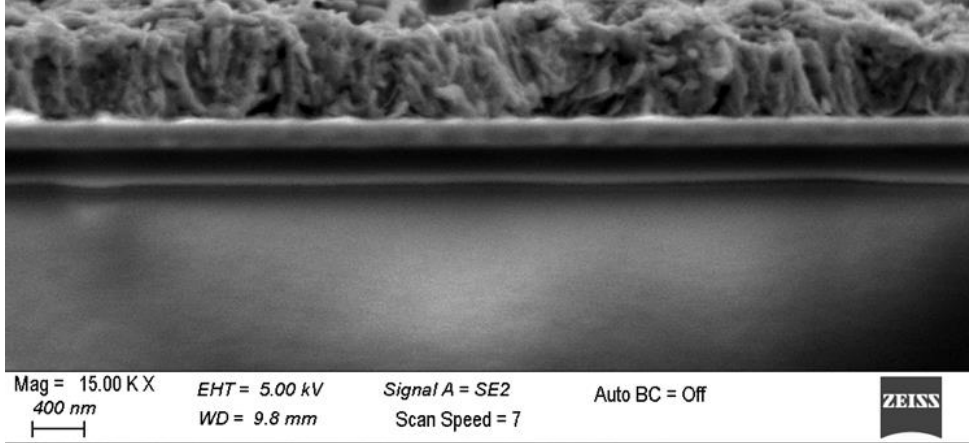


Şekil 4.4. ZnSe ince filmin 20.00 KX görüntü büyütmesi.



Şekil 4.5. ZnSe ince filmin 40.00 KX görüntü büyütmesi.

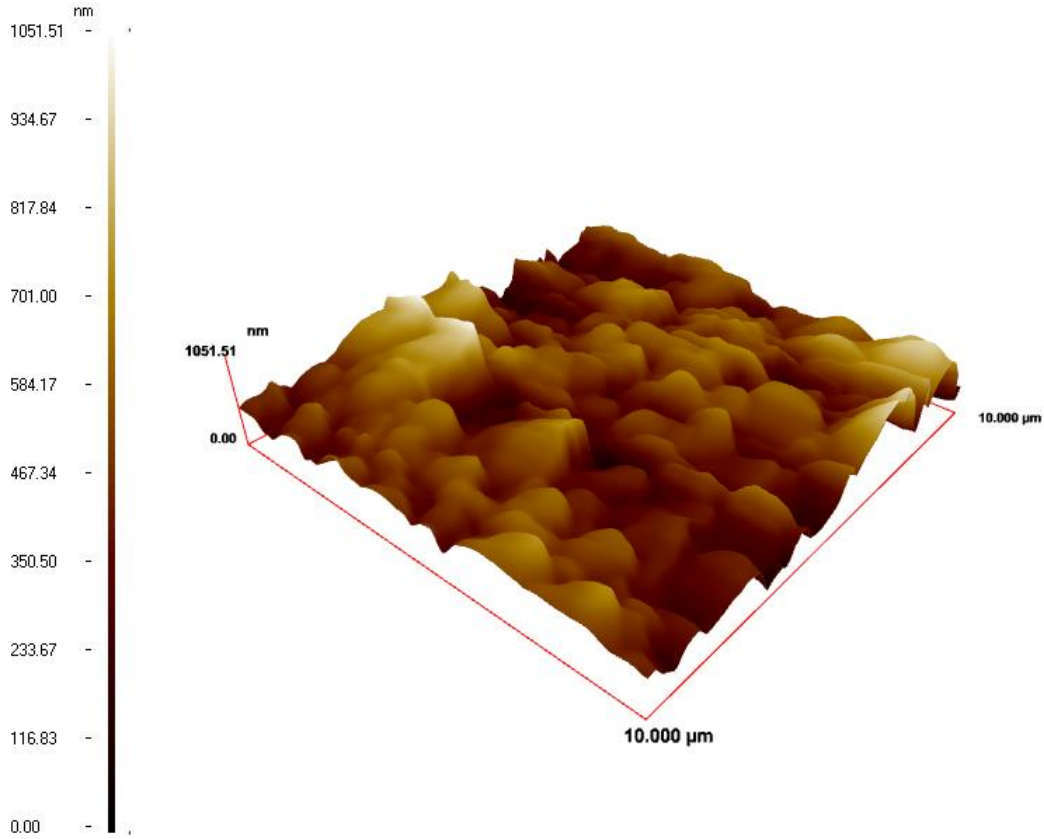
Şekil 4.6’da yer alan SEM görüntüsü, cam üzerine biriktirilen CuS/ZnSe ince filmin kesitinden alınan 15.00 KX büyütmeye sahip olan görüntüsüdür.



Şekil 4.6. CuS/ZnSe ince filmin kesitinden alınan SEM görüntüsü.

Cam üzerine biriktirilen CuS/ZnSe ince filmin AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) görüntüsü ise $10 \times 10 \mu\text{m}$ çözünürlükte taranmış ve üç boyutlu AFM görüntüsü Şekil

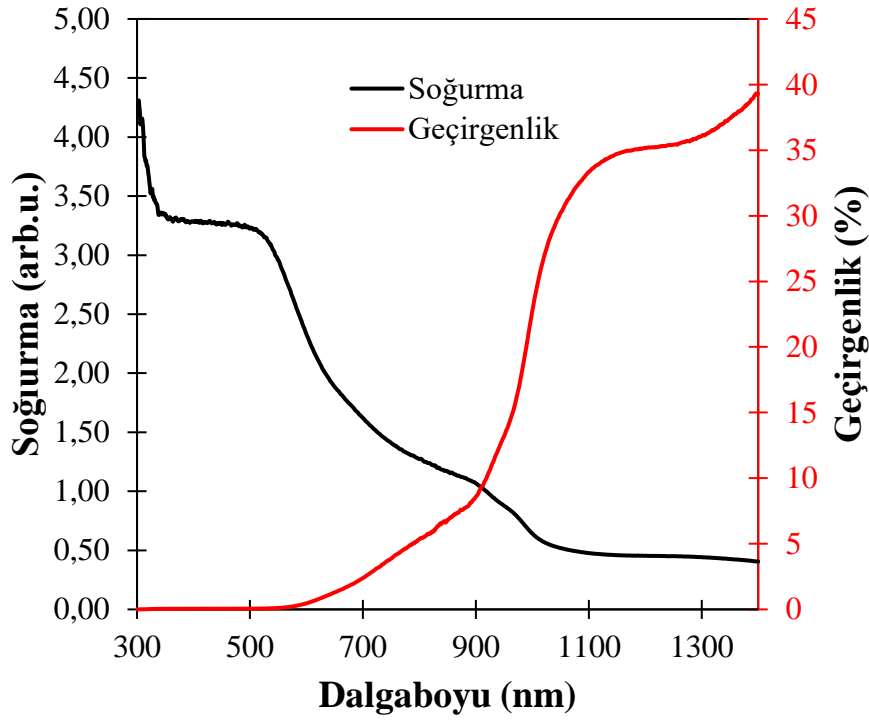
4.7’de verilmiştir. AFM görüntülerinde de görüldüğü üzere kristallerin bir araya gelerek oluşturdukları taneciklerin dağılımı hemen hemen homojendir. Ayrıca ince filmin yüzey pürüzlülüğü (RMS) yaklaşık olarak 116,8 nm olarak belirlenmiştir. Termal buharlaştırma yöntemi ile biriktirilen ince filmin yüzey pürüzlülüğünün yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7. Cam/CuS/ZnSe ince filmin 3 boyutlu AFM görüntüsü.

4.2. Optik Özellikler

Cam üzerine biriktirilen ZnSe ve CuS ince filmlerin optik soğurma ve geçirgenlik spektrumu UV-VIS spektrofotometresi (Shimadzu UV/VIS 2600) kullanılarak ölçülmüştür. Dalga boyuna karşı iki farklı malzemenin geçirgenlik ve soğurma spektrumları Şekil 4.8 ve Şekil 4.10’da verilmiştir.

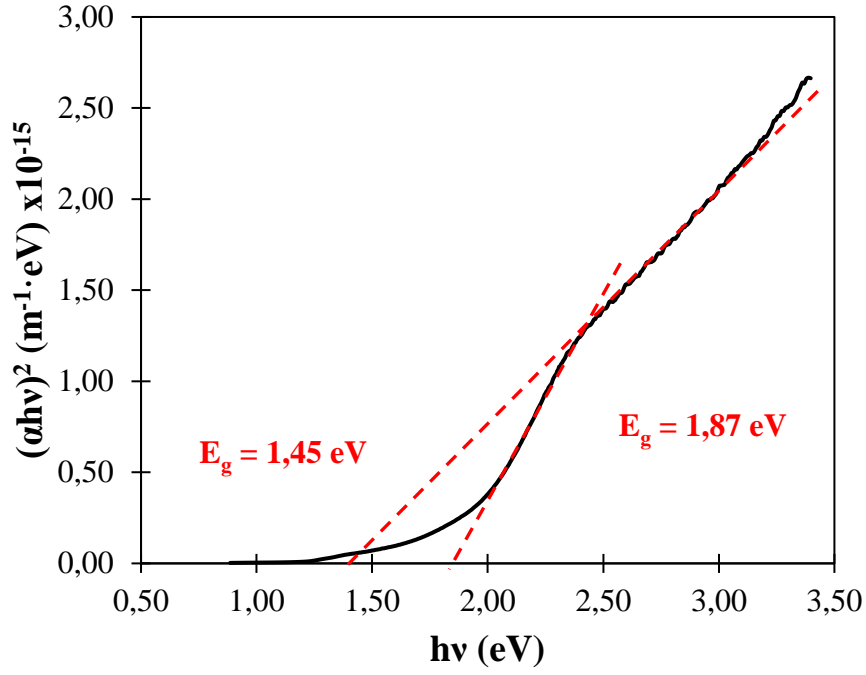


Şekil 4.8. CuS için optik soğurma ve geçirgenlik, dalgaboyu spektrumu.

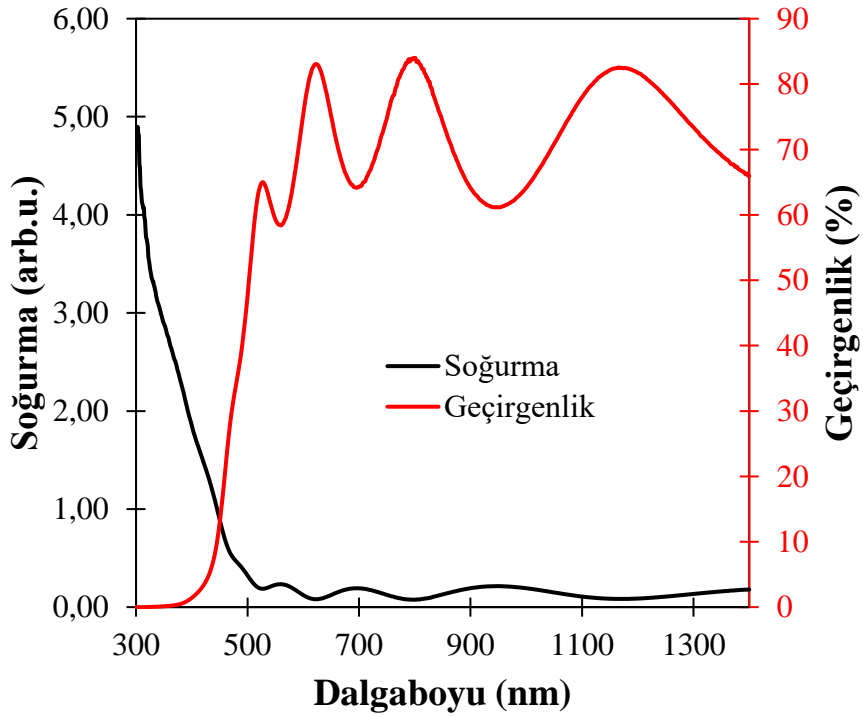
Yasak enerji aralığı E_g , Tauc denkleminde elde edilebilir. Tauc denkleminin denk. 4.4'te verilmektedir.

$$(\alpha hv) = B(hv - E_g)^a \quad (4.4)$$

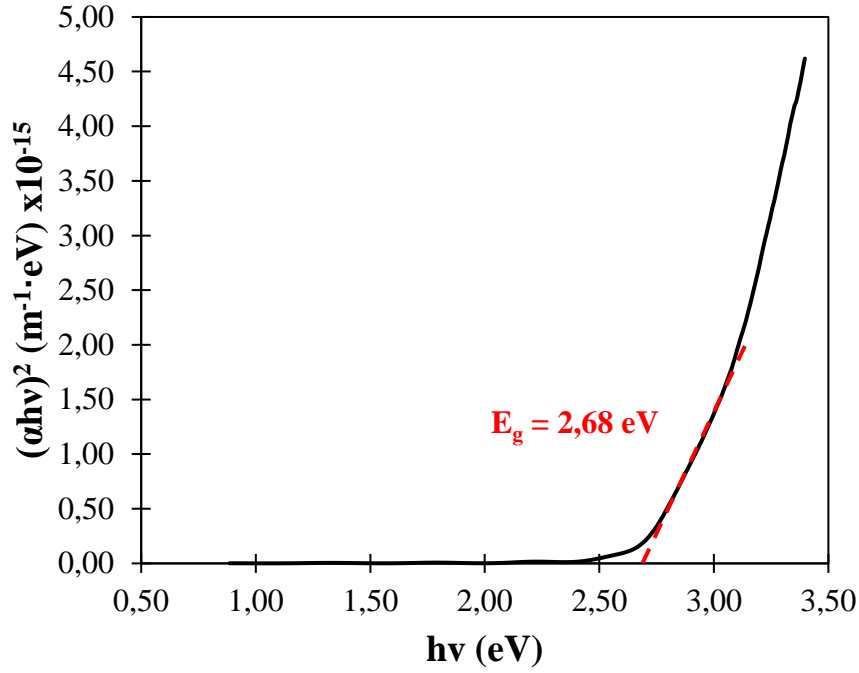
B enerji seviyeleri arasındaki geçiş olasılıklarını ifade eden bir sabit, α soğurma katsayısı, $h\nu$ foton enerjisi, E_g yasak enerji aralığı ve a değeri ise doğrudan ve dolaylı geçişleri tanımlamak için kullanılan bir sabittir. Doğrudan izinli geçişlerde $\frac{1}{2}$ dolaylı izinli geçişlerde ise 2 değerini almaktadır (Tauc, 1966, 1974). Şekil 4.9 ve Şekil 4.11'de üretilen ince filmlerin yasak enerji aralıkları Tauc denkleminde yararlanılarak çizilmiştir. Şekil 4.9'de CuS ince filmin yasak enerji aralığı $h\nu$ eksenine grafiğinin lineer kısmından başlayarak kestirilmesi ile yaklaşık 1,87 eV elde edilmiştir. CuS'un farklı yönelimlere sahip olduğu XRD piklerinde görülmektedir. Şekil 4.9'da iki farklı E_g değeri elde edilmesi bununla ilgilidir. Diğer yasak enerji aralığı yaklaşık 1,45 civarındadır.



Şekil 4.9. CuS için $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafiği.



Şekil 4.10. ZnSe için optik soğurma ve geçirgenlik, dalgaboyu spektrumu.



Şekil 4.11. ZnSe için $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafiği.

Benzer olarak Şekil 4.11’de ZnSe ince filmin yasak enerji aralığı $h\nu$ eksenine grafiğinin lineer kısmından başlayarak kestirilmesi ile yaklaşık 2,68 eV elde edilmiştir.

4.3. Elektriksel Özellikler

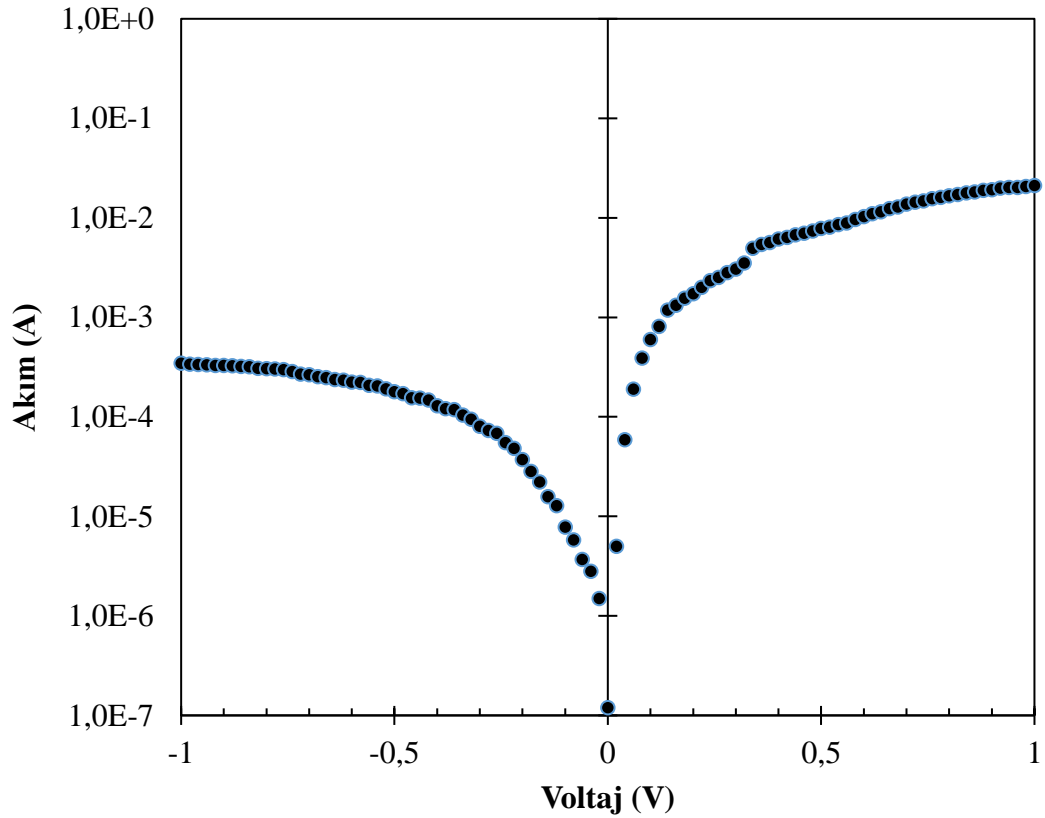
Hall etkisi ile filmin elektriksel özellikleri karakterize edilmiştir. $1 \times 1 \text{ cm}^2$ boyutunda kesilmiş cam üzerine biriktirilmiş numunelerin köşelerine çeyrek daire şeklinde kontaklar yapılarak Van der Pauw metodu (Lim 2009) ile Hall Etkisi ölçümleri 300 K sıcaklıkta 0,555 Tesla’lık bir mıknatıs kullanılarak yapılmıştır. Bu ölçüm sonucunda, CuS ince filmin iletkenlik tipi p ve taşıyıcı konsantrasyon yoğunluğu $2,55 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, ZnSe ince filmin ise iletkenlik tipi n ve taşıyıcı konsantrasyon yoğunluğu $1,46 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ bulunmuştur. Çizelge 4.3’te bileşiklerin Hall Etkisi ölçüm sonuçları listelenmiştir.

Çizelge 4.3. CuS ve ZnSe ince filmler için Hall Etkisi ölçüm sonuçları.

Bileşik	Taşıyıcı Konsantrasyonu (cm ⁻³)	Mobilite (cm ² /V.s)	Hall Katsayısı (cm ³ /C)	Özdirenc (Ω.cm)	Öziletkenlik (1/Ω.cm)	Yarı İletken Tipi
CuS	2,55×10 ¹⁷	5,71	2,51×10 ¹	4,52	1,92×10 ⁻¹	p
ZnSe	1,46×10 ¹³	5,67	4,27×10 ⁵	8,95×10 ⁴	1,23×10 ⁻⁶	n

ITO/ZnSe/CuS/Cu/Ag heteroeklem yapının karanlık ortamda I – V ölçümleri oda sıcaklığında (300K) Fytronix FY 7000 SourceMeter ve FY 7000 güneş simülatörü ile gerçekleştirilmiştir. Yarı-logaritmik akım – voltaj grafiği Şekil 4.10’da gösterilmiştir.

I – V eğrisinden yola çıkarak pn heteroeklemin tipik diyot karakteristiğine sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 4.12. ITO/CuS/ZnSe/Ag heteroeklemin karanlıkta yarı logaritmik I – V grafiği.

Heteroeklemin doğrultma oranı -1 ve +1 V aralığında 61,15 olarak hesaplanmıştır. Bu doğrultma değerine bakarak doğrultucu özelliğe sahip olduğu aynı zamanda I-V ölçüm verilerini doğruladığı söylenebilir.

Termiyonik emisyon teorisine göre heteroeklemden akım geçişi, uygulanan voltaja göre yazılabilir (Sze 1981).

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (4.5)$$

$qV \gg nkT$ olması durumunda 1 terimi, diğer terim yanında ihmal edilebilir. Yeni ifade ise;

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) \right] \quad (4.6)$$

Denklem 4.6'nın her iki tarafının logaritması alınıp daha sonra da V'ye göre türevi alınacak olursa;

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d(\ln(I))} \right) \quad (4.7)$$

İdealite faktörü ifadesi elde edilebilir. q elektron yükü, V uygulanan voltaj, k Boltzmann sabiti ve T 'de mutlak sıcaklıktır. Yarı logaritmik akım voltaj grafiğinin düz beslem bölgesindeki lineer kısmına doğrusal fit uygulanırsa, doğrunun eğiminden $dV/d(\ln I)$ bulunur. Bulunan değer denk.4.7'de yerine yazılarak idealite faktörü elde edilir. Doğrunun $V=0$ 'da düşey eksenini kestiği değer ise I_0 doyma akımı değerini verir. Denk.4.8 I_0 doyma akımını veren ifadedir (Asıl 2014).

$$I_0 = AA^*T^2 \exp \left[\frac{q\Phi_b}{kT} \right] \quad (4.8)$$

Denk 4.8'in her iki tarafın logaritması alınıp Φ_b 'ye göre yazacak olursak, bariyer yüksekliği ifadesi;

$$\Phi_b = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (4.9)$$

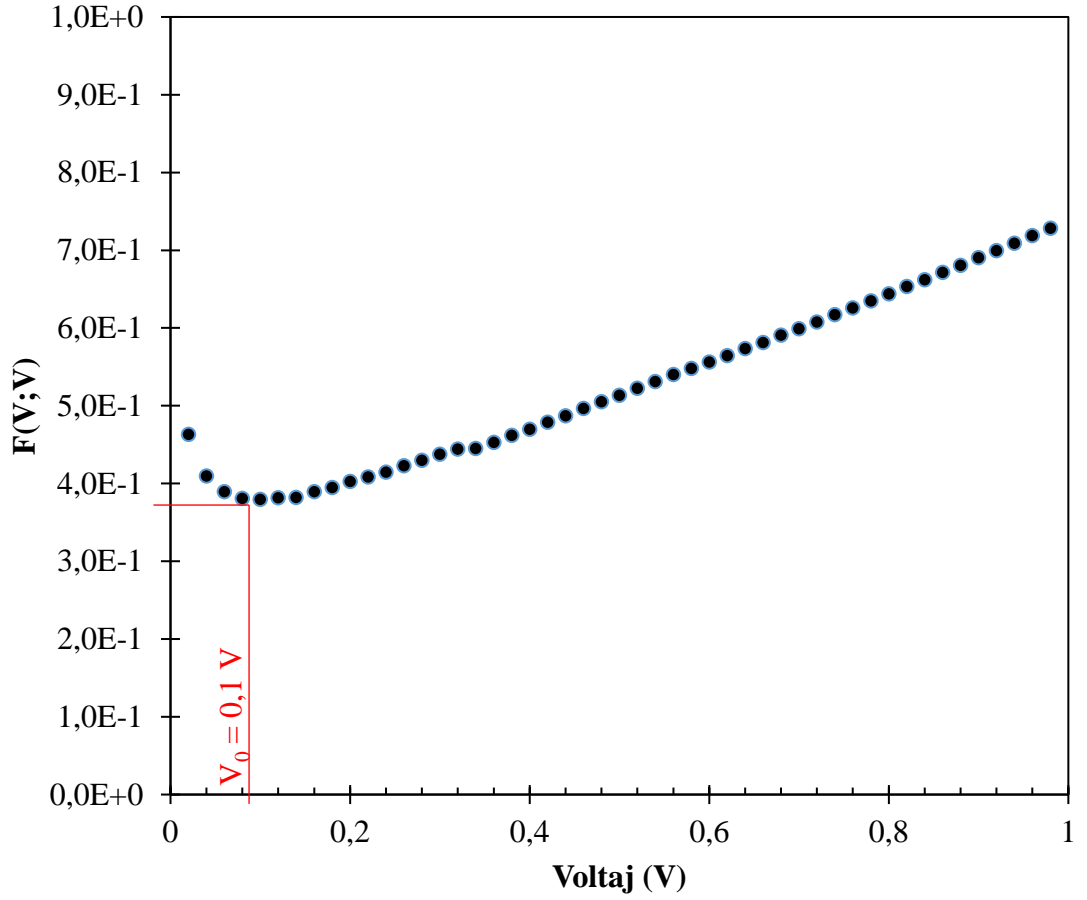
olarak elde edilir. A etkin diiyot alanı, A^* etkin Richardson sabiti, T mutlak sıcaklık ve k Boltzmann sabitidir.

Yarı logaritmik akım voltaj grafiğinden yaklaşık $1,40 \times 10^{-6}$ A elde edilen doyma akımı, A etkin diiyot alanı $1,96 \times 10^{-3} \text{cm}^2$, sıcaklık $T=300$ K ve ZnSe schottky diiyot için Etkin Richardson sabiti $A^*=120 \text{A cm}^2 \text{K}^2$ (Allen, ve ark. 1972) ve denklem 4.9 kullanılarak üretilen heteroeklemin bariyer yüksekliğı 0,61 eV olarak hesaplanmıştır.

İdealite faktörü n , birimsiz bir parametre ve diiyotun kalitesini belirlemektedir. İdeal bir diiyot için Termiyonik emisyon teoerisinin geçerli olduğı durumda bu değer 1 olmaktadır. 1 değerinden uzaklaşması diiyotu, ideal diiyot olmaktan çıkarmaktadır. Diiyotun idealite faktörü düz beslem tarafındaki değişimden hesaplanabilir. Üretilen yapının idealite faktörü 1,60 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.4. ITO/ZnSe/CuS/Ag heteroeklem diiyotun I – V incelemesi.

Yöntem	n	Φ_b (eV)	I_0 (A)	$R_s(\Omega)$	V_0	$FV_0(V)$
Termiyonik Emisyon T.	1,60	0,61	$1,40 \times 10^{-6}$	-	-	-
Norde Fonksiyonu	-	0,52	-	17,29	0,1	0,38



Şekil 4.13. ITO/CuS/ZnSe /Ag heteroeklemin I – V verilerinden elde edilmiş F(V;V)-V eğrisi

Heteroeklem yapının seri direnci nedeniyle yüksek gerilim değerlerinde Şekil 4.14'ün doğrusallıktan saptığı, bunun nedeninin ise seri dirençlerin ve yığın dirençlerinden kaynaklandığı (Bozkaplan ve ark. 2017) söylenebilir. Norde fonksiyonu F(V);

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

şeklinde ifade edilmektedir (Norde 1979). Modifiye Norde metodu ile R_s seri direnç ve Φ_b bariyer yüksekliğini veren ifadeler ise denklem 4.9 ve 4.10'da gösterilmiştir (Bohlin 1986).

$$\Phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (4.10)$$

$$R_s = \frac{kT(\gamma-n)}{ql_0} \quad (4.11)$$

Buradaki γ idealite faktöründen büyük olmak şartıyla bir sabittir. Denklem 4.10 ve 4.11 kullanılarak hesaplanan bariyer yüksekliği Φ_b ise 0,52 eV ve seri direnç değeri R_s 17,29 Ω olarak hesaplanmıştır.

5. SONUÇ

Termal buharlaştırma yöntemi ile üretilen CuS/ZnSe heteroeklem yapının üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Üretilen CuS/ZnSe eklem hem ITO hem de cam üzerine büyütülerek, ölçümler geniş çapta alınmış ve oldukça detaylı bir karakterizasyon yapılmıştır.

XRD sonuçları ile CuS/ZnSe ince filmlerin farklı yönelimlere sahip polikristallerden oluştuğu tespit edilmiştir. SEM analizi yapıların yüzey morfolojisinin homojen olduğu olduğu gözlenmiştir.

Cam üzerine büyütülen ZnSe ve CuS ince filmlerin optik soğurma spektrumunun ölçülmesi ile yasak bant aralıkları ZnSe, 2,68 eV elde edilmiş ve bu değer Al-Kuhaili ve ark. (2013) bulduğu değerle uyumludur. CuS için yasak bant aralığı 1,87 eV elde edilmiş ve bu değer de Ezema ve ark. (2006) çalışmalarında buldukları değerle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Hall Etkisi ölçümü ile ZnSe'nin n tipi ve $1,46 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ taşıyıcı yoğunluğuna ve CuS'un ise p tipi ve $2,55 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ taşıyıcı yoğunluğuna sahip olduğu görülmüştür. Heteroeklem yapının, karanlıkta akım – voltaj karakteristikleri incelendi. Bu inceleme sonucunda diyotun doğrultucu özelliğe sahip olduğu görüldü ve doğrultma faktörü 61,15 olarak hesaplandı. İdealite faktörü ve bariyer yüksekliği; 1,60 ve 0,61 eV olarak hesaplandı. Ayrıca, Norde metodu kullanılarak bariyer yüksekliği ve seri direnç değerleri hesaplandı. Bu hesaplamalara göre bariyer yüksekliği 0,52 eV ve seri direnç değeri ise $17,28 \Omega$ elde edilmiştir.

Son zamanlarda II – VI grubu yarıiletkenleri ile ilgili çalışmalar giderek artmaktadır. Bu çalışmada, sonuçlara bakılarak termal buharlaştırma yöntemi ile heteroeklem üretimi için uygun bir yöntem olduğu ve maliyet açısından da avantaj sağladığı söylenebilir.

KAYNAKLAR

Akaltun, Y. 2006. CdSe, ZnSe ve $CdxZn_{1-x}Se$ Yarıiletken İnce Filmlerinin SILAR Tekniği ile Büyütülmesi Yapısal, Optik ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi. *Doktora Tezi*, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Allen, J.W., Livingstone, A.W., Turvey, K. 1972. Electroluminescence in reverse-biased Zinc selenide schottky diodes. *Solid-State Electronics*, 47(3): 351-356.

Al-Kuhaili, M.F., Kayani A., Durrani S.M.A., Bakhtiari A., Haider M.B. 2013. Band Gap Engineering of Zinc Selenide Thin Films Through Alloying with Cadmium Telluride. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 5(11); 5366–5372.

Asıl, H. 2010 Geniş Bant Aralıklı ZnO'nun Elektrokimyasal Yöntemle Büyütülmesi, Karakterizasyonu ve Mümkün Elektronik Uygulamalarının Araştırılması, *Doktora Tezi*, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Bohlin, K.E. 1986. Generalized Norde Plot Including Determination of the Ideality Factor. *Journal of Applied Physics*, 60, 1223.

Bozkaplan, C., Tombak A., Genişel M.F., Ocak Y.S., Akkılıç K. 2017. The influence of substrate temperature on RF sputtered CdS thin films and CdS/p-Si heterojunctions. *Materials Science in Semiconductor Processing* 58(2): 34-38.

Dhanasekaran, V., Mahalingam, T., Rhee, J.P. 2013. Structural and optical properties of electrosynthesized ZnSe thin films. *Optics*. 124(3): 255-260.

Caferov, T. 1998. Yarıiletken Fiziği-1. Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, İstanbul. 200s.

Cullity, B.D. 1978. Elements of X-ray Diffraction, Addison-Wesley, Reading, MA, USA.

Erel, S. 1996. He-Cd lazer kaynağı kullanarak II-IV bileşenlerinden bulk ve koloidal haldeki bazı yarıiletken malzemelerin farklı sıcaklıklardaki fotoluminesans yayılımının incelenmesi. *Doktora Tezi* Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Ezema, F.I., Nnabuchi M.N., Osuji, R.U. 2006. Optical Properties of CuS Thin Films Deposited by Chemical Bath Deposition Technique and Their Applications. *Trends in Applied Sciences Research*. 1: 467-476.

Habiboğlu, C., Gümüş, C. 2018. Kimyasal Depolama Yöntemi ile Hazırlanan CuS Yarıiletken İnce Filmlerin Yapısal, Optik ve Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 35(7): 9-19.

Jiang, H., Che, J., LI Z., Yao, X. 2006. A reduction approach to prepare ZnSe nanocrystallites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16:419- 422.

Kalita, P.K., Sarma, B.K., Das, H.L. 2000. Structural characterization of vacuum evaporated ZnSe thin films. *Bull. Mater. Sci.*, 23(3): 313-317.

Kara, K. 2008. Atmalı Filtreli Katodik Vakum Ark Depolama Yöntemi ile p-tipi ZnO (Çinko Oksit) Üretimi ve Yapısal Özellikleri. *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Kaplan, H.K. 2017. ZnS/Si heteroeklem diyotların yapısal, elektriksel ve optik özelliklerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Lim, S. H.N., Mc Kenzie D.R., Bilek M.M.M. 2009. Van der Pauw method for measuring resistivity of a plane sample with distant boundaries. *Rev. Sci. Instrum.* 80, 075109.

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

Özkan, M. 2010. Termiyonik Vakum Ark (TVA) Tekniği ile II-VI Grubu Bazı Yarıiletken Bileşiklerin İnce Filmlerinin Üretilmesi ve Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi. *Doktora Tezi*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Riveros, G., Guillemoles, J.F., Lincot, D., Meier, H.G., Froment, M., Bernard, M.C., Cortes, R. 2002. Electrodeposition of Epitaxial ZnSe Films on InP and GaAs from an Aqueous Zinc Sulfate- Selenosulfate Solution, *Advanced Materials*, 14(18): 1286-1290.

Sahoo, A.K., Mohanta, P., Bhattacharyya, A.S. 2015. Structural and optical properties of CuS thin films deposited by Thermal co-evaporation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 73: 012123.

Sarı, H. 2009. Optoelektronik Ders Notları, TÜBA Açık Arşiv, Fizik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi Ankara Üniversitesi Tandoğan, Ankara.

Shin-ichiro, I., Kazushige, U., Hideo, H., Hamada, N. 2001. Electronic structure of the transparent p-type semiconductor (LaO)CuS. *Physical Review B*, 64: 245211.

Selek, T. 2015. Radyo Frekansı (RF) Sıçratma Yöntemi ile Çinko Selenayt (ZnSe) İnce Filmlerin Üretimi. *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

Sze, S.M. 2002. Semiconductor Devices: Physics and Technology 2nd ed. John Willey and Sons inc., New Jersey, USA, 28 pp.

Sze, S.M. 1981. Physics of Semiconductor Devices 2nd ed., John Willey and Sons inc., New Jersey, USA, 256 pp.

Taşdemirci, Ç.T. 2019. Effect of Different Thickness and Solution Concentration on Cus Thin Film Grown by SILAR Method. *Journal of Scientific Perspectives*, 3(3): 207-214.

Yacobi, B. G. 2003. Semiconductor materials: An Introduction to Basic Principles, Springer Science & Business Media, New York, USA, 117-120, 146-147 pp.

Yıldırım, E. 2013. ZnSe Yarıiletken İnce Filmlerinin Karakterizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Kürşat BOLAT
Doğum Yeri ve Tarihi : Buca – İzmir / 04.02.1990
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Fatma Saygın Lisesi 2007
Lisans : Bozok Üniv. Fen Edebiyat Fakültesi Fizik 2013
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniv. Fen Bilimleri Ens. Fizik ABD 2020

Çalıştığı Kurum/Kurumlar :

İletişim (e-posta) : bolatkursat@gmail.com

Yayımları :