



**ZnS/Si HETEROEKLEM DİYOTLARIN YAPISAL,
ELEKTRİKSEL VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Hüseyin Kaan KAPLAN



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ZnS/Si HETEROEKLEM DİYOTLARIN YAPISAL, ELEKTRİKSEL VE OPTİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Hüseyin Kaan KAPLAN

Doç. Dr. Sertan Kemal AKAY
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

BURSA – 2017
Her hakkı saklıdır.

TEZ ONAYI

Hüseyin Kaan KAPLAN tarafından hazırlanan “ZnS/Si HETEROEKLEM DİYOTLARIN YAPISAL, ELEKTRİKSEL VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Sertan Kemal AKAY

Başkan : Doç. Dr. Sertan Kemal AKAY
Uludağ Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı



Üye : Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU
Uludağ Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı



Üye : Prof. Dr. Suat PAT
Eskişehir Osmangazi Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı



Yukarıdaki sonucu onaylarım.



Prof. Dr. Ali BAYRAM
Enstitü Müdürü

12 / 06 / 2017

U.Ü. 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 yararlanılması 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.**

12 / 06 / 2017

Hüseyin Kaan KAPLAN



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ZnS/Si HETEROEKLEM DİYOTLARIN YAPISAL, ELEKTRİKSEL VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Hüseyin Kaan KAPLAN

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Sertan Kemal AKAY

Bu tez çalışmasında, termiyonik vakum ark yöntemi kullanılarak *p-tipi* Si alt-taş üzerine ZnS ince film biriktirilerek ZnS/p-Si heteroeklem diyot elde edildi. ZnS ince filmin kristal yapısını ve yüzey morfolojisini belirlemek için X-ışınları kırınımı (XRD) ve Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanıldı. XRD sonuçları, ZnS ince filmin çinko-blend kristal yapıya sahip olduğunu göstermektedir. AFM sonuçlarından, ZnS ince filmin 2,64 nm yüzey pürüzlülük değeri ile oldukça düzgün bir yüzey morfolojisine sahip olduğunu görülmektedir. Filmin optik karakterizasyonu için optik soğurma ve geçirgenlik spektrumları bir cam alt-taş üzerine biriktirilen ZnS ince filmde ölçülmüştür. ZnS ince filmin yasak bant genişliği optik soğurma spektrumundan 3,78 eV olarak hesaplanmıştır. Filmin elektriksel iletkenlik tipi ve yük taşıyıcı yoğunluğu Hall Etkisi ölçümüyle *n-tipi* ve $3,1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ olarak ölçüldü. Oda sıcaklığı akım – voltaj ölçümleri karanlık ve ışık altı şartlarında gerçekleştirildi. Işık altında yapılan I-V ölçümlerinden ZnS/p-Si heteroeklem diyotun ışığa duyarlı olduğu görülmektedir. Karanlık I-V ölçümlerinden ZnS/p-Si heteroeklem diyotun mükemmel bir doğrultucu özellik gösterdiği görüldü. Ek olarak, idealite faktörü, bariyer yüksekliği ve seri direnç değerleri karanlık ve ışık altındaki I-V ölçümlerinden sırasıyla, 2,72, 0,72 eV, 3,2 k Ω ve 2,37, 0,68 eV, 2,6 k Ω olarak hesaplandı. Ayrıca, oda sıcaklığı kapasitans – voltaj ölçümleri de ZnS ile p-Si arasındaki eklem ara yüzeyi hakkında ek bilgi edinmek, bariyer yüksekliği ve yük taşıyıcı yoğunluğunu belirlemek için farklı frekanslarda gerçekleştirildi. 1,5 MHz’de yapılan ölçümden hesaplanan bariyer yüksekliği değeri 0,82 olarak belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Termiyonik vakum ark, ZnS, p-Si, heteroeklem, diyot, ince film.

ABSTRACT

MSc Thesis

THE INVESTIGATION OF STRUCTURAL, ELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF THE ZnS/Si HETEROJUNCTION DIODES

Hüseyin Kaan KAPLAN

Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physic

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sertan Kemal AKAY

In this thesis, ZnS/p-Si heterojunction diode was produced by depositing ZnS thin film on the *p-type* Si wafer using Thermionic Vacuum Arc method (TVA). To determine the crystal structure and the surface morphology of the ZnS thin film X-ray diffraction (XRD) and Atomic force microscope (AFM) have been used. XRD results showed that the ZnS thin film has zincblende crystalline structure. AFM analysis results showed that the film has a smooth surface morphology with 2,64 nm average surface roughness. For optical characterization of the film, optical absorption and transmission spectra were measured from the ZnS thin film deposited on a glass substrate. The band gap of the ZnS thin film was calculated to be 3,78 eV from the optical absorption spectra. The electrical conduction type and the charge carrier concentration were measured as *n-type* and $3,1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ by Hall Effect measurements. Room temperature current - voltage measurements were applied under conditions of illumination and dark. Under illumination I-V measurements showed that the ZnS/p-Si heterojunction diode is light sensitive. And the dark I-V measurements showed that the ZnS/p-Si heterojunction diode has an excellent rectification behavior. In addition, the ideality factor, barrier height and series resistance values were calculated from dark and illuminated I-V measurements as, 2,72, 0,72 eV, 3,2 k Ω and 2,37, 0,68 eV, 2,6 k Ω , respectively. Room temperature capacitance – voltage measurement were also performed in different frequencies to obtain additional information about the junction interface between the ZnS thin film and *p-Si* wafer, and to calculate the barrier height and charge carrier concentration. The barrier height value which calculated from the measurement at 1,5 MHz is 0,82 eV.

Key Words: Thermionic vacuum arc, ZnS, p-Si, heterojunction, diode, thin film.

TEŞEKKÜRLER

Çıktığım bu yolda, en başından geldiğim bu güne kadar bana yol gösteren, her türlü desteğini eksik etmeyen, bilgisini her zaman paylaşan ve çalışmalarda beni hep teşvik ve motive eden, ayrıca karakteri ile bana her zaman örnek olan çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Sertan Kemal AKAY'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Değerli bilgi birikimiyle yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU'na çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım için, tüm imkânlarıyla birlikte laboratuvarının kapılarını bana ardına kadar açan, bilgisi, deneyimleri ve tavsiyeleriyle çok büyük yardımları dokunan Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fizik Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Suat PAT'a ve öğrencilerine çok teşekkür ederim.

Deneysel ölçümler için laboratuvarlarını kullanmamı sağlayan, çok değerli bilgilerini esirgemeyen Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Mehmet PARLAK'a da ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımız sırasında iyi bir yol arkadaşı olan arkadaşım Serhat SARSICI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olan, hiçbir yardımı esirgemeyen canım arkadaşım Betül OĞUR'a da sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ve hayatım boyunca hep arkamda olan, hiçbir zaman maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, tüm öğrenim hayatım boyunca bana inanan ve baş koyduğum yolda beni asla yalnız bırakmayan canım annem Raziye, canım babam Musa ve biricik ablam Aslıhan'a da tüm kalbimle teşekkür ederim.

Hüseyin Kaan KAPLAN
12/06/2017

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜRLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	4
2.1. Yarıiletkenler	4
2.1.1. N-tipi ve P-tipi Yarıiletkenler.....	6
2.1.2. Enerji Bant Modeli	8
2.1.3. II-VI Grubu Yarıiletkenler.....	10
2.2. P-N Eklemi.....	11
2.3. Heteroeklem Diyotlar.....	15
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	18
3.1. Materyal	18
3.1.1. Silisyum (Si)	18
3.1.2. Çinko Sülfür (ZnS)	18
3.1.3. Alüminyum (Al)	19
3.2. Yöntem.....	19
3.2.1. Termiyonik Vakum Ark	19
3.2.2. Termal Buharlaştırma	21
3.3. Deneysel Çalışmalar	23
3.3.1. Al/ZnS/p-Si/Al Heteroeklem Diyotun Üretimi	23
3.3.2. Ölçüm ve Analizler.....	25
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	30
4.1. Yapısal ve Morfolojik Özellikler	30
4.2. Optik Özellikler	32
4.3. Elektriksel Özellikler	35
5. SONUÇ	43
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ	47

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
V_o	Açık devre voltajı
I	Akım şiddeti
N_A	Akseptör katkı yoğunluğu
Al	Alüminyum
s	Alt-taş kırılma indisi
Å	Angström
Sb	Antimon
Cu	Bakır
ϕ_b	Bariyer yüksekliği
k	Boltzmann sabiti
m_h^*	Boşluk (hole) etkin kütlesi
Zn	Çinko
ZnS	Çinko Sülfür
λ	Dalga boyu
$n(\lambda)$	Dalga boyuna karşılık kırılma indisi
$T(\lambda)$	Dalga boyuna karşılık optik geçirgenlik
n	Diyot idealite faktörü
C	Diyot eklem kapasitansı
V_{bi}	Diyot Yapı Potansiyeli
N_D	Donor katkı yoğunluğu
I_o	Doyma akımı
m_e^*	Elektron etkin kütlesi
eV	Eletronvolt
q	Elektron yükü
A	Etkin diyot alanı
ν	Fotonun frekansı
Cd	Kadmiyum
kV	Kilovolt
I_{sc}	Kısa devre akımı
D	Kristal tane boyutu
Cr	Krom
S	Kükürt
μm	Mikrometre
mV	Milivolt
Mo	Molibden
T	Mutlak sıcaklık
nm	Nanometre
α	Optik soğurma katsayısı
O	Oksijen
h	Planck sabiti
A^*	Richardson sabiti
Se	Selenyum
R_s	Seri direnç

T	Sıcaklık
V_{d0}	Sıfır besleme difüzyon potansiyeli
Si	Silisyum
Ta	Tantal
Te	Tellür
W	Tungsten
V	Besleme voltajı
β	Yarı Maksimum Tam Genişliği
ϵ_{s2}	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
E_g	Yasak bant genişliği

Kısaltmalar

Açıklama

I-V	Akım – Voltaj
AC	Alternatif Akım
SILAR	Ardışık İyonik Katman Adsorpsiyonu ve Reaksiyonu
PLD	Darbeli Lazer Biriktirme
DI	De-iyonize
DC	Doğru Akım
FTO	Florin Kalay Oksit
HF	Hidrojen Flüorür
LDR	Işık Bağımlı Direnç
LED	Işık Yayan Diyot
2B	İki boyutlu
C-V	Kapasitans – Voltaj
MBE	Molekül Demeti Epitaksisi
NPA	Nano Gözenekli Sütun Yapı
<i>nc-</i>	Nano-kristal
RF	Radyo Frekans
TVA	Termiyonik Vakum Ark
TB	Termal Buharlaştırma
3B	Üç boyutlu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Silisyum kristal yapısının 2 boyutlu temsili gösterimi ve bağ elektronları.....	4
Şekil 2.2.	$T \neq 0 K$ olduğu durumlarda a) bir bağ elektronu serbest kalarak hareketli hale geçer ve geride bir boşluk (hole) bırakır, b) bu boşluk (hole) da yer değiştirebilir ve serbest bir elektron gibi elektrik akımı taşıyabilir.....	5
Şekil 2.3.	Si kristali içerisine eklenen P atomunun bağ yapmayan 5. elektronunun; a) $T = 0 K$ ve b) $T = 300 K$ 'deki durumu.....	6
Şekil 2.4.	Si kristali içerisine eklenen B atomunun elektron boşluğunun; a) $T = 0 K$ ve b) $T = 300 K$ 'deki durumu.....	7
Şekil 2.5.	Tek bir izole Si atomunun enerji seviyelerinin şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.6.	N tane Si atomunun bir araya gelerek Si kristalini oluşturmasıyla enerji bandı oluşumunun şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.7.	Saf, n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin bant yapılarının şematik gösterimleri.	10
Şekil 2.8.	Bir p-n eklem oluşturmak bir p-tipi yarıiletkene donör iyonları katkılanarak yapılabilir.....	11
Şekil 2.9.	a) Eklem oluşturulmadan önce p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerin enerji bant yapısı, b) p-n eklem oluştuktan sonra ki enerji bant diyagramı ve fakirleşmiş bölge.....	13
Şekil 2.10.	a) Denge, b) ileri beslenmiş, c) ters beslenmiş p-n eklem şematik gösterimi.....	14
Şekil 2.11.	p-n heteroeklemin bant yapısının eklem oluşmadan önceki (üstte) ve eklem oluştuktan sonra (altta) termal denge halindeki şematik gösterimi.	16
Şekil 3.1.	Termiyonik Vakum Ark sisteminin kısımları ve şematik gösterimi.....	20
Şekil 3.2.	ZnS ince filmin üretildiği TVA sisteminin bir görüntüsü.....	20
Şekil 3.3.	Ohmik kontakların kaplandığı "Nanovak NVTS-400" termal buharlaştırma istemi.....	22
Şekil 3.4.	Maskelme ve HF asit çözeltisi ile aşındırma işlemi.....	23
Şekil 3.5.	TVA'nın alt-taş tutucusuna yerleştirilmiş Si alt-taşlar.....	24
Şekil 3.6.	Üretilen Al/ZnS/p-Si/Al heteroeklem diyotun yapısının şematik gösterimi.....	25
Şekil 3.7.	FilMetrics F20 ince film kalınlık ölçüm sistemi görüntüsü.....	26
Şekil 3.8.	UNICO SQ4802 UV/VIS Spektrofotometre sistemi görüntüsü.....	26
Şekil 3.9.	Bruker D8 Advance X-Işınları kırınımı cihazı.....	27
Şekil 3.10.	Al/ZnS/p-Si/Al heteroeklem diyotun I-V ölçümü yapılan sistem (Keithley 2440 5A SourceMeter ve Newport Oriel 1000 W güneş hücresi simülatörü).....	27
Şekil 3.11.	Al/ZnS/p-Si/Al heteroeklem diyotun C – V ölçümü yapılan sistem (Hewlett Packard 4192A LF model impedance analyzer).....	28
Şekil 3.12.	C – V ölçümlerinde Al/ZnS/p-Si/Al heteroeklem diyotun prop ile sisteme bağlanması.....	28

Şekil 3.13. Üretilen Al/ZnS/p-Si/Al heteroeklem diyotun AC sinyal doğrultucu özelliği de sinyal jeneratör ve osiloskop kullanılarak gözlenmesi.....	29
Şekil 4.1. Si alt-taş üzerine biriktirilmiş ZnS ince filmin X-ışını kırınım Spektrumu.....	30
Şekil 4.2. Si alt-taş üzerine biriktirilmiş ZnS ince filmin 2B AFM görüntüsü.....	31
Şekil 4.3. Si alt-taş üzerine biriktirilmiş ZnS ince filmin 3B AFM görüntüsü.....	32
Şekil 4.4. Cam üzerine biriktirilen ZnS ince filmin; a) yüzde optik geçirgenlik – dalga boyu spektrumu ve b) optik soğurma – dalga boyu spektrumu ve $(\alpha hv)^2 - hv$ grafiği.....	33
Şekil 4.5. Kırılma indisinin foton dalga boyuna bağlı değişimi.....	34
Şekil 4.6. Al/ZnS/p-Si/Al heteroeklem diyotun karanlık ve ışık altındaki yarı-logaritmik I-V grafiği.....	35
Şekil 4.7. Oda sıcaklığında Al/ZnS/p-Si/Al heteroeklem diyotun deneysel $dV/d(\ln I) - I$ eğrisi.....	37
Şekil 4.8. Oda sıcaklığında Al/ZnS/p-Si/Al heteroeklem diyotun deneysel $H(I) - I$ eğrisi.....	38
Şekil 4.9. Al/ZnS/p-Si/Al heteroeklem diyotun oda sıcaklığındaki C-V karakteristiği.....	40
Şekil 4.10. Oda sıcaklığında farklı frekanslar için Al/ZnS/p-Si/Al heteroeklem diyotun $A^2/C^2 - V$ karakteristiği.....	41

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Termiyonik vakum ark sisteminin kısımları.....	19
Çizelge 4.1. Swanepoel ile hesaplanan kırılma indisleri ve FilMetrics ile ölçülen değerlerin karşılaştırılması.....	34
Çizelge 4.2. TVA ile üretilmiş olan Al/ZnS/p-Si/Al heteroeklem diyotun I-V incelemesi sonuçları.....	39
Çizelge 4.3. Literatürdeki ZnS/p-Si heteroeklem diyot üzerine yapılmış I-V incelemesi sonuçları.....	39
Çizelge 4.4. C-V ölçüm sonuçlarından elde edilen ve türetilen değerler.....	42



1. GİRİŞ

Yüzyıllar boyunca fizik biliminin gelişimi ve ilerlemesi, kendinin olduğu kadar beraberinde diğer bilim dallarının da doğrudan veya dolaylı olarak ilerlemesinin yolunu açacak buluşlara ortam ve gerekli bilimsel alt yapıyı hazırlamıştır. 20. yüzyıl başlarında kuantum mekaniği olarak bildiğimiz fizik alanın doğması sayesinde atomların ve atom altı parçacıkların davranışlarının açıklanması ve anlaşılmaya başlanması sayesinde ileri malzeme bilimleri gelişmeye başlamış ve bu sayede günümüz teknolojisinin ve elektroniğin en önemli parçası olan yarıiletken malzemeler keşfedilmiştir. Yarıiletkenlerin keşfi ile diyotlar ve transistörler gibi yarıiletken devre elemanları geliştirilmiş ve bugünkü yaşantımızın neredeyse her alanında bulunan bilgisayarların temelleri atılmıştır. Yani geçtiğimiz yüzyılın başlarından bu yana olan teknolojik gelişmeler, temelde yarıiletken malzemelerin keşfi, geliştirilmesi ve yeni yarıiletken cihaz ve devre elemanlarının üretilmesiyle doğrudan ilişkilidir.

Teknolojinin gelişmesi ve sanayileşme, beraberinde artan kentleşmeyi de getirmiş ve bunun bir sonucu olarak insanoğlu enerjiye bağımlı bir hale gelmiştir. Bu enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşılamak için fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Fosil yakıtların kullanılması sonucu atmosfere salınan sera gazlarından kaynaklı olan küresel ısınma ve iklim değişikliğinin, dünyamızda hayatın sürdürülebilirliğini tehdit ettiği şu dönemde, öncelikle yarıiletken temelli olan fotovoltaik güneş pilleri gibi temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç duymaktayız. Temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının yanı sıra enerji tüketimi konusunda da daha verimli cihazların geliştirilmesi, kullanılması da oldukça elzemdir. Aydınlatma konusunda kullanımı giderek artmakta olan yarıiletken LED lambalar da geleneksel aydınlatma araçlarına kıyasla oldukça yüksek enerji verimliliğine sahiptir. Tüm bunların yanında, hayatımızın artık hem her alanında ve hem de neredeyse her anında kullandığımız elektronik cihazlar (örn. cep telefonu, bilgisayar, televizyon...) içerisindeki devre elemanlarının %80'inden fazlası yani, algılayıcılar, diyotlar, transistörler, bilgisayar işlemcileri, bilgisayar bellekleri ve LED ekranlar da yarıiletken temelli bileşenlerdir. Yani, yarıiletken cihazlar ve devre elemanları, hepimizin hayatında doğrudan veya dolaylı olarak büyük yer ve öneme sahiptir.

Bu yarıiletken malzemeler, kullanım amacı ve kullanım alanlarına uygun bazı özellikler gerektirebilmektedir. Örneğin güneş pili, foto-detektör, LED ve LDR gibi ışık yayan ve algılayan cihazların yapımında optoelektronik uygulamalara daha uygun yarıiletken malzemeler kullanılmakta ve bu amaca uygun yeni yarıiletken malzemeler geliştirilmektedir.

Çinko Sülfür, farklı birçok optoelektronik cihaz uygulamasında kullanıma elverişli optik özellikler taşıyan bir yarıiletken malzemedir. Günümüze kadar, ZnS üzerine çeşitli üretim teknikleri kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Tapan ve Ahmetoglu (2003) yüksek enerji fiziği deneylerinde kullanılmaya uygun bir ZnS/*p*-Si heteroeklem fotodiyot tasarlamışlardır. Tasarladıkları heteroeklem fotodiyot için sinyal üretim sürecini Fortran ile yazdıkları Monte Carlo simülasyon koduyla canlandırmışlardır. Xu ve Li (2009) Si-NPA üzerine heterojen bir reaksiyon işlemi ile *nano-kristal* çinko sülfür (*nc-ZnS*) büyütmüş ve oluşturdukları ZnS/Si-NPA heteroeklemin yapısını ve foto-lüminesans özelliklerini incelemişlerdir. Foto-lüminesans çalışmalarından, bu yapının beyaz ışık yayıcı bir cihaz yapımına uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Ateş ve ark. (2011) SILAR metodu ile *n-tipi* Si üzerine ZnS ince film büyütürük bir Zn/ZnS/*n*-Si/Au:Sb çok katmanlı yapı oluşturmuş ve yapısal, optik ve elektriksel incelemeler sonucunda bu metodun ZnS ince filmlerin üretimine uygun olduğu sonucuna varmışlardır. Huang ve ark. (2011) bir *n-ZnS/p*-Si heteroeklem cihazı radyo-frekans magnetron saçtırma yöntemi ile üretmiş ve bazı elektriksel ve optik özelliklerini incelenmişler; farklı dalga boylarındaki ışımalar altında yaptıkları I-V ölçümlerinden *n-ZnS/p*-Si heteroeklem diyotun hem görünür hem de UV ışığı algılama potansiyeli olduğunu ortaya koymuşlardır. Hwang ve ark. (2012) tarafından, RF magnetron saçtırma tekniği ile sıcaklığı 100 °C'den 400 °C'ye kadar değişen cam alt-taşlar üzerine ZnS ince filmler büyütmüşlerdir. Ürettikleri ZnS ince filmin optik ve yapısal çalışmalarından, ZnS'nin Cu(In, Ga)Se₂ güneş hücreleri için CdS yerine tampon tabaka olarak kullanılmaya uygun olduğunu bildirmişlerdir. Turgut ve ark. (2013) sol-gel spin kaplama yöntemi kullanarak Al/ZnS/*p*-Si/Al heteroeklem diyot üretmişler ve ürettikleri diyotun yapısal, optik ve elektrik özelliklerini incelemişlerdir. Hsiao ve ark. (2013) kimyasal banyo biriktirme yöntemi kullanarak ZnS/*p*-Si heteroeklem güneş hücresi üretmişler ve ürettikleri güneş hücresinin verimini %2,72 olarak bildirmişlerdir. Wang ve ark. (2014) gözenekli Si üzerine PLD (darbeli lazer

biriktirme) yöntemi ile ZnS filmeler biriktirerek ZnS/gözenekli Si yapıyı oluşturmuşlar. Araştırmacılar, yapının fotoluminesans incelemesinde ZnS/gözenekli Si yapıdan beyaz ışık yayan cihaz üretmenin mümkün olabileceğini bildirmişlerdir. Nematollahi ve ark. (2015) MBE ve PLD teknikleri ile orta bant güneş hücreleri için Cr katkılı ZnS (ZnS:Cr) ince filmeler üretmişler ve filmlerin yapısal ve optik özelliklerini incelemişlerdir. Sprey tekniği ile üretilmiş olan ZnS ince filmin yapısal, morfolojik ve optik incelemesi yanı sıra, ZnS/*p*-Si heteroeklem diyotun da cihaz performansını inceleyen Bouglia ve ark. (2015), heteroeklem cihazın foto-tepki özelliği olduğunu ancak fotovoltaiik özelliklerinin zayıf ve geliştirilmesi gerektiğini bildirmiştir. Çeşitli optoelektronik cihaz uygulamaları için Madugu ve ark. (2016), iki elektrotlu elektrodepozisyon sistemi ile cam/FTO alttaşlar üzerine hem *n-tipi* hem de *p-tipi* elektriksel iletkenliğe sahip ZnS ince film üretmiştir. Ürettikleri filmlere ısı işlem uygulamışlar ve ısı işlemin filmlerin yapısı, morfolojisi ve elektrik özelliklerine etkilerini incelemiş ve sonuçlarını bildirmişlerdir. Xu ve ark. (2016) da kimyasal banyo biriktirme yöntemi kullanarak optik bölgede yüksek geçirgenliğe sahip, *p-tipi* nano-kristal (CuS)_x:(ZnS)_{1-x} iletken ince film üretmişlerdir. Bu yöntem ile elde ettikleri *p*-(CuS)_x:(ZnS)_{1-x}/*n*-Si heteroeklem güneş hücresinin 1 güneşlik ışığa altındaki açık devre gerilimini de 535 mV olarak bildirmişlerdir. Güneş hücresi uygulamaları için çok katmanlı anti-reflektif ZnS ince filmler Salih ve ark. (2017) tarafından termal buharlaştırma metodu ile üretilmiştir.

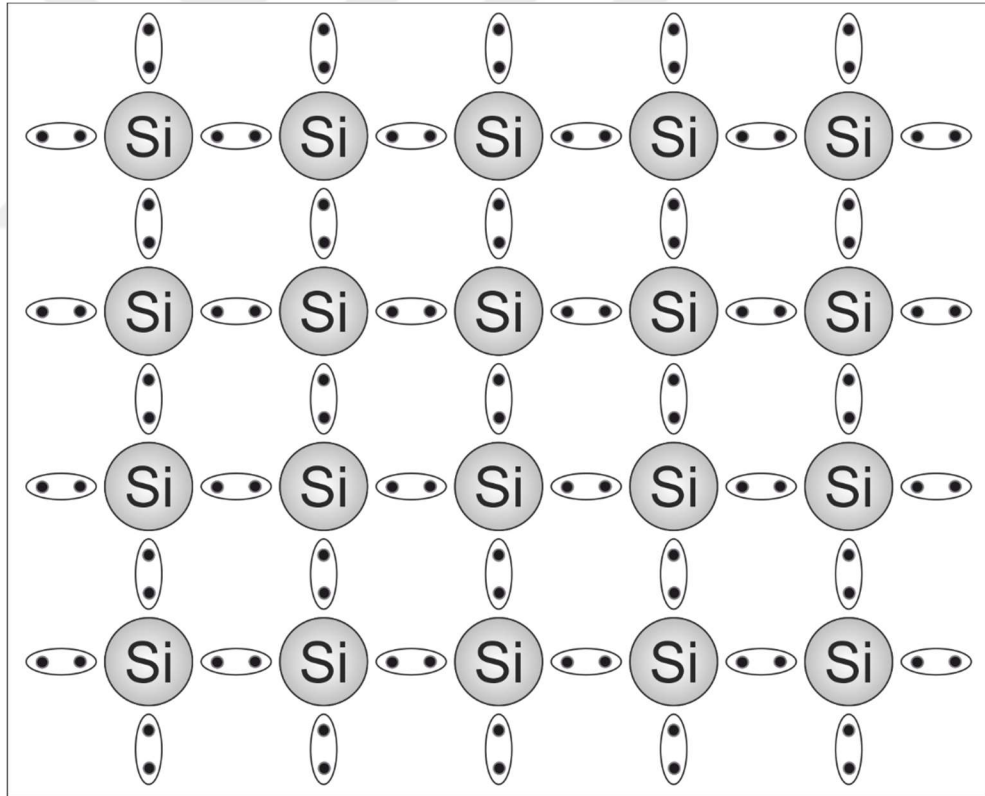
Yukarıda özetlenen çalışmalarda ZnS ince filmler, bazı fiziksel ve kimyasal biriktirme yöntemleri kullanılarak üretilmiştir. Ancak bu yöntemlerin pahalı olma, uzun üretim süreci gerektirme, homojenliğin sağlanamaması, düşük vakum koşullarına bağlı safsızlık artışı, alt-taş ısıtma zorunluluğu ve düşük film dayanıklılığı gibi sınırlılık ve zorlukları vardır.

Bu tez çalışmasında, ZnS/Si heteroeklem diyotu üretmek için termiyonik vakum ark (TVA) metodu ilk defa kullanılmıştır. Üretilen yapının yapısal, elektriksel ve optik özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. Bu yöntemin seçilmesinin nedeni ise kısa üretim süreci, yüksek vakum koşulu, yüksek biriktirme hızı, yüksek tutunma ve çok düşük yüzey pürüzlülüğü gibi avantajlar sunmasıdır (Özen 2015).

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Yarıiletkenler

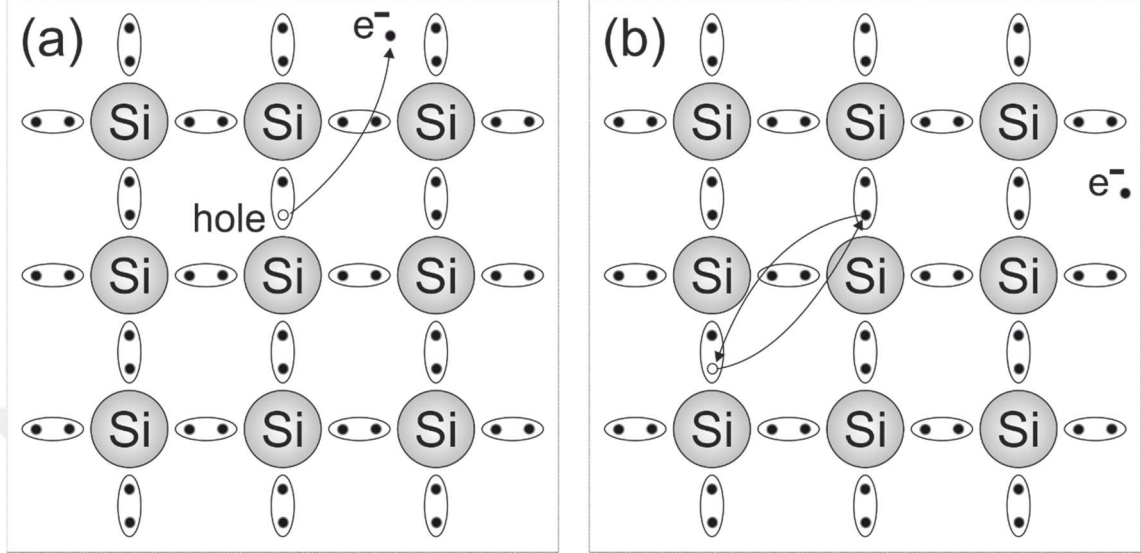
Bir silisyum kristalinde her bir silisyum atomu Şekil 2.1’de görüldüğü gibi dört diğer silisyum atomu ile çevrenmiştir. Her bir silisyum atomu bu dört komşu silisyum atomuyla valans elektronlarını paylaşarak kovalent bağ oluşturmaktadır ve bu şekilde görüldüğüne göre hiçbir serbest elektron bulunmamaktadır. Ancak bu durum sadece sıcaklık 0 K olduğu zaman geçerlidir. Sıcaklık 0 K’in üzerinde olduğu zaman termal enerjiden (kT) dolayı bağ elektronlarının küçük bir kısmı yeterli enerjiyi alarak bağı kopartır ve kristal içerisinde serbest bir şekilde hareket etmeye başlar (Şekil 2.2.a), yani elektrik akımı taşıyabilir (Hu 2010).



Şekil 2.1. Silisyum kristal yapısının 2 boyutlu temsili gösterimi ve bağ elektronları.

Aynı zamanda elektronun bağı koparıp atomdan ayrılmasıyla geride bir de boşluk (hole) kalır (Şekil 2.2.a). Ancak bu boşluk da yer değiştirebilir yani hareketlidir (Şekil 2.2.b) ve

hareketli olmasından dolayı elektrik akımı taşıyabilir. Fakat akım taşırken hareket yönü elektronların hareket yönü ile zıttır. Bu yüzden bir pozitif yük taşıyıcı olarak adlandırılır.

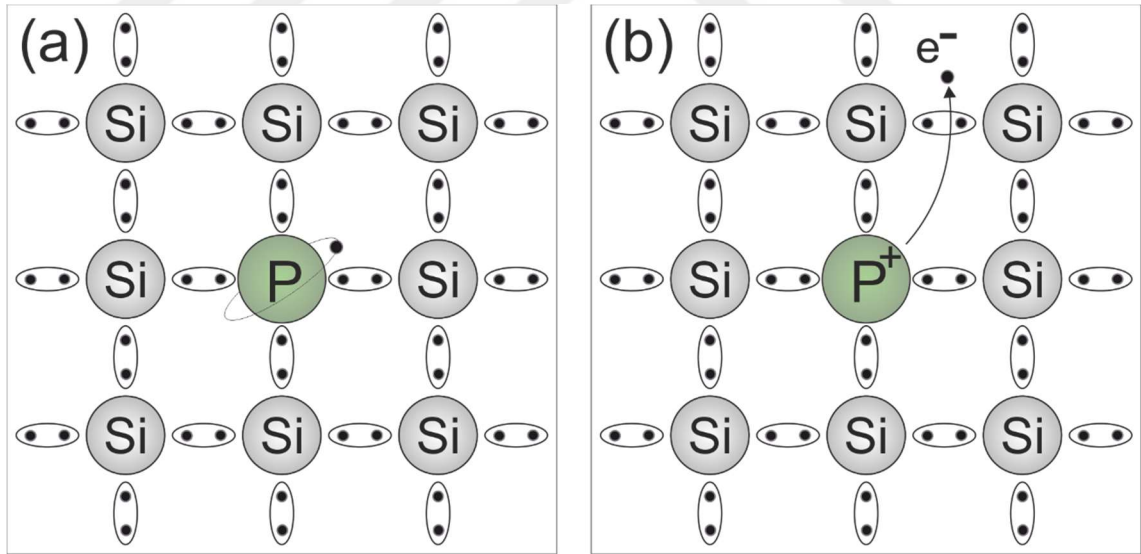


Şekil 2.2. $T \neq 0$ K olduğu durumlarda **a)** bir bağ elektronu serbest kalarak hareketli hale geçer ve geride bir boşluk (hole) bırakır, **b)** bu boşluk (hole) da yer değiştirebilir ve serbest bir elektron gibi elektrik akımı taşıyabilir.

Saf bir yarıiletken, yeterli enerjiyi alarak iletkenlik durumuna geçen her bir elektrona karşılık bir de pozitif yük taşıyıcı olan boşluk oluşur ve bunlar *elektron – boşluk (hole)* çifti olarak adlandırılır. Yarıiletkenlerdeki elektrik akım iletimi, metallerdekinden farklı olarak sadece elektron yerine elektrik alanında birbirine zıt yönde hareket eden elektron – boşluk çiftleri ile sağlanır. Ancak oda sıcaklığında ($T=300$ K) saf bir yarıiletkendeki serbest elektron – boşluk çifti sayısı, bir metaldeki serbest elektron sayısına göre çok küçüktür. Bunun nedeni oda sıcaklığında termal enerjinin (26 meV), elektronun serbest hale geçmesi için gereken enerjiden (Si için 1,12 eV) çok küçük olmasıdır. Bu düşük yük taşıyıcı yoğunluğundan dolayı yarıiletkenlerin iletkenlikleri de oldukça düşüktür. Çoğu cihaz uygulaması için de bu denli düşük iletkenlik seviyesi ile kullanılmaya pek uygun değildir. Bu yüzden istenilen iletkenlik özellikleri kazandırmak için çeşitli üretim yöntemleri kullanılarak yarıiletkenlere katkılama işlemi yapılır. Katkılama işlemleri sayesinde baskın yük taşıyıcı türüne göre, iki farklı iletkenlik tipi sergileyen yarıiletken malzemeler üretmek mümkündür. Bu yarıiletken malzeme tipleri ise *n-tipi* ve *p-tipi* yarıiletkenlerdir (Hu 2010).

2.1.1. N-tipi ve P-tipi Yarıiletkenler

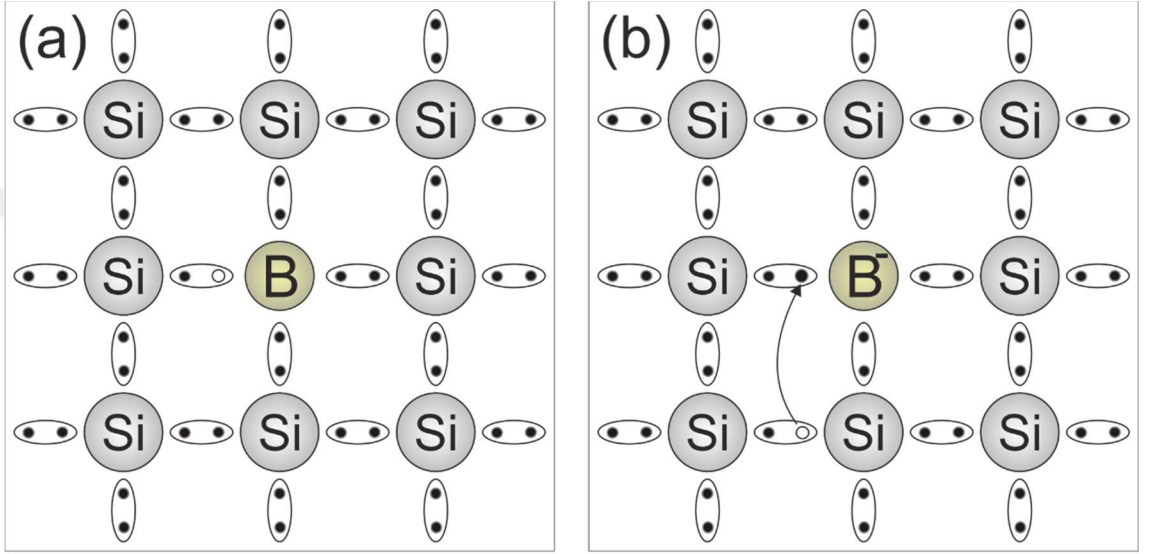
Silisyum kristali içerisinde periyodik tablodan bir V. grup elementi (N, P, As, ... gibi) eklediğimizi düşünelim. V. grup elementleri bilindiği üzere son yörüngesinde 5 tane elektron bulundurur. Şekil 2.3'te içerisinde P atomu eklenmiş bir Si kristali görülmektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi P atomunun son yörüngesinde bağ yapmayan fazladan bir tane elektron bulunur. Bu fazla elektron $T=300$ K sıcaklıkta P atomuna bağlıdır fakat oda sıcaklığı gibi bir sıcaklıkta bağ yapmayan bu fazla elektron Si atomunun bağ elektronuna göre çok daha kolay bir şekilde atomdan ayrılarak serbest hale yani iletkenlik elektronu haline gelir. Bu durumda fazla elektronunu veren atoma **donor (verici)** adı verilir. Fakat bu durumda saf Si deki gibi bir boşluk (hole) oluşmaz ancak geride akım taşımayan hareketsiz bir P^+ iyonu kalır. Yani bu durumda akım taşıyıcı yük elektrondur ve bu nedenle bu tip yarıiletkenlere ***n-tipi yarıiletkenler*** denir. Yarıiletken içerisinde eklenen bu P atomlarının birim hacimdeki yoğunluğunu değiştirerek yarıiletkenin elektriksel iletkenlik gibi elektronik özellikleri arzu edilen şekilde ayarlanabilir.



Şekil 2.3. Si kristali içerisinde eklenen P atomunun bağ yapmayan 5. elektronunun; **a)** $T=0$ K ve **b)** $T=300$ K'deki durumu.

Diğer bir durum ise Si kristali içine periyodik tablodan bir III. grup elementi (B, Al, Ga, ... gibi) eklendiği durumdur. Bilindiği üzere III. grup elementlerinin son yörüngelerinde 3 tane elektron bulunur. Eğer Şekil 2.4.a'da görüldüğü gibi Si kristalinde, bir Si atomu

yerine bir B atomu konursa, B atomu dörtlü bağ yapısını tamamlayamaz, yani bir elektron boşluğu (hole) kalır. Sıcaklık $T=0$ K iken bu boşluk B atomda kalır, ancak $T>0$ K olduğu zaman B atomu komşu Si atomlarının birinden bağ elektronunu alarak boşluğunu bu atoma verir ve boşluk hareketli hale geçer ve elektrik akımı taşır. Burada B atomuna elektron aldığı için **akseptör (alıcı)** denir. Bu gibi akseptör ile katkılanmış yarıiletkenlere de **p-tipi yarıiletkenler** denir.



Şekil 2.4. Si kristali içerisinde eklenen B atomunun elektron boşluğunun; a) $T=0$ K ve b) $T=300$ K'deki durumu.

Bir donör atomun 5. elektronunu serbest bırakmak yani iyonlaştırmak için gereken enerjiyi hesaplamak için boşlukta bulunan bir H atomunun iyonlaşma enerjisini katkı atomumuza uyarlayarak açıklayabiliriz. Boşluktaki hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisi (Hu 2010):

$$E = \frac{m_0 q^4}{8 \epsilon_0^2 h^2} = 13,6 \text{ eV} \quad (2.1)$$

ifadesi ile verilir. Burada m_0 serbest elektron kütlesi, q elektron yükü, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti ve h Planck sabitidir. Denklem (2.1)'de verilen bu ifadede serbest elektron kütlesi yerine yarıiletken kristali içindeki etkin elektron kütlesi m_e^* , boşluğun

dielektrik sabiti yerine yarıiletkenin dielektrik sabiti ϵ_s koyulursa, donör atom elektronunun iyonlaşma enerjisi,

$$E_D = \frac{m_e^* q^4}{8\epsilon_s^2 h^2} \quad (2.2)$$

olur. Donör iyonlaşma enerjisi için geçerli olan aynı sonuç akseptör iyonlaşma enerjisi için de geçerlidir ve m_h^* boşluk (hole) etkin kültesi olmak üzere

$$E_A = \frac{m_h^* q^4}{8\epsilon_s^2 h^2} \quad (2.3)$$

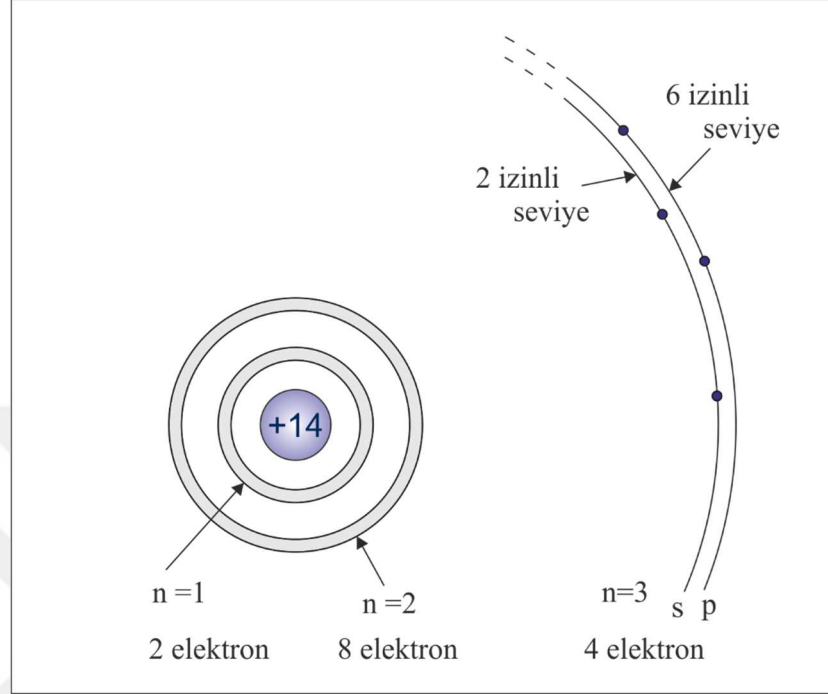
olarak ifade edilir.

2.1.2. Enerji Bant Modeli

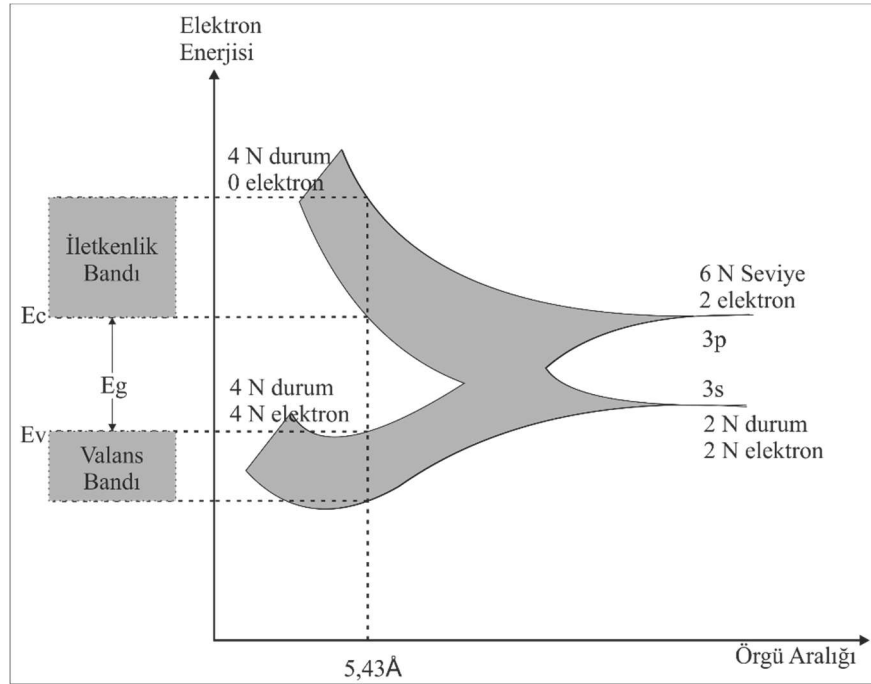
Yarıiletkenleri tanımlamada ve anlamada en kullanışlı yöntem enerji bantları modelidir. İzole halde bulunan bir atomda elektronlar ayırık enerji seviyelerinde bulunabilir. Birebir özdeş iki atom bir araya getirildiği zaman; bir elektron sisteminde aynı enerji seviyesinde birden fazla elektronun bulunamayacağını söyleyen Pauli dışarlama prensibine göre her bir enerji seviyesi birbirinden biraz farklı iki enerji seviyesine bölünür. Buna göre bir kristal oluşturmak için N tane atom bir araya getirildiği zaman farklı atomların dış yörüngelerindeki elektronlar üst üste biner, aynı iki özdeş atomun bir araya getirildiği zaman olduğu gibi bu kez N tane ayırık ancak birbirine çok yakın enerji seviyeleri oluşur. Bu N sayısı çok büyük ise ayırık enerji seviyeleri sürekli bir enerji bandı halini alır. N tane seviyeden oluşan bu bant kristaldeki atomlar arası mesafeye bağlı olarak birkaç eV'e kadar genişleyebilir (Sze 2002).

Bir yarıiletken için ise bant ayrılması daha karmaşıktır. Şekil 2.5'te verilen tek izole bir Si atomunun 14 elektronundan 10 tanesi yörünge yarıçapı atomlar arası mesafeye göre çok küçük olan iç kabuklarda bulunmaktayken 4 elektronu daha zayıf bağlı olarak en dış kabukta bulunmaktadır. Bu yüzden sadece dış kabuktaki valans elektronları dikkate alınır.

3s alt-kabuğunda iki izinli ve 3p alt-kabuğunda ise altı izinli kuantum durumu vardır ve $T=0\text{ K}$ 'de her iki alt kabukta da ikişer tane valans elektronu bulunur.



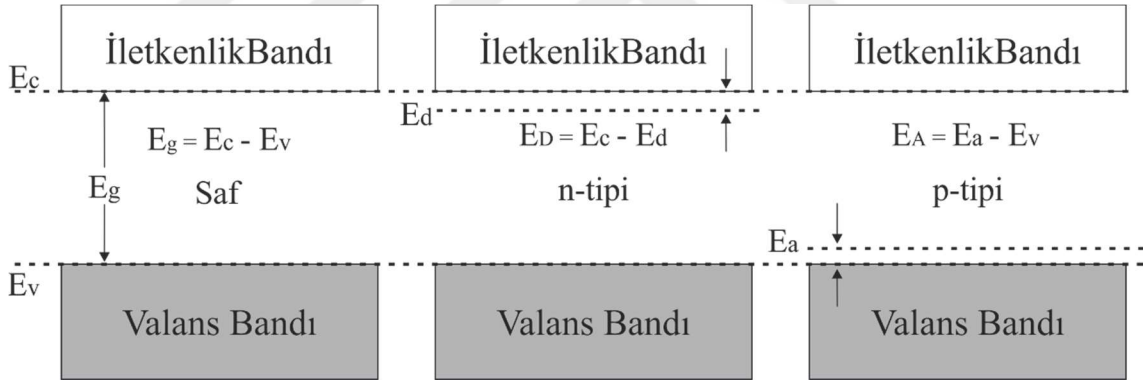
Şekil 2.5. Tek bir izole Si atomunun enerji seviyelerinin şematik gösterimi.



Şekil 2.6. N tane Si atomunun bir araya gelerek Si kristalini oluşturmasıyla enerji bandı oluşumunun şematik gösterimi.

Şekil 2.6'da N tane Si atomundan Silisyum kristali oluşumuyla enerji bantlarının oluşumu şematik olarak gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi atomlar arası mesafe küçüldükçe 3s ve 3p alt kabuklarında enerji seviyeleri üst üste binerek bantlar oluşturuyor daha sonra bantlar genişleyerek birleşiyor ve silisyumun elmas kristal yapısının örgü sabiti değerine geldiğinde bantlar tekrar ayrılıyor ve iki tane bant oluşuyor. Oluşan iki banttandır alttakinde 4N tane kuantum durumu ve üsttekinde de 4N tane kuantum durumu oluşuyor. T=0 K'de tüm elektronlar en düşük enerji seviyesinde bulunacağından hepsi alttaki bantta bulunur ve üstteki bant tamamen boştur. Alttaki bant **valans bandı** olarak, üstteki bant ise **iletkenlik bandı** olarak adlandırılır. Valans bandının üst sınırı (E_v) ile iletkenlik bandının alt sınırı (E_c) arasında kalan yasak enerji aralığı ise **bant aralığı** (E_g) olarak adlandırılır (Sze 2002).

Saf ve katkılanmış yarıiletkenlerin bant yapılarının şematik gösterimleri Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7. Saf, n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin bant yapılarının şematik gösterimleri.

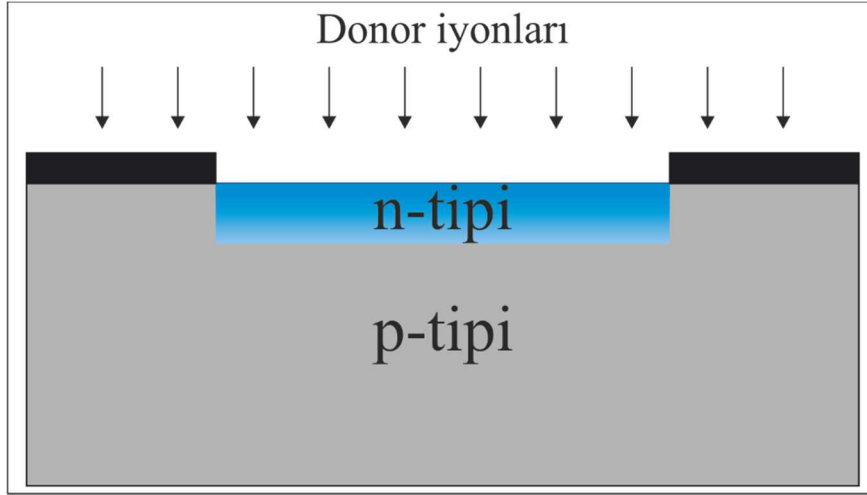
2.1.3. II-VI Grubu Yarıiletkenler

Periyodik tablonun II grubunda bulunan Zn ve Cd elementlerinin kalkojenleri yani VI. grup elementleri olan O, S, Se ve Te ile yaptıkları bileşikler II-VI grubu yarıiletkenler olarak adlandırılırlar. Yasak enerji aralıklarının çeşitliliğinden dolayı geniş bir yelpazede elektronik ve optoelektronik uygulamalar için iyi bir potansiyele sahiptirler. Kolay karışabilir olmaları, çeşitli özelliklerinin rahatça ayarlanabilmesine imkân sağlayan bir özelliktir. II-VI grubu yarıiletkenler, ZnTe haricinde katkısız olarak *n-tipi* iletkenlik

gösterirler. Bu bileşik yarıiletkenlerden CdTe, katkılama yapılarak iletkenliği ve iletkenlik tipi *n-* ve *p-tipi* olarak ayarlanabilir. Bu yarıiletkenlerden CdS, ZnS ve ZnSe'yi katkılama yoluyla *p-tipi* yapmak mümkündür ancak, yük taşıyıcı yoğunlukları düşük olacaktır. Cihaz uygulamaları için; iki tarafı farklı II-VI bileşiği olan p-n heteroeklemler oluşturmak, metal-yarıiletken ve metal-yalıtkan-yarıiletken yapılar oluşturmak da mümkündür. Tüm II-VI bileşik yarıiletkenler doğru geçişli bant yapısına sahip olduğundan dolayı ışık yayan ve algılayan optoelektronik cihaz uygulamaları için oldukça elverişlidir. İkili II-VI yarıiletkenlere ek olarak üçlü (örn. $Zn_{1-x}Cd_xS$ ve ZnS_xSe_{1-x}) ve dörtlü (örn. $Zn_{1-x}Cd_xS_ySe_{1-y}$) alaşımlar da “ayarlanabilir” esnek özellikleriyle dikkat çekmektedir (Yacobi 2003).

2.2. P-N Eklemi

Şekil 2.8’de gösterildiği gibi bir PN eklemi, donör atomlarının bir *p-tipi* yarıiletken içerisine iyon ekimi veya difüzyonu gibi katkılama yöntemleri kullanılarak yarıiletkenin belli bir katmanını *n-tipine* çevrilmesiyle üretilebilir. Yani temelde *n-tipi* ve *p-tipi* iki yarıiletkenin bir araya getirilmesiyle oluşmuş yapıya p-n eklemi adı verilir (Hu 2010).



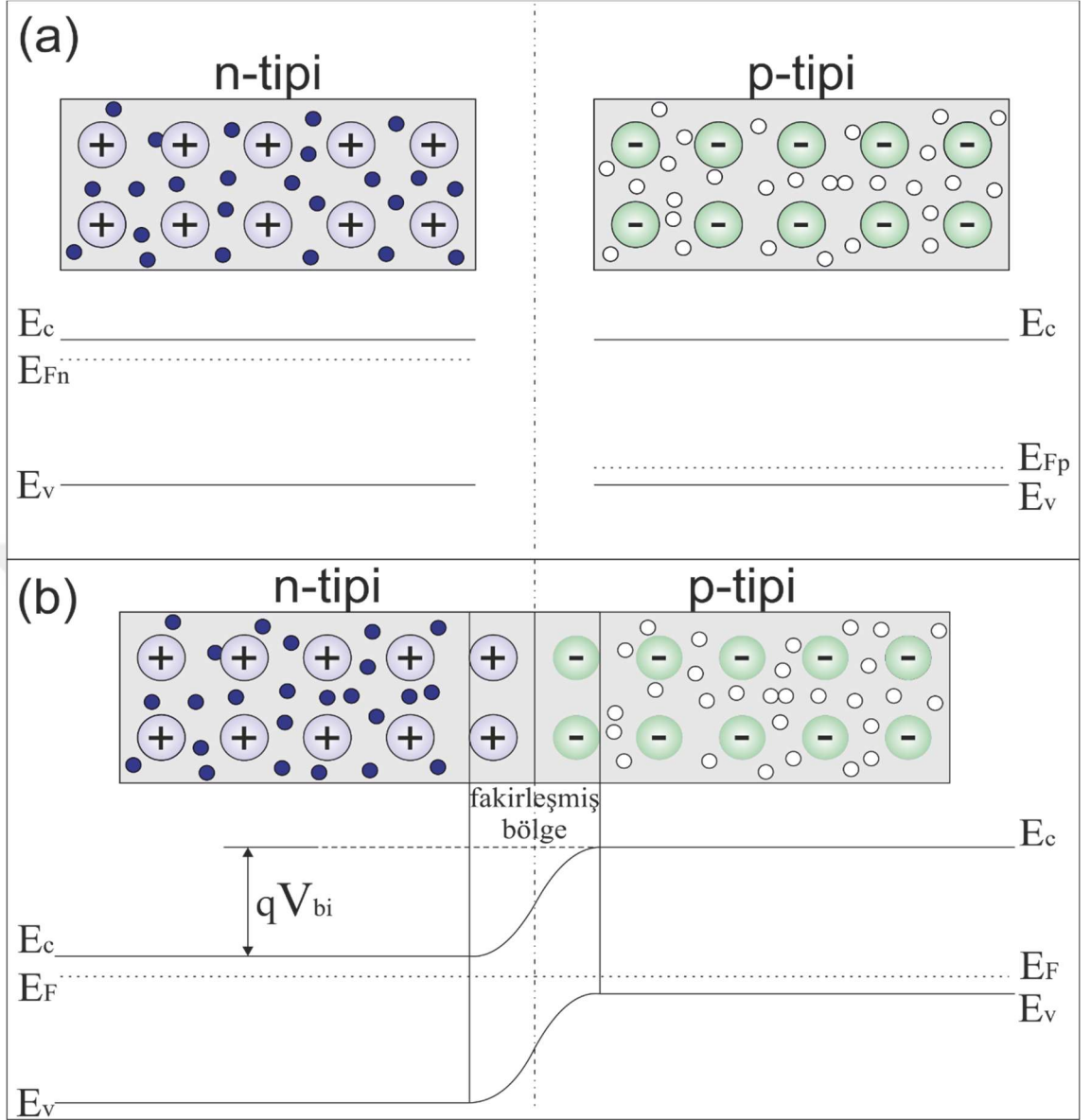
Şekil 2.8. Bir p-n eklem oluşturmak bir p-tipi yarıiletkene donör iyonları katkılanarak yapılabilir.

Bir p-n eklemi anlamak için enerji bant yapılarını incelemek gerekmektedir. Şekil 2.9.a’da p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerin eklem oluşturmadan önceki yük taşıyıcı durumları

ve enerji bant diyagramları alt alta verilmiştir. Şekil 2.9.b ise bu n- ve p-tipi yarıiletkenlerin bir araya getirilerek oluşturdukları p-n eklem yük dağılımlarını ve enerji bant diyagramını göstermektedir. Şekil 2.9.b’de görüldüğü üzere iki yarıiletken bir araya geldiği eklem bölgesi çevresinde serbest yük taşıyıcılardan (elektron ve boşluklar) yoksun bir bölge bulunmaktadır. Eklem olduğu esnada eklemeye yakın bulunan boşluklar (p-tipi bölgedeki) n-tipi bölgeye ve elektronlar da (n-tipi bölgedeki) p-tipi bölgeye difüzyon ile geçer bu esnada elektron ve boşluklar birbiriyle birleşerek eklem çevresinde hareketli yük bulunmayan **fakirleşmiş bölge** adı verilen bir alan oluşturur. Bu difüzyon süreci iki yarıiletken bölgenin Fermi seviyeleri eşitleninceye kadar sürer. Eklem bölgesindeki oluşan bu difüzyondan dolayı bu bölgede artık yük eşitliği yoktur, bu fakirleşmiş bölgede sadece iyonlaşmış katkı atomları (donör ve akseptör) bulunur. Bu da eklem bölgesinin iki tarafında da birer zıt yük bölgesi oluşturur. Bu sabit zıt yüklü iyonlar da serbest yük taşıyıcıların (elektron ve boşluk) eklemde diğer tarafa geçişine etkin olarak karşı koyan bir eklem potansiyeli oluşturur. Eklem bölgesine giren her serbest yük taşıyıcı kendini fakirleşmiş bölgeden geri iten bir kuvvetle karşılaşır. Yani diğer bir deyişle eklem bölgesindeki iyonlaşmış donör ve akseptör atomlarından kaynaklanan dengelenmemiş yükten kaynaklı olarak bir elektrik alan oluşur. *Yapı (built-in) potansiyeli* esasında *n-tipi* ve *p-tipi* bölgelerin Fermi enerjilerindeki farktan dolayı oluşur. Termodinamik dengede bir p-n eklemde Fermi seviyesi eklem boyunca sabit olması gerektiğinden dolayı eklem bölgesinde bir bant bükülmesi gerçekleşir. Denge durumunda yapı potansiyeli (V_{bi}), eşitlenmelerinden dolayı iki yarıiletkenin Fermi seviyesi arasındaki farka eşittir (Yacobi 2003):

$$qV_{bi} = E_{Fn} - E_{Fp} \quad (2.4)$$

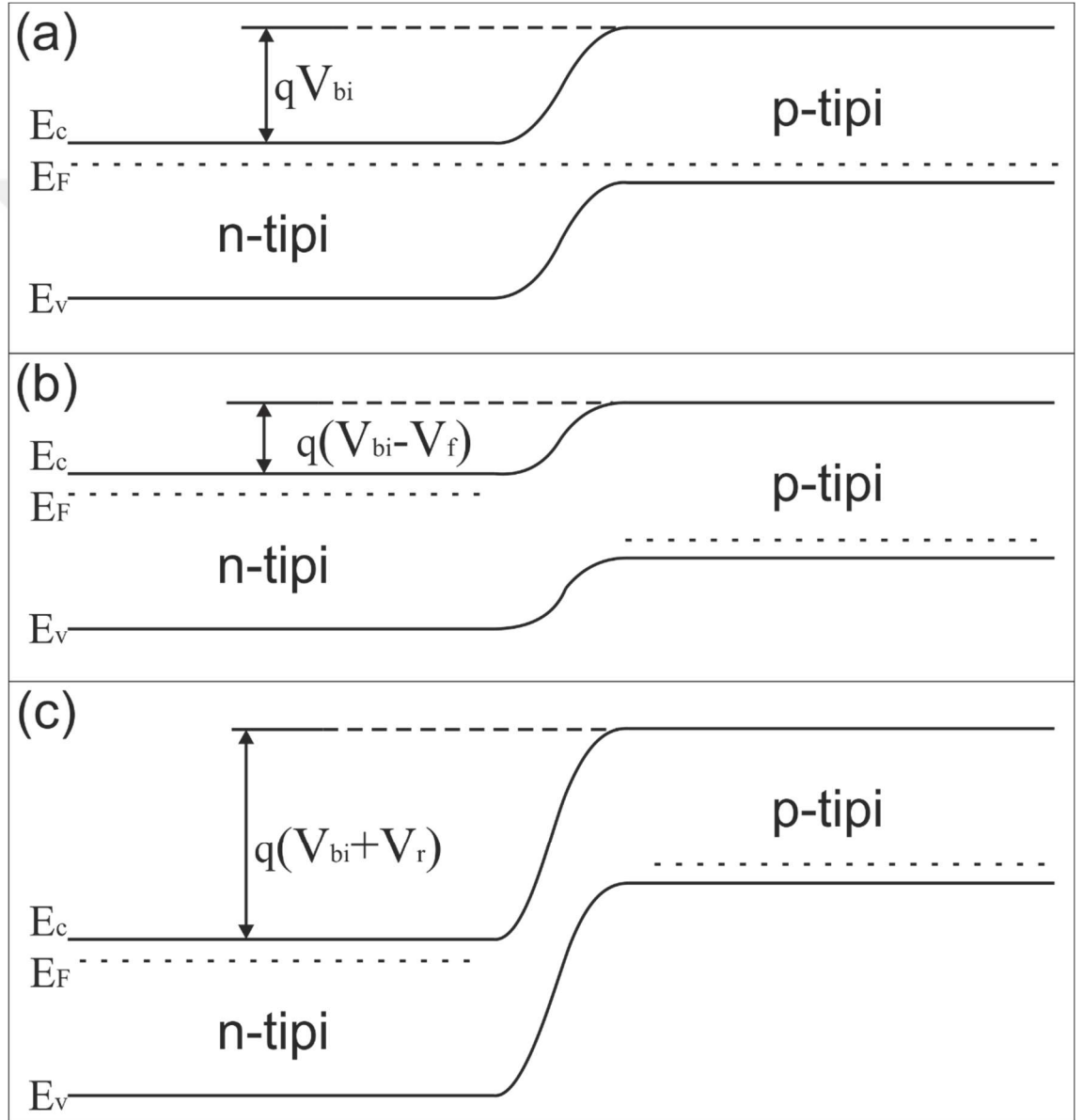
Serbest yük taşıyıcılar fakirleşmiş bölgeden karşıya geçmek için eklem bölgesindeki sabit iyonların oluşturduğu elektriksel kuvvetin üstesinden gelebilmek için fazladan enerjiye ihtiyaç duyarlar. Diğer bir deyişle eklem yük akışına karşı koyan bir bariyer gibi davranır. Bu bariyer de, Şekil 2.9.b’de iletkenlik ve valans bantlarının fakirleşmiş bölgede bükülmesiyle tasvir edilmiştir. Böyle bir tasvir, *n-tipi* bölgeden *p-tipi* bölgeye fakirleşmiş bölge üzerinden geçmek için bir elektronun yokuş yukarı çıkması gerektiğini göstermektedir. Boşluklar (hole) için de bunun tam zıttı geçerlidir. Nitekim serbest yük



Şekil 2.9. a) Eklem oluşturulmadan önce p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerin enerji bant yapısı, b) p-n eklem oluştuktan sonra ki enerji bant diyagramı ve fakirleşmiş bölge.

taşıyıcılar eklemden karşıya geçiş için enerjiye ihtiyaç duyar, bu da Şekil 2.10.a'da gösterildiği gibi p-n eklem iki ucundan bir voltaj uygulayarak sağlanabilir. Ancak voltajın yönüne (polaritesine) bağlı olarak uygulanan voltaj, serbest yük taşıyıcıların eklemden karşıya geçmesine yardımcı olabilir veya aşmaları gereken potansiyel bariyerini de yükseltebilir. Bu da bir diyotun doğrultucu karakteristiğidir, yani diyotlar elektrik akımını bir yönde iletirken diğer yönde iletmezler. Bu diyotun *ileri-besleme* ya da *ters-besleme* durumuna göre değişir. Eğer bir diyotun *p-tipi* katkılı bölgesine pozitif voltaj uygulanmışsa *ileri-beslenmiş* ve *p-tipi* bölgesine negatif voltaj uygulanmışsa *ters-*

beslenmiş olarak tanımlanır. İleri-beslenen bir diyotta, serbest elektron ve boşluklar eklemeye doğru itilir, bu elektron ve boşluklara eklemi aşmaları için ek enerji sağlar. Ancak ters-beslenmiş bir diyotta ise elektron ve boşluklar eklemeye uzağa doğru çekilir ki bu durumda fakirleşmiş bölgeyi aşmaları çok daha zor olur. Bu esasen Şekil 2.10'da görüldüğü gibi, ileri beslemede potansiyel engelinin küçüldüğü ve ters beslemede potansiyel engelinin büyüdüğü anlamına gelir (Yacobi 2003).



Şekil 2.10. a) Dengede, b) ileri beslenmiş, c) ters beslenmiş p-n eklemi şematik gösterimi.

2.3. Heteroeklem Diyotlar

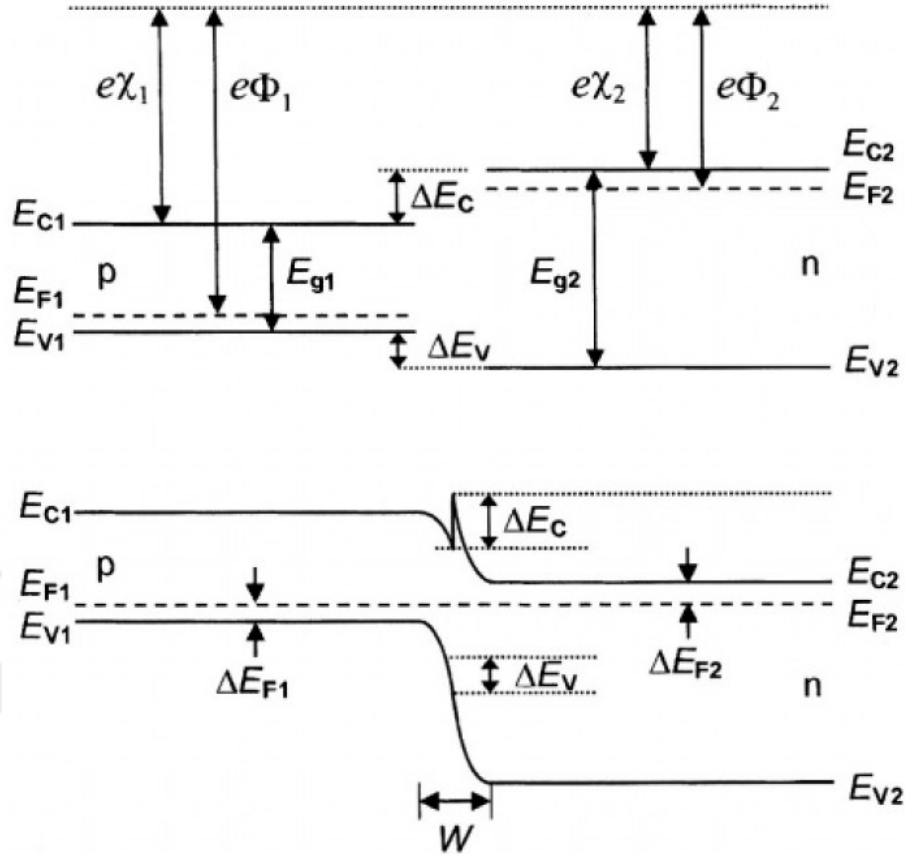
Farklı iki yarıiletkenin (örn. Si ve ZnS), bir araya getirilmesiyle oluşturulan diyotlara heteroeklem diyot adı verilir. İki tip heteroeklem diyot vardır. Bunlardan birincisi iletkenlik tipi farklı olan farklı iki yarıiletkenin bir araya getirilmesi ile oluşan *anizotip heteroeklem (p-n)*, diğeri ise iletkenlik tipi aynı olan iki yarıiletkenin bir araya getirilmesi ile oluşan *izotip heteroeklem (p-p ve n-n)*'dir. Heteroeklemlerin temel avantajları, enerji bariyerlerini ve potansiyel değişimlerini kontrol ederek yük iletimini kontrol edebilmek ve optik ışınmaları hapsedebilme özellikleridir ki bu özellikler, optoelektronik cihaz uygulamaları için çok önemlidir.

İyi bir heteroeklem üretebilmek daha çok epitaksiyel büyütme metotlarının kullanılmasıyla mümkündür. Çünkü örgü uyumsuzluğundan kaynaklı gerilmeler ve örgü kayması gibi kusurların varlığı eklem kalitesini ve dolayısıyla cihaz performansını olumsuz yönde etkiler. Epitaksiyel büyütme metotları ve örgü benzerliği yüksek yarıiletkenlerin kullanılması bu gibi örgü kusurlarını göz ardı edilebilecek kadar küçültür.

Heteroeklemi oluşturan yarıiletkenlerin enerji bant genişliklerindeki farklılık, heteroeklemin özelliklerine etki eden valans ve iletkenlik bantlarında kesiklikler olmasına sebep olan enerji bandı hizalanmasının nedenidir. Elektron ilgisi modeli, iki farklı yarıiletken arasındaki ara yüzdeki iletkenlik bandı kesikliğinin elektron ilgileri arasındaki farktan elde edilebileceğini söyler:

$$\Delta E_c = q(\chi_1 - \chi_2) \quad (2.5)$$

Şekil 2.11'de yasak bant aralığı dar olan bir *p-tipi* yarıiletken ve yasak bant aralığı geniş olan bir *n-tipi* yarıiletkenden oluşmuş heteroeklemin bant yapısı verilmiştir (Yacobi 2003).



Şekil 2.11. p-n heteroeklemin bant yapısının eklem oluşmadan önceki (üstte) ve eklem oluşuktan sonra (altta) termal denge halindeki şematik gösterimi. (Yacobi 2003)

İki yarıiletken bir araya getirilip eklem oluşturulduğu zaman Fermi seviyeleri eşitlenene kadar elektronlar *p-tipi* ve boşluklar (hole) *n-tipi* bölgelere geçerek eklemde *fakirleşmiş bölge* oluştururlar. Fermi seviyeleri eşitlenirken bant kenarlarında aşağı (*n*-tarafında) ve yukarı yönlü (*p*-tarafında) bant bükülmeleri olur. Nitekim farklı yarıiletkenler ve bu yarıiletkenlerin farklı elektron ilgilerinden ve bunların Fermi seviyelerinin eşitlenmesiyle valans bandı ΔE_v ve iletkenlik bantlarında ΔE_c kesiklikler (farklar) oluşur. Valans bandında oluşan kesiklik (fark),

$$\Delta E_v = (q\chi_2 + E_{g2}) - (q\chi_1 + E_{g1}) \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilebilir ve yasak enerji aralığındaki fark (ΔE_g) da

$$\Delta E_g = E_{g2} - E_{g1} = \Delta E_c + \Delta E_v \quad (2.7)$$

olarak ifade edilebilir. Bu durumda yapı potansiyeli de

$$qV_{bi} = E_{g1} + \Delta E_c - \Delta E_{F1} + \Delta E_{F2} \quad (2.8)$$

Olarak ifade edilebilir (Yacobi 2003).



3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu bölümde, tez çalışmasında üretilen ve incelenen Al/ZnS/*p*-Si/Al heteroeklem diyotun yarıiletken bileşenleri Si ve ZnS yanı sıra, ohmik kontakların yapıldığı Al'nin temel özelliklerinden bahsedilmiştir.

3.1.1. Silisyum (Si)

Si, günümüz elektronik sektöründe kullanılan yarıiletken devre elemanlarının çok büyük bir bölümünün ana maddesidir ve bu yüzden günümüz teknolojisi için çok büyük bir yere ve öneme sahiptir. Si'nin doğada bolca bulunması, üretim teknolojisinin oldukça gelişmiş olması ve element yarıiletken olmasından dolayı Si alt-taşların üretimi kolay ve üretim maliyeti oldukça düşüktür. Si, IV. Grup elementi olup, *elmas kübik* yapıda kristalleşir. Si kristal örgü sabiti $a=5,431 \text{ \AA}$ ve yasak bant genişliği $E_g=1,12 \text{ eV}$ 'dir (Tapan ve Ahmetoglu 2003).

Bu tez çalışmasında kullanılan Si alt-taşlar; tek yüzü parlatılmış (SSP), 4" çapında, (100) kristal yönelimi, 500 μm kalınlıkta, *p-tipi* ve (1 – 10 ohm.cm) dirence sahiptir.

3.1.2. Çinko Sülfür (ZnS)

Çinko Sülfür; yasak bant genişliği (3,66 – 3,78) eV (Sze ve Kwok 2007) olan, doğru bantlı, görünür bölgede yüksek optik geçirgenliğe ve lüminesans özelliklere sahip, II-VI grubu *n-tipi* bir yarıiletkendir. Bu özelliklerinden dolayı ZnS birçok optoelektronik cihaz uygulaması için uygun ve önemli bir yarıiletken malzeme olma özelliği taşımaktadır. ZnS iki farklı yapıda kristalleşir; *zinblend* ve *wurtzite*. Zinblend yapıda kristalleşen ZnS'nin kristal örgü sabiti $a=5,420 \text{ \AA}$ 'dur (Tapan ve Ahmetoglu, 2003) ki bu, ZnS ve Si kristal örgü sabitlerinin %99,8 uyumlu olduğunu göstermektedir. Yani ara yüzey kusurları oldukça düşük bir heteroeklem oluşturma olanağı sağlamaktadır.

Üretimde kullanılan ZnS %99,995 saflıkta olup, tane boyutu 6 mm'ye kadar olan granül haldeki ticari ZnS'dir.

3.1.3. Alüminyum (Al)

Si'nin arka yüzüne ve ZnS ince filmin üst yüzüne ohmik kontak yapmak için kullanılan Al %99,9 saflıktadır.

3.2. Yöntem

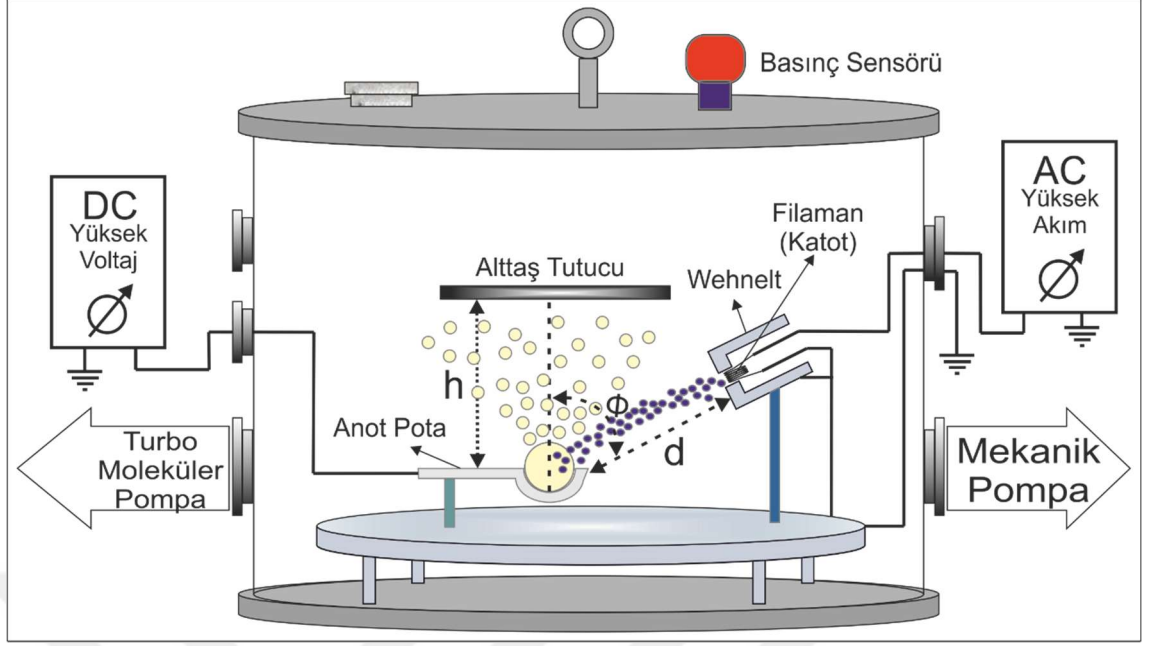
ZnS ince filmin üretimini yaptığımız TVA sisteminin çalışma prensibi ve ohmik kontaktların yapıldığı termal buharlaştırma sistemlerinden bu kısımda bahsedilmiştir.

3.2.1. Termiyonik Vakum Ark

Termiyonik vakum ark sistemini oluşturan temel kısımlar Çizelge 3.1 ve sistemin şematik bir gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Termiyonik vakum ark sisteminin kısımları.

Vakum Kazanı
Mekanik Pompa
Turbo Moleküler Pompa
Basınç Sensörleri
Alt-taş Tutucu
Anot Materyal Potası
Katot Filamanı
Wehnelt Silindiri (Katot)
DC yüksek voltaj güç kaynağı
AC düşük voltaj – yüksek akım güç kaynağı



Şekil 3.1. Termiyonik Vakum Ark sisteminin kısımları ve şematik gösterimi.



Şekil 3.2. ZnS ince filmin üretildiği TVA sisteminin bir görüntüsü.

Termiyonik Vakum Ark (TVA) sisteminde, düşük voltaj – yüksek akım sürme kapasitesine sahip bir *AC* güç kaynağı kullanılarak uygun bir akım değerinde katot filamanı (tungsten filaman) ısıtılır ve termal olarak elektron yayımı sağlanır. Filamanın bir ucu *AC* güç kaynağına bağlı iken, diğer ucu filamanın içine yerleştirildiği Wehnelt silindirine ve vakum odasına bağlanır. Bir yüksek voltaj güç kaynağının pozitif potansiyel ucu kaplanması gerçekleştirilecek malzemenin konulduğu anot materyal potasına ve negatif potansiyel ucu da katot olan Wehnelt silindiri gibi vakum odasına bağlanır. Filamanın bir ucu *AC* güç kaynağına bağlı iken, diğer ucu filamanın içine yerleştirildiği Wehnelt silindirine ve vakum kazanına bağlanır. Bir *DC* yüksek voltaj güç kaynağının pozitif potansiyel ucu kaplanması gerçekleştirilecek malzemenin konulduğu anot materyal potasına ve negatif potansiyel ucu da katot olan Wehnelt silindiri gibi vakum odasına bağlanır. Bu sayede katot filamandan yayınlanan elektronların, katot Wehnelt silindiri ile anot materyal potası arasında yüksek potansiyel fark uygulanarak odaklanması sağlanır.

Yüksek potansiyel fark altında hızlandırılarak anot materyal potası üzerine odaklanan yüksek enerjili elektronlar potaya konan materyali bombardıman ederek enerjilerini materyal atomlarına aktarır ve materyali ısıtır. Bu sayede materyal atomları sökülerek katı halden buharlaşmaya başlar. Anot ve katot arasında voltaj artırılmaya devam edilirse bir noktada (ateşleme voltajı değerinde) anot materyal buharında bir elektriksel deşarj oluşur. Bu deşarj ile anot ve katot arasındaki gerilim birden düşer ve akım aniden yükselir, bu esnada anot materyalinin plazması oluşur. Oluşan malzeme plazması, yavaş yavaş vakum kazanının içinde yayılmaya başlar. Plazmaya uygun bir mesafeye uygun bir açı ile yerleştirilmiş olan bir alt-taş üzerine plazmadan materyal kaplanmaya başlar (Şenay 2016). Termiyonik Vakum Ark sisteminin temel çalışma prensibi bu şekildedir.

3.2.2. Termal Buharlaştırma

Termal buharlaştırma sistemi temel olarak bir vakum kazanı, vakum sistemi (mekanik pompa, difüzyon pompası veya turbo moleküler pompa) alt-taş tutucu, yüksek akım güç kaynağı, termal buharlaştırma kaynağı (W, Mo, Ta, gibi), kalınlık ölçüm sistemi ve numune perdesi gibi kısımlardan oluşur.



Şekil 3.3. Ohmik kontaktların kaplandığı “Nanovak NVTS-400” termal buharlaştırma sistemi.

Sistem, kaplanacak olan malzemeye uygun bir buharlaştırma kaynağı seçilip içerisine kaplama malzemesi yerleştirildikten sonra vakum kazanı kapatılarak önce içerideki hava vakum sistemi ile istenilen basınca kadar vakumlanır. Sistem basıncı istenilen seviyeye geldikten sonra güç kaynağı ile buharlaştırma kaynağı ısıtmaya başlanır. Malzemenin buharlaşma sıcaklığına ulaşılan dek akım yavaş yavaş yükseltilir. Kaplama malzemesi buharlaşmaya başladığında kalınlık ölçüm sistemi malzeme biriktirme hızı ve toplam kalınlık ölçmeye başlar. Film kalınlığı istenilen değere ulaştığında güç kaynağından akım düşürülerek sıfırlanır. Böylece termal buharlaştırma ile ince film kaplanmış olur.

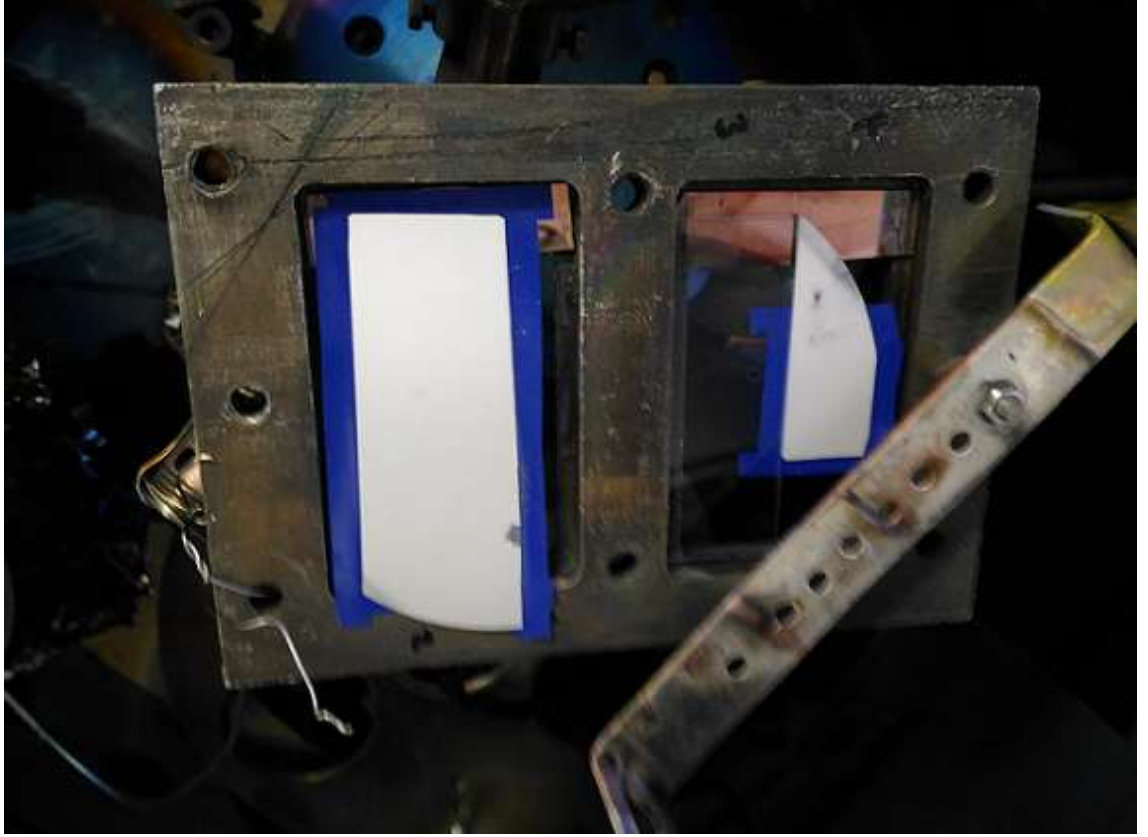
3.3. Deneysel Çalışmalar

3.3.1. Al/ZnS/*p*-Si/Al Heteroeklem Diyotun Üretimi

En başta, 4'' boyutundaki *p*-tipi Si alt-taşlar uygun boyutlara getirilmek amacıyla sivri uçlu bir cımbız ile kırılarak kesildi. Uygun boyuta getirilen Si alt-taşlar daha sonra 5 dakika süreyle etanol ile yıkanmış ve ardından DI ultra saf su ile durulanmışlardır. Ardından yalıtkan olan doğal oksit tabakasının temizlenmesi için %10 HF asit çözeltisinde 2 dakika aşındırma uygulanmış ve tekrar DI ultra saf su ile durulanmıştır. Kuruduktan sonra Si'nin mat yüzeyine ohmik kontak yapmak amacıyla termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak 100 nm kalınlığında Al kaplanmıştır. Si alt-taş kaplamadan sonra iyi bir ohmik kontak oluşması amacıyla N₂ atmosferinde 400 °C'de 10 dakika boyunca ısıl işlem uygulanmıştır. TVA ile ZnS kaplan Si alt-taşın diğer yüzü kenarları maskelendikten sonra tekrar %10 HF asit çözeltisinde 2 dakika aşındırma uygulanmış ve ardından DI ultra saf su ile durulanmıştır (Şekil 3.4). Si alt-taş yüzeyi oldukça hidrofobik hale gelmiştir. Ardından numuneler TVA sistemine yerleştirilmiştir (Şekil 3.5).

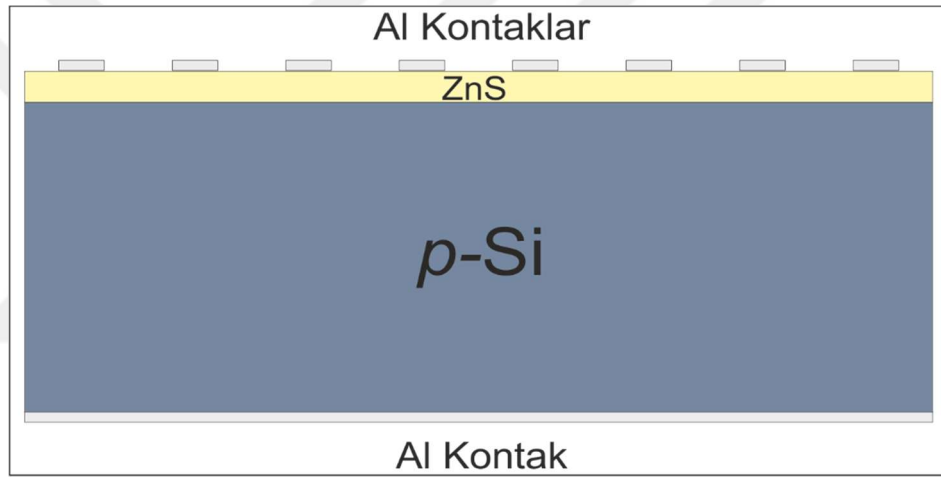


Şekil 3.4. Maskelendirme ve HF asit çözeltisi ile aşındırma işlemi.



Şekil 3.5. TVA'nın alt-taş tutucusuna yerleştirilmiş Si alt-taşlar.

Cam ve *p*-Si/Al alt-taşlar, ZnS ince film kaplanmak üzere TVA sistemine yerleştirildikten sonra vakum kazanı kapatılıp kaplama işleminden önce 8×10^{-5} Torr basınç seviyesine kadar sistem vakumlanmıştır. Vakuma alma işlemi tamamlandıktan sonra filaman; 18 A'lık akımla ısıtılmış ve filamandan yayılan elektronlar; 400 V'luk potansiyel fark altında anot materyal potasına doğru hızlandırılmıştır. Bu koşullar altında, 120 s süre boyunca ZnS ince film *p*-Si/Al ve cam alt-taşlar üzerine kaplanmıştır. Üretilen ZnS ince filmin kalınlığı FilMetrics ince film kalınlık ölçüm sistemiyle yaklaşık 300 nm olarak ölçülmüştür. ZnS üzerine ohmik kontak yapmak için, termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak Al 2 mm çapında 100 nm kalınlığında kaplanmıştır. Tüm bu işlemler sonucunda Al/ZnS/*p*-Si/Al heteroeklem diyot elde edilmiştir.

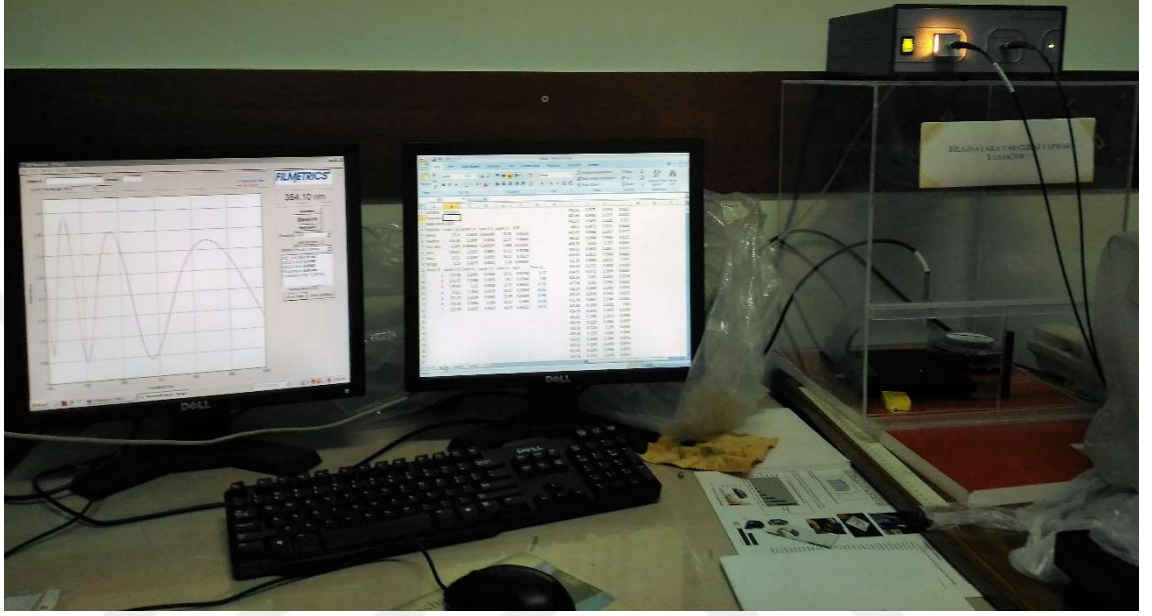


Şekil 3.6. Üretilen Al/ZnS/*p*-Si/Al heteroeklem diyotun yapısının şematik gösterimi.

3.3.2. Ölçüm ve Analizler

ZnS ince filmin optik geçirgenlik ve soğurma spektrumları cam üzerine kaplanan numuneden UV-VIS spektrofotometre (UNICO SQ4802 UV/VIS Spectrophotometer) ile ölçüldü. ZnS ince filmin yüzey morfolojisini incelemek için atomik kuvvet mikroskobu (AFM, Ambios Q-scope) kullanıldı. ZnS ince filmin kristal özellikleri incelenmek için X-ışınları difraksiyonu (XRD, Bruker D8 Advance) kullanıldı, analiz 40 kV, 40 mA ve Cu-K α ($\lambda = 0,154 \text{ nm}$) ışınımı kullanılarak yapılmıştır. Al/ZnS/*p*-Si/Al heteroeklemin cihaz parametrelerini karakterize etmek için hem aydınlık hem karanlık akım – voltaj (I-V) ölçümleri (Keithley 2440 5A SourceMeter ve Newport Oriel 1000 W güneş hücresi

simülatorü) ve sığa – gerilim (C-V) ölçümleri (Hewlett Packard 4192A LF model impedance analyzer) yapılmıştır. ZnS ince filmin tipi ve yük taşıyıcı yoğunluğu da Hall Etkisi ölçümü (Ecopia HMS 3000) ile belirlenmiştir. Bütün ölçümler oda sıcaklığında (300 K) yapılmıştır.



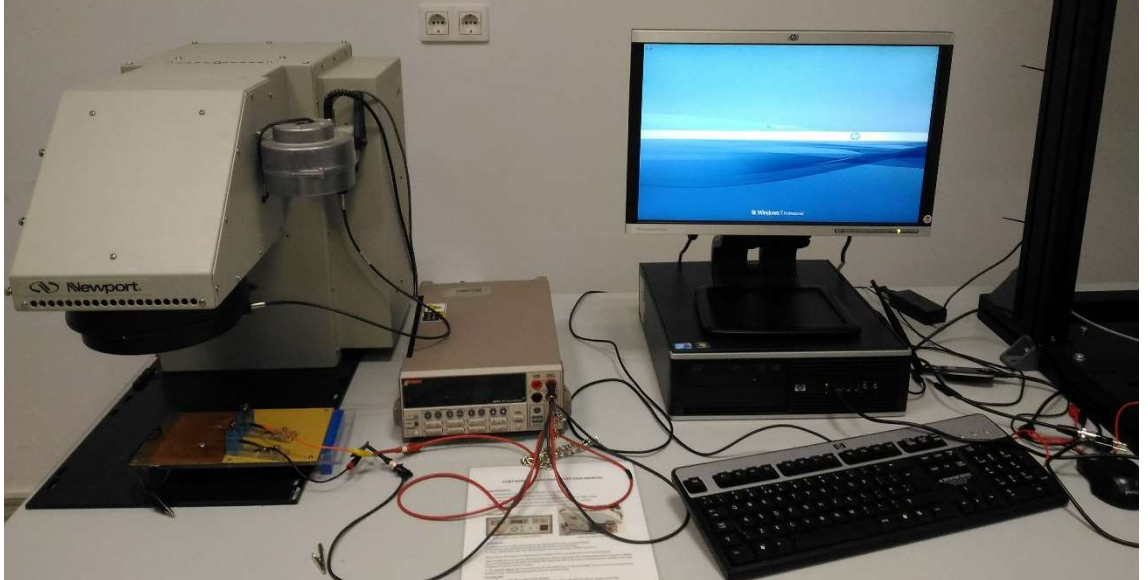
Şekil 3.7. FilMetrics F20 ince film kalınlık ölçüm sistemi görüntüsü.



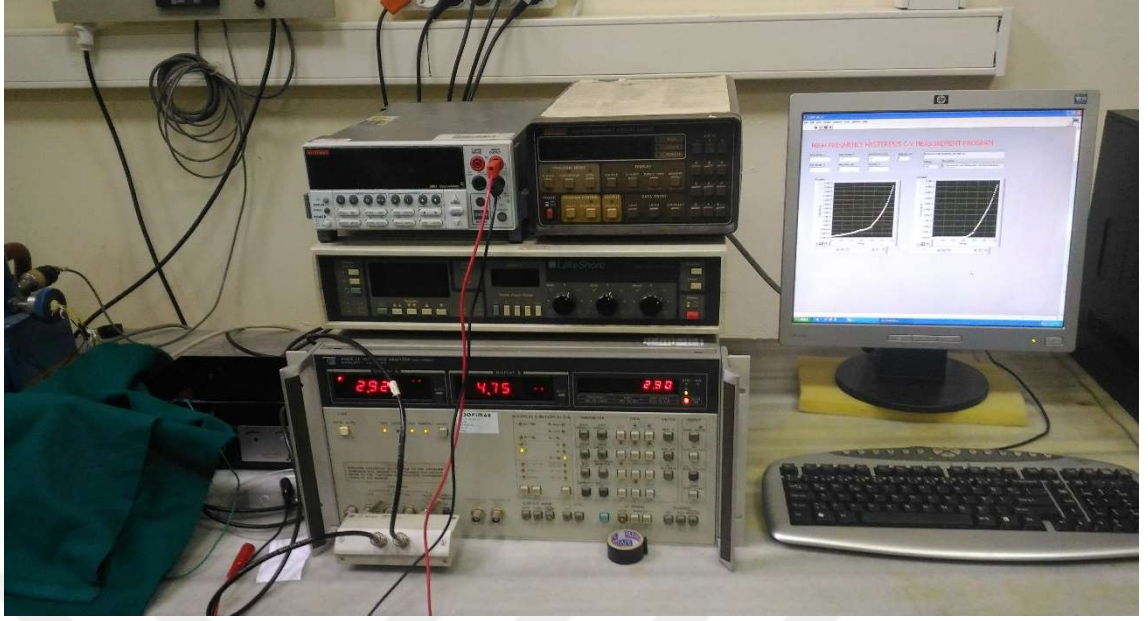
Şekil 3.8. UNICO SQ4802 UV/VIS Spektrofotometre sistemi görüntüsü.



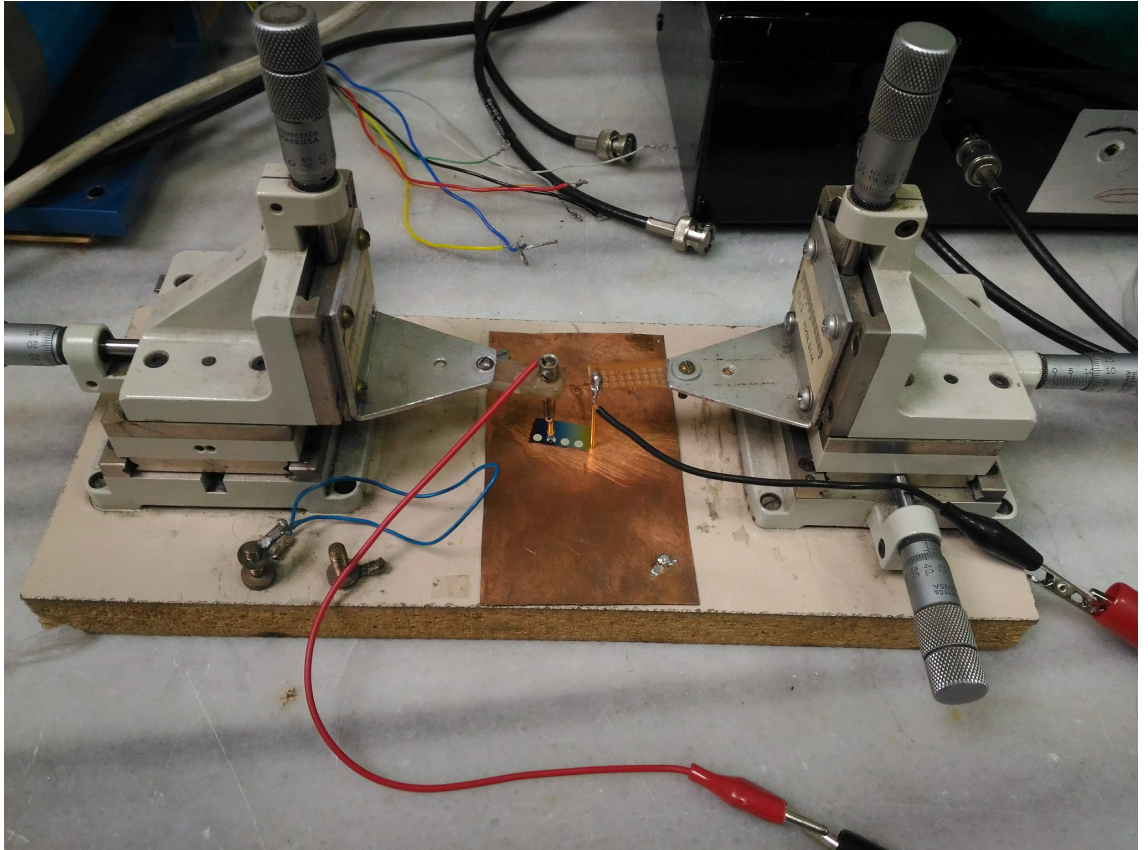
Şekil 3.9. Bruker D8 Advence X-Işınları kırınımı cihazı.



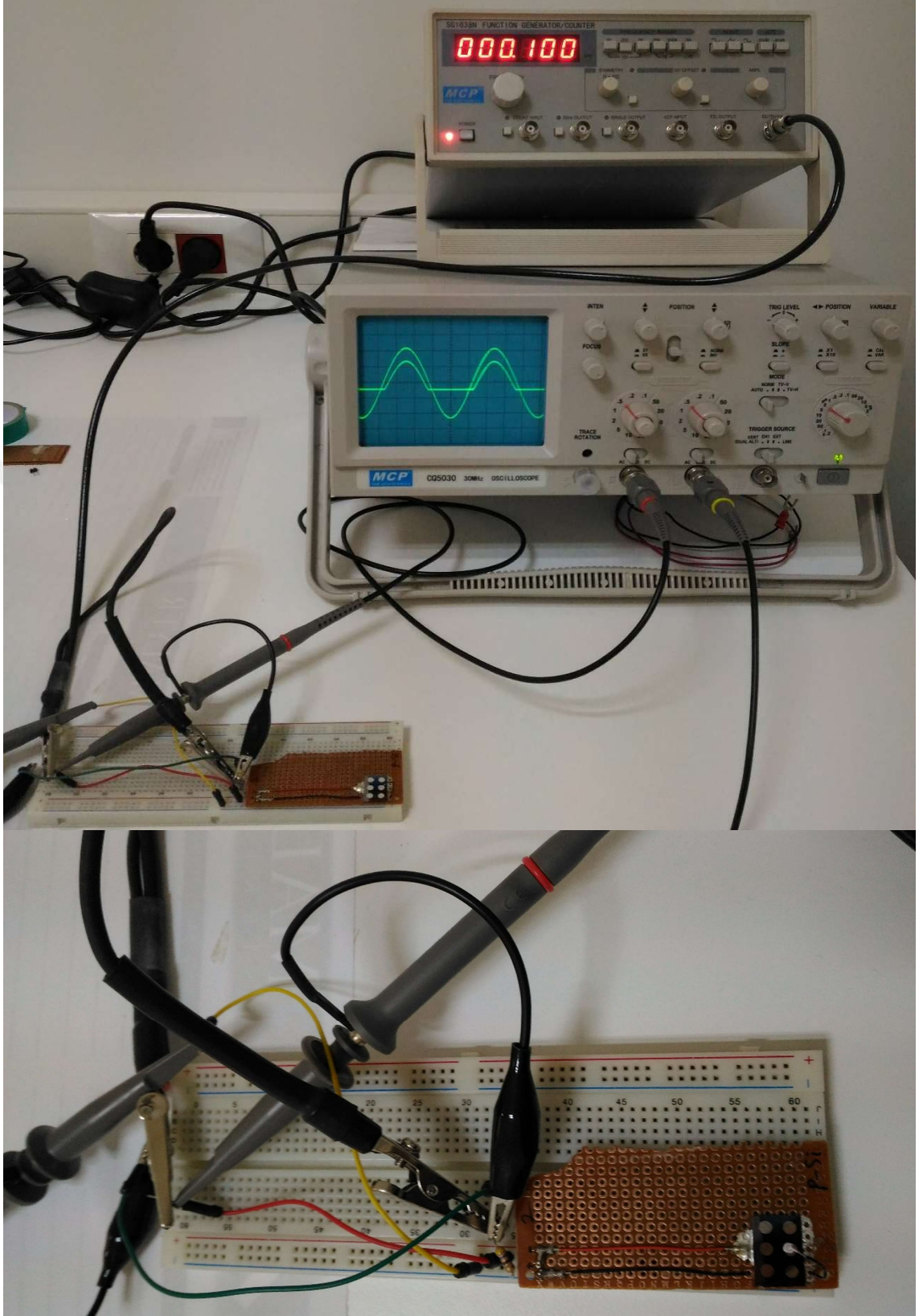
Şekil 3.10. Al/ZnS/*p*-Si/Al heteroeklem diyotun I-V ölçümü yapılan sistem (Keithley 2440 5A SourceMeter ve Newport Oriel 1000 W güneş hücresi simülatörü).



Şekil 3.11. Al/ZnS/*p*-Si/Al heteroeklem diyotun C – V ölçümü yapılan sistem (Hewlett Packard 4192A LF model impedance analyzer).



Şekil 3.12. C – V ölçümlerinde Al/ZnS/*p*-Si/Al heteroeklem diyotun prop ile sisteme bağlanması.



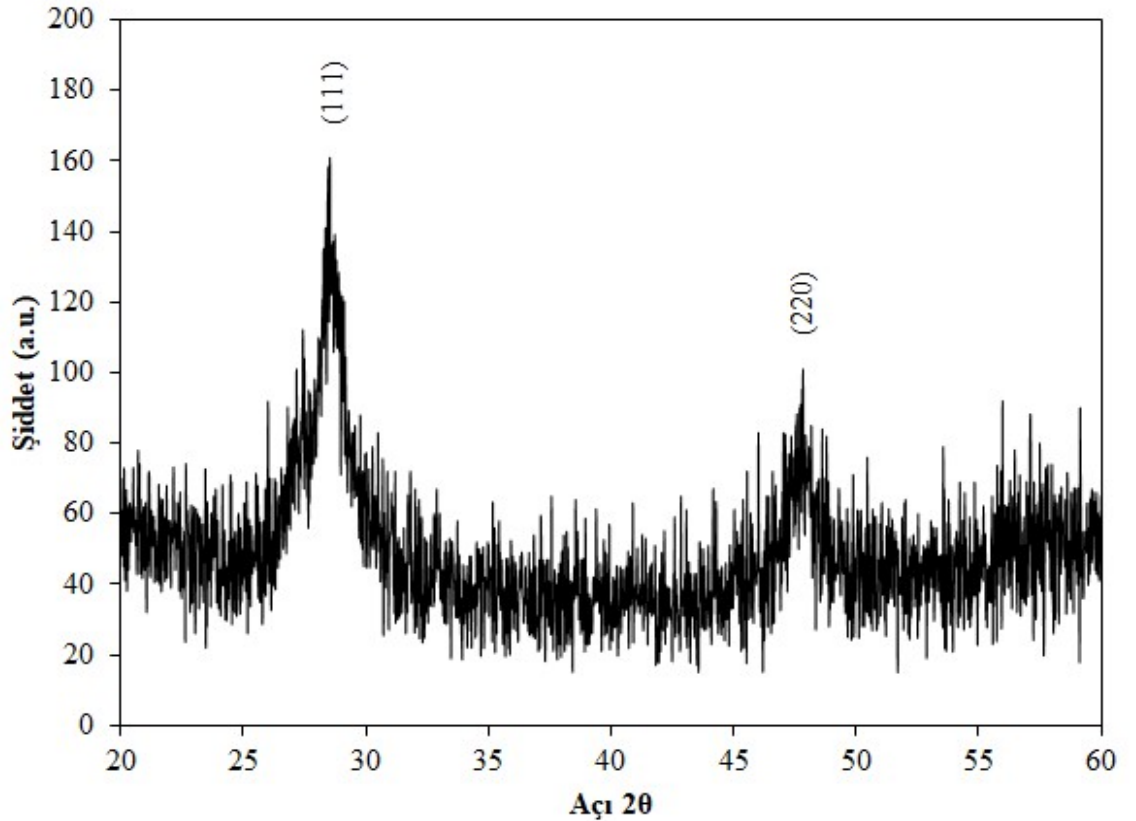
Şekil 3.13. Üretilen Al/ZnS/p-Si/Al heteroeklem diyotun AC sinyal doğrultucu özelliği de sinyal jeneratör ve osiloskop kullanılarak gözlenmesi.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Yapısal ve Morfolojik Özellikler

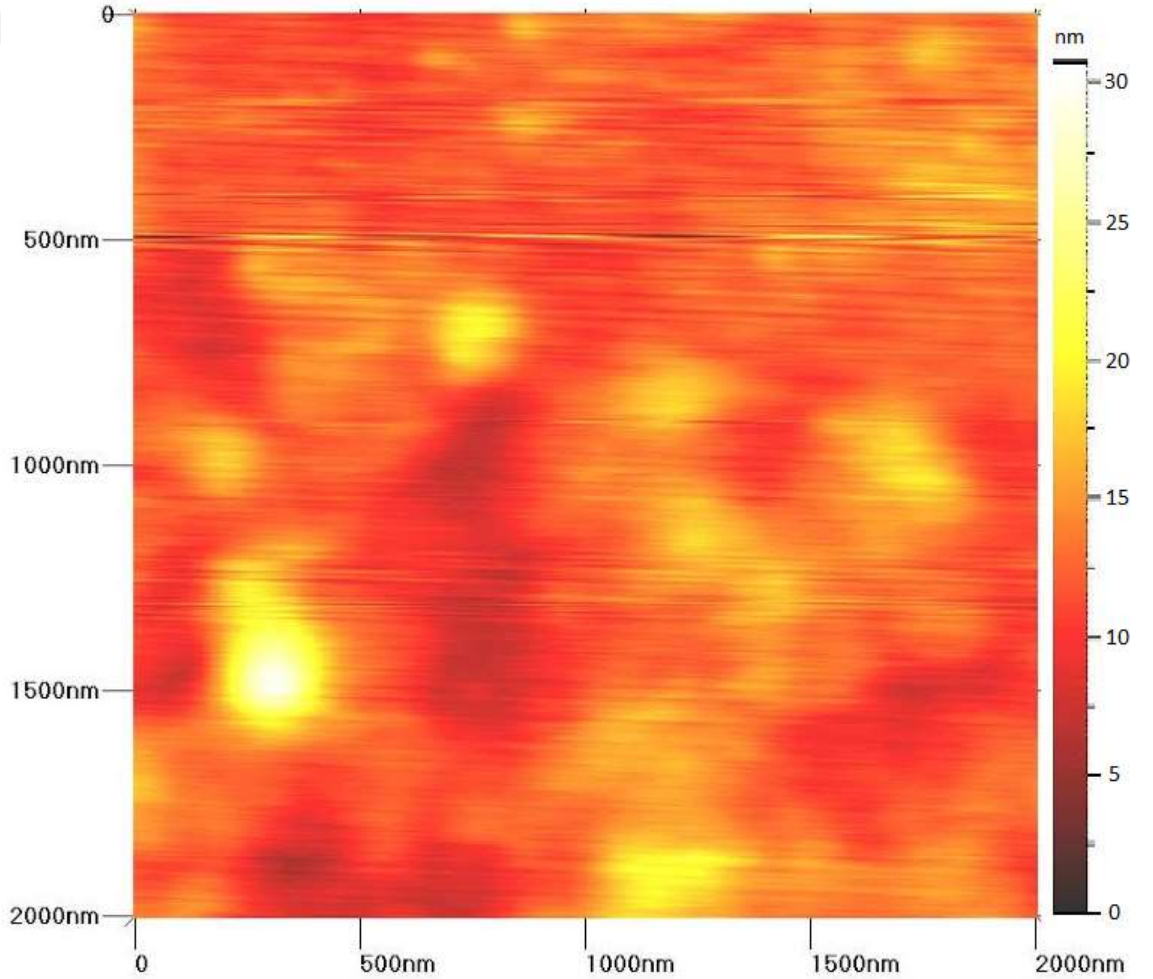
Şekil 4.1, *p-tipi* Si alt-taş üzerine biriktirilmiş olan ZnS ince filmin XRD spektrumunu göstermektedir. XRD spektrumunda gözlemlenen pikler, ZnS'nin (111) ve (220) kristal düzlemleriyle kübik (zincblende) kristal yapısına karşılık gelmektedir (JCPDS card no: 01-072-9262). Bu sonuçlar, öngörüldüğü gibi ZnS ince film ile Si alt-taş arasında iyi bir eklem oluştuğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, XRD spektrumunda herhangi bir safsızlığa ait bir pik gözlenmemiştir. ZnS ince filmin ortalama kristal tane boyutu baskın olan kristal yönelimi (111) için Debye-Scherrer formülü (Denklem 4.1) kullanılarak (Cullity 1978) 43 nm olarak ölçülmüştür.

$$D = \frac{0,94\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (4.1)$$

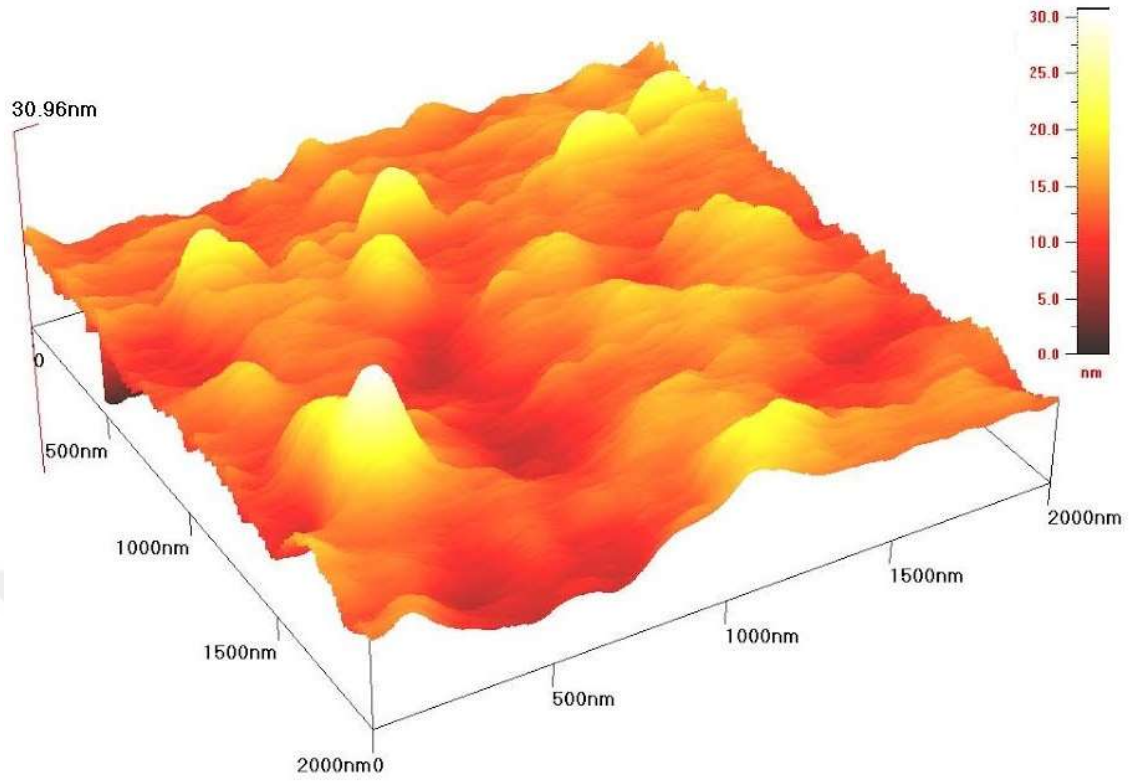


Şekil 4.1. Si alt-taş üzerine biriktirilmiş ZnS ince filmin X-ışını kırınım spektrumu.

Si alt-taş üzerine biriktirilen ZnS ince filmin yüzey morfolojisi ise AFM analizi ile incelenmiştir. ZnS ince filmin $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ çözünürlükte taranmış 2B ve 3B AFM görüntüleri Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilmiştir. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te görüldüğü üzere tarama alanında kristal tanelerinin dağılımı oldukça homojendir. Ayrıca ZnS ince filmin ortalama yüzey pürüzlülüğü (RMS) yaklaşık 2,64 nm olarak belirlenmiştir. Bu değer, Turgut ve ark. (2013) elde ettiği değer ile çok yakın, Bouguila ve ark. (2015) ile Madugu ve ark. (2016) ölçümlerinde buldukları değerlere kıyasla oldukça küçüktür, yani TVA yöntemi ile üretilen ZnS film daha homojen ve daha pürüzsüz bir yüzeye sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.2. Si alt-taş üzerine biriktirilmiş ZnS ince filmin 2B AFM görüntüsü.



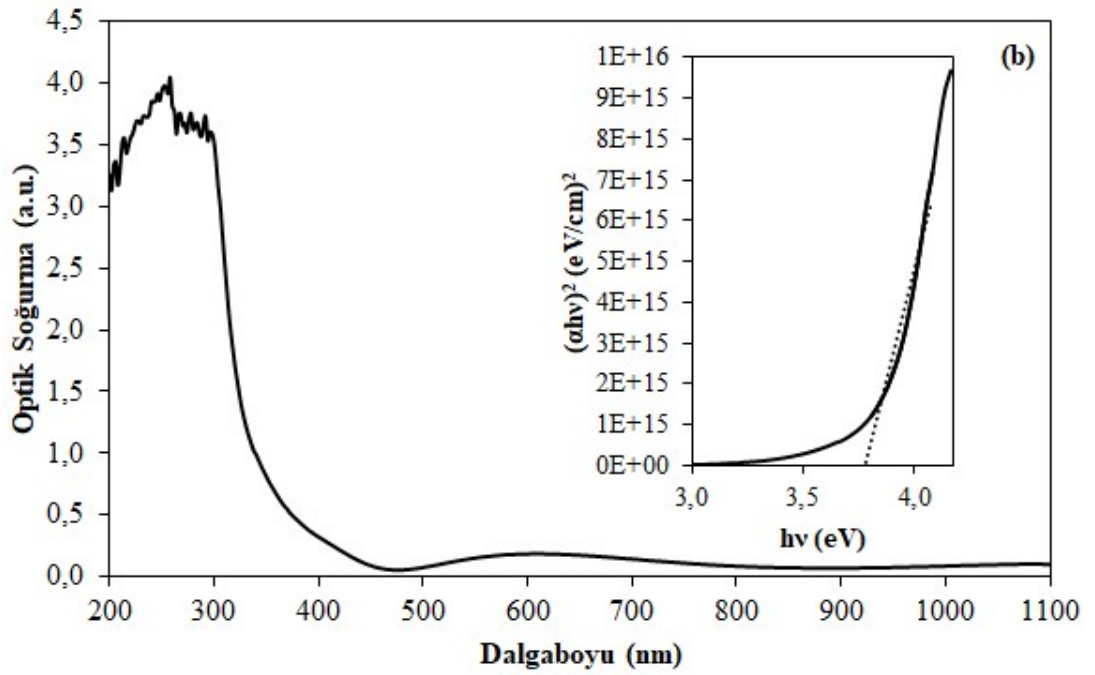
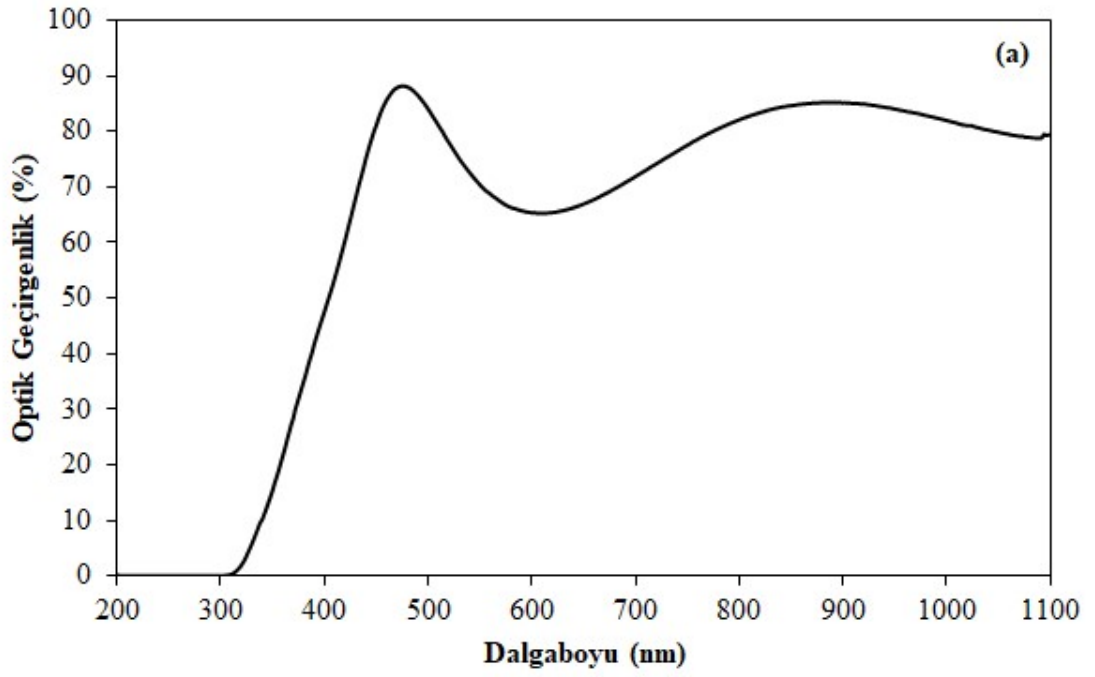
Şekil 4.3. Si alt-taş üzerine biriktirilmiş ZnS ince filmin 3B AFM görüntüsü.

4.2. Optik Özellikler

Cam üzerine biriktirilen ZnS ince filmin optik soğurma ve geçirgenlik spektrumu bir UNICO SQ4802 UV/VIS Spektrofotometre kullanılarak ölçülmüştür. Dalga boyuna karşı yüzde optik geçirgenlik ve optik soğurma spektrumları Şekil 4.4.a,b’de sırayla verilmiştir. Şekil 4.4.a göstermektedir ki ZnS ince film EM spektrumun görünür bölgesinde oldukça geçirgen (%50 – %88) olduğu görülmektedir. Filmin UV bölgede yüksek optik soğurmaya sahip olduğu da Şekil 4.4.b’den görülmektedir. ZnS ince filmin yasak bant genişliği E_g , Tauc denkleminde (Denklem 4.2) elde edilmiştir:

$$\alpha h\nu = G(h\nu - E_g)^m \quad (4.2)$$

G bir sabit, α soğurma katsayısı, ν foton frekansı, h Planck sabiti ve m ; ZnS (izinli doğru geçişler) için 1/2 değerini alan bir indistir (Tauc 1972, 1974).



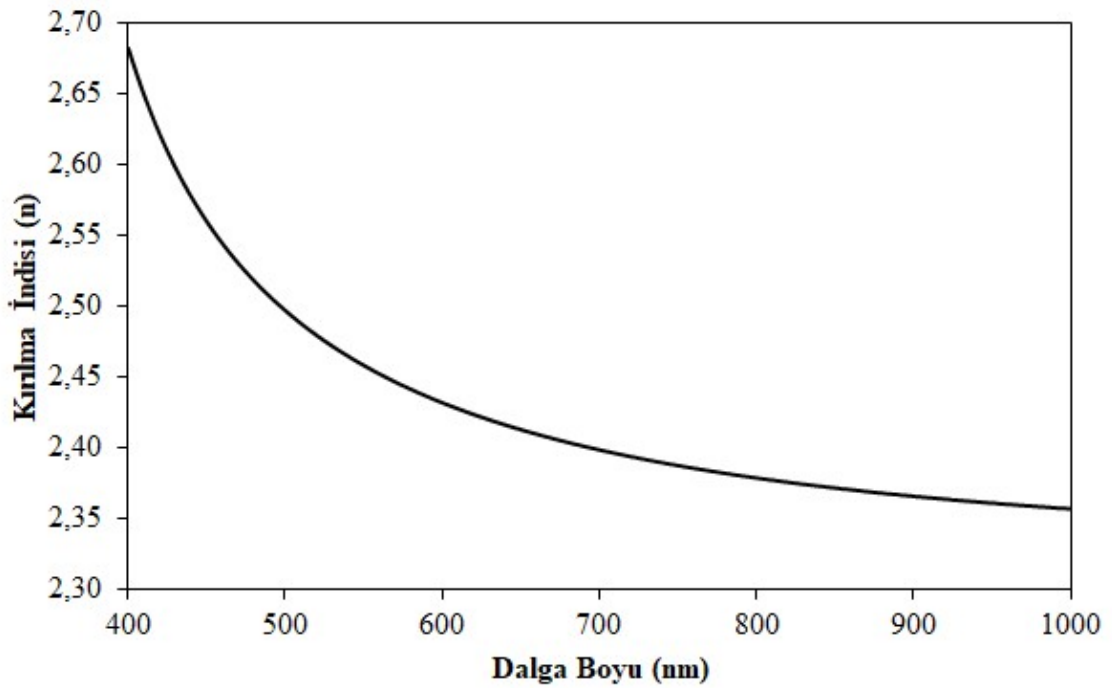
Şekil 4.4. Cam üzerine biriktirilen ZnS ince filmin; **a)** yüzde optik geçirgenlik – dalga boyu spektrumu ve **b)** optik soğurma – dalga boyu spektrumu ve “ $(\alpha hv)^2 - hv$ ” grafiği.

E_g 'nin değeri Şekil 4.4.b'deki ek şekil “ $(\alpha hv)^2 - hv$ ” grafiğinin lineer kısmının hv eksenini kestirilmesi ile yaklaşık 3,78 eV olarak elde edilmiştir. Optik geçirgenlik

spektrumu ve Swanepoel (1980) metodu olarak bilinen Denklem 4.3 kullanılarak 476 nm, 610 nm ve 890 nm dalga boylu fotonlar için ZnS ince filmin kırılma indisi hesaplanmıştır.

$$n(\lambda) = \left[\left(\frac{2s(T_M(\lambda) - T_m(\lambda)) + s^2 + 1}{T_M(\lambda)T_m(\lambda)} \right) + \sqrt{\left(\left(\frac{2s(T_M(\lambda) - T_m(\lambda)) + s^2 + 1}{T_M(\lambda)T_m(\lambda)} \right)^2 - s^2 \right)} \right]^{1/2} \quad (4.3)$$

Ayrıca, *p-tipi* Si alt-taş üzerine kaplanan ZnS ince filmin FilMetrics ince film kalınlık ölçüm sistemiyle dalga boyu – kırılma indisi de ölçülmüş ve Şekil 4.5’te verilmiştir.



Şekil 4.5. Kırılma indisinin foton dalga boyuna bağlı değişimi.

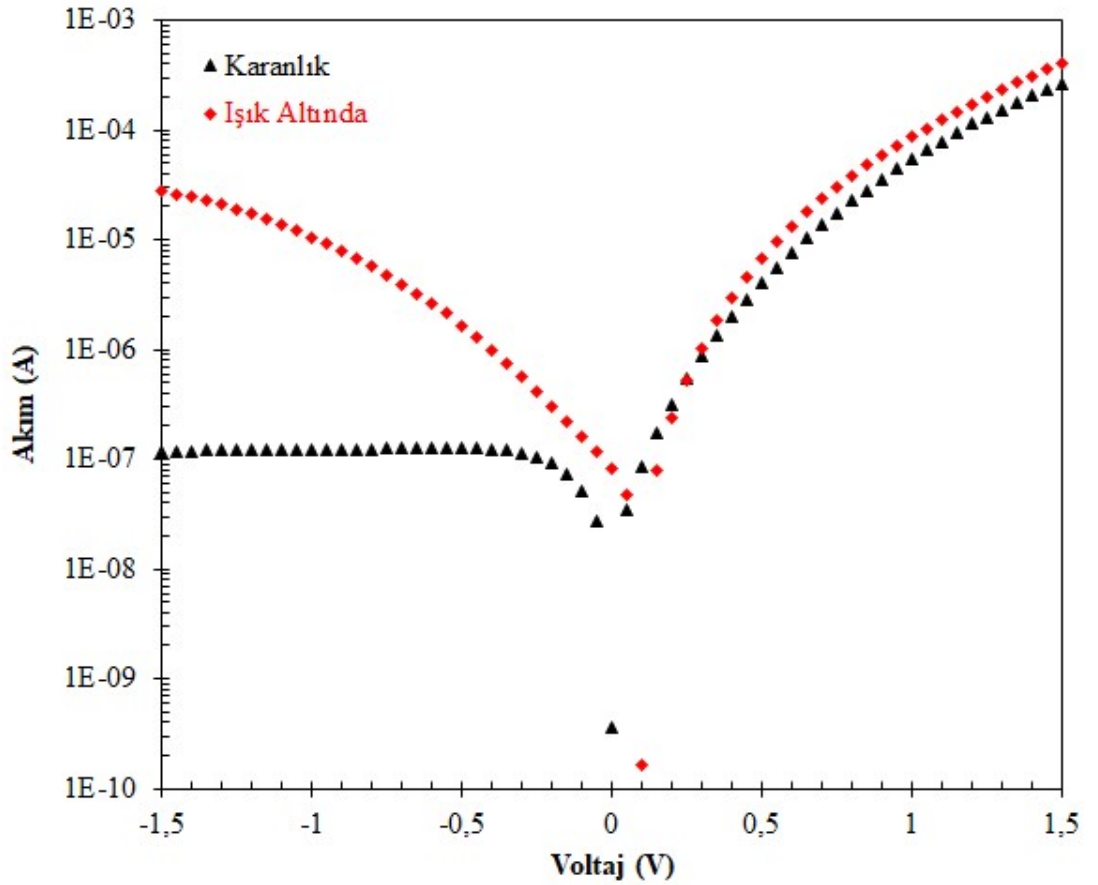
Çizelge 4.1. Swanepoel ile hesaplanan kırılma indisleri ve FilMetrics ile ölçülen değerlerin karşılaştırılması.

λ (nm)	$n(\lambda)$ Swanepoel	$n(\lambda)$ FilMetrics
476	2,57	2,52
610	2,46	2,43
890	2,40	2,37

Bu sonuçlardan cam üzerine kaplanan ZnS ile *p-tipi* Si alt-taş üzerine kaplanan ZnS'nin kırılma indislerinin oldukça yakın olduğu görülmektedir.

4.3. Elektriksel Özellikler

Al/ZnS/p-Si/Al heteroeklem diyotun ışık altında ve karanlık I-V ölçümleri oda sıcaklığında Keithley 2440 5A source-meter ve Oriel 1000 W güneş simülatörü kullanılarak (AM1.5; 100 mW/cm²) gerçekleştirilmiştir ve yarı-logaritmik akım – voltaj grafiği Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Karanlık I-V eğrisinden üretilen diyotun oldukça düşük kaçak akımla iyi bir doğrultucu davranış gösterdiği ve p-n heteroeklem diyot karakteristiğine sahip olduğu görülmektedir. Işık altındaki I-V eğrisinden de diyotun ışığa duyarlı olduğu görülmektedir. Diyotun ışık altında yapılan ölçümde açık devre voltajı $V_o=100$ mV ve kısa devre akımı $I_{sc}=8,11 \times 10^{-8}$ A olarak gözlenmiştir. Diyotun $\pm 1,5$ V’da (karanlık) doğrultma oranı 2200 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.6. Al/ZnS/p-Si/Al heteroeklem diyotun karanlık ve ışık altındaki yarı-logaritmik I-V grafiği.

Heteroeklem diyot için termiyonik emisyon teorisine göre akım, heteroekleme uygulanan besleme voltajının bir fonksiyonu olarak yazılabilir (Sze 1981):

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.4)$$

Burada, I_0 doyma akımı ise şu şekilde ifade edilir:

$$I_0 = AA^*T^2 \left[\exp\left(\frac{q\phi_b}{kT}\right) \right] \quad (4.5)$$

Denklem (4.5)'den bariyer yüksekliği Φ_b 'yi çekersek,

$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (4.6)$$

ifadesini elde ederiz. Yarı-logaritmik (I-V) grafiğinden yaklaşık $5,36 \times 10^{-8}$ A olarak elde edilen doyma akımı, *p-tipi* Si için teorik değeri $A^* = 32 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$ olan Richardson sabiti ve Denklem (4.6) kullanılarak bariyer yüksekliği $\Phi_b = 0,72 \pm 0,02$ eV olarak hesaplanmıştır. Bu değer, Ateş ve ark. (2011) ile Turgut ve ark. (2013)'ün hesapladıkları değerlerle örtüşmektedir. Diyotun idealite faktörü, Denklem (4.4)'ten türetilen Denklem (4.7) ile ifade edilen (Rhoderick, Williams 1988) eşitlik ve yarı-logaritmik I-V grafiğinin ileri besleme eğrisinden elde edilir.

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

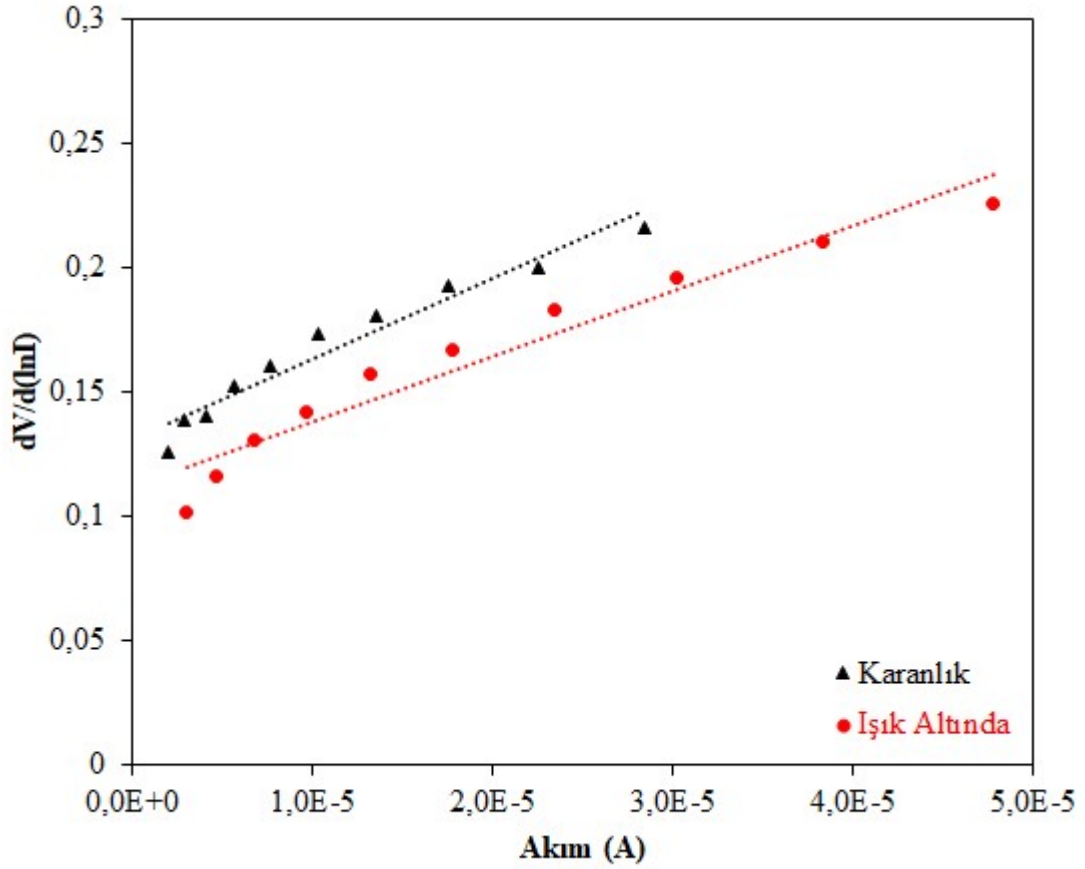
Al/ZnS/*p*-Si/Al heteroeklem diyotun idealite faktörü, düşük besleme voltajı (50 – 200 mV) ve yüksek besleme voltajları (250 – 600 mV) için sırasıyla, 2,72 ve 5,29 olarak hesaplanmıştır. Yani, idealite faktörü artan besleme voltajı ile artmaktadır. Düşük besleme voltajı bölgesindeki idealite faktörünün ideal değer olan 1'den yüksek çıkmasının nedeni ZnS ve *p*-Si eklemesindeki ara yüzey kusurları veya seri direnç etkisi olabilir. TVA ile ürettiğimiz Al/ZnS/*p*-Si/Al diyotun idealite faktörü (2,72), Huang ve

ark. (2011), Ateş ve ark. (2011), Turgut ve ark. (2013)'ün çalışmalarında buldukları değerler ile uyumludur.

Heteroeklem diyotun seri direnç etkisiyle cihaz parametrelerini hesaplamak için Cheung – Cheung (1986) yöntemi de kullanıldı.

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = n \frac{kT}{q} + IR_s \quad (4.8)$$

Şekil 4.7'deki $\frac{dV}{d(\ln I)}$ – I doğrusal grafiğın eğimi ve bu eğimin y-ekseninin kestirilmesi R_s ve $\frac{nkT}{q}$ 'yu verir. Buradan da $\frac{nkT}{q}$ değerin $\frac{kT}{q}$ 'ya bölerek n idealite faktörü bulunur. Karanlık I-V ölçümü için n ve R_s sırasıyla, 5,2 ve 3,2 k Ω olarak, ışık altındaki I-V ölçümü için n ve R_s sırasıyla, 4,7 ve 2,6 k Ω olarak hesaplanmıştır.



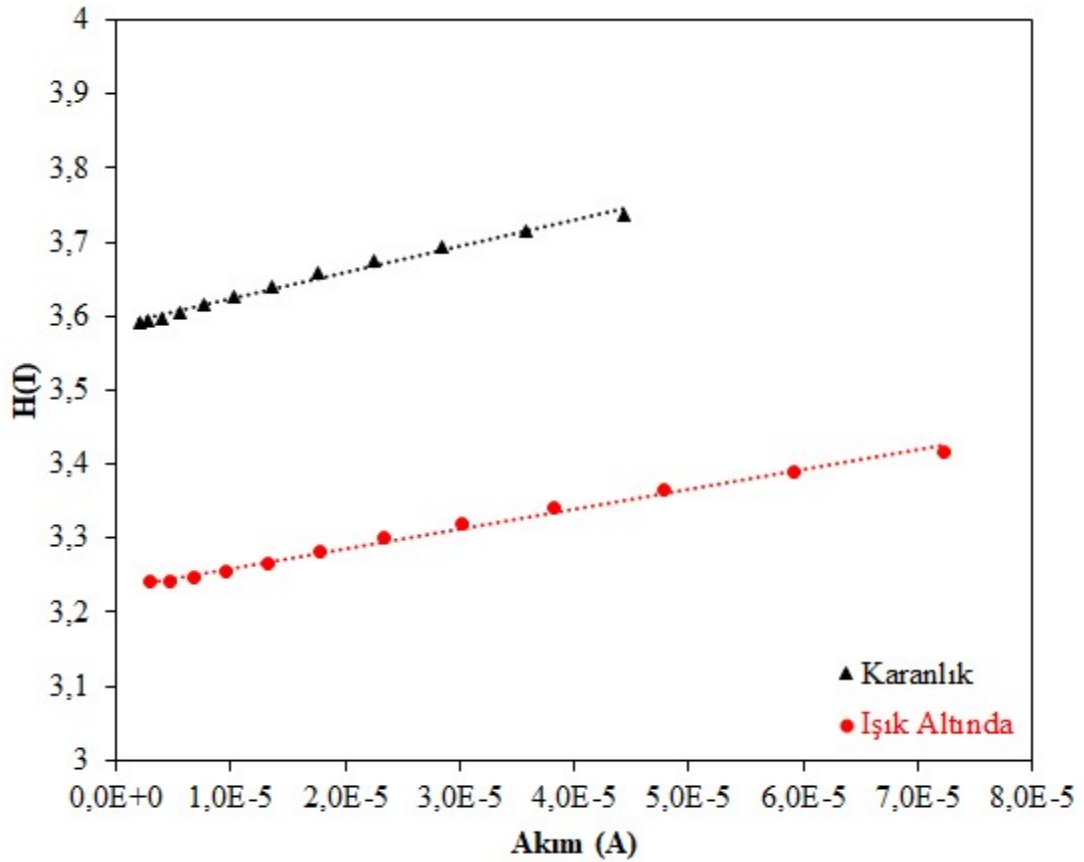
Şekil 4.7. Oda sıcaklığında Al/ZnS/p-Si/Al heteroeklem diyotun deneysel $\frac{dV}{d(\ln I)}$ – I eğrisi.

Ayrıca Φ_b ve R_s , Denklem (4.9) ve (4.10)'da verilen Cheung – Cheung fonksiyonları ve önceden hesaplanan idealite faktörü n kullanılarak da hesaplanabilir.

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

$$H(I) = n\phi_b + IR_s \quad (4.10)$$

Denklem (4.9) ve n idealite faktörü kullanılarak her bir V ve I değeri için $H(I)$ değeri hesaplanır ve $H(I) - I$ grafiği çizilir. Şekil 4.8'de verilen grafiğin lineer bölgesinin eğimi ve eğimin y-eksenini kesmesiyle R_s ve $n\Phi_b$ elde edilir ve $n\Phi_b$ 'nin n 'ye bölünmesiyle Φ_b elde edilir. Karanlık I-V ölçümü ($n = 5,2$) için $H(I) - I$ grafiği (Şekil 4.8) eğiminden R_s ve Φ_b sırasıyla, $4,0 \text{ k}\Omega$ ve $0,69 \pm 0,02 \text{ eV}$ olarak, ışık altındaki I-V ölçümü ($n=4,7$) için R_s ve Φ_b sırasıyla, $2,7 \text{ k}\Omega$ ve $0,69 \pm 0,02 \text{ eV}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.8. Oda sıcaklığında Al/ZnS/p-Si/Al heteroeklem diyotun deneysel $H(I) - I$ eğrisi.

Al/ZnS/p-Si/Al heteroeklem diyotun I-V ölçümlerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çizelge 4.3 ise ilgili literatür verilerini listelemektedir.

Çizelge 4.2. TVA ile üretilmiş olan Al/ZnS/p-Si/Al heteroeklem diyotun I-V incelemesi sonuçları.

Yöntem	Termiyonik Emisyon Teorisi			Cheung – Cheung Metodu		
	n	Φ_b (eV)	I_0 (A)	n	Φ_b (eV)	R_s
Karanlık	2,72	0,72	$5,36 \times 10^{-8}$	5,2	0,69	3,2 k Ω / 4,0 k Ω
Işık Altında	2,34	0,68	$1,31 \times 10^{-7}$	4,7	0,69	2,6 k Ω / 2,7k Ω

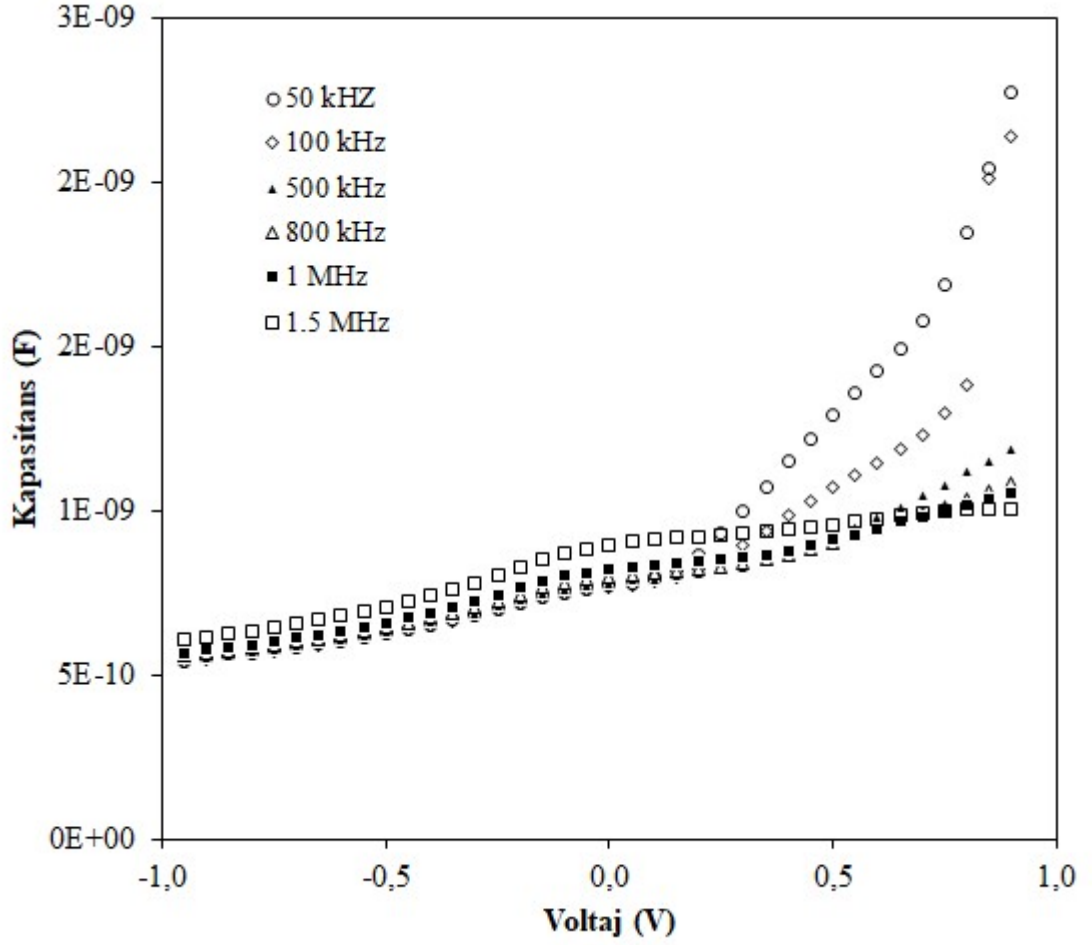
Çizelge 4.3. Literatürdeki ZnS/p-Si heteroeklem diyot üzerine yapılmış çalışmaların I-V incelemesi sonuçları.

	n	Φ_b (eV)	n	Φ_b (eV)	R_s
Huang ve ark. 2011	1,9	-	-	-	-
Ateş ve ark. 2011	2,6 – 1,68	0,71- 0,62	-	-	-
Turgut ve ark. 2013	2,34	0,77	4,3	0,77	12,3 k Ω / 12,5 k Ω

Bu çalışmada elde edilen idealite faktörü ve bariyer yüksekliği değerleri Çizelge 4.3’de verilen çalışmalara ait bulgular ile büyük oranda örtüşmekte, seri direncin ise Turgut ve ark. (2013)’in çalışmasında elde ettiği değere kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir.

Oda sıcaklığında yapılan Hall Etkisi ölçümleriyle, ZnS ince filmin iletkenlik tipi ve yük taşıyıcı yoğunluğu sırasıyla, *n-tipi* ve $(3,10 \pm 0,84) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ olarak, *p-tipi* Si alt-taşın da yük taşıyıcı yoğunluğu ölçülmüş ve $(2,98 \pm 0,03) \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ olarak belirlenmiştir.

Al/ZnS/p-Si/Al heteroeklem diyotun sığa – voltaj (C-V) ölçümleri oda sıcaklığında yürütülmüştür ve ölçümler 50kHz’den 1,5 MHz’e kadar 6 farklı frekans değerinde yapılmıştır. C-V ölçümlerinin amacı, oluşturduğumuz heteroeklem diyotun eklem ara yüzeyi hakkında bilgi sahibi olmak, bariyer yüksekliğini ve yük taşıyıcı yoğunluğunu hesaplamaktır. İleri besleme yönünde artan frekansla sığanın; aynı voltaj değerleri için azaldığı Şekil 4.9’da görülmektedir. Bu durum eklem ara yüzeyindeki muhtemel kusurlardan kaynaklanan katkıların artan frekansı takip edememesi olarak açıklanabilir.



Şekil 4.9. Al/ZnS/p-Si/Al heteroeklem diyotun oda sıcaklığındaki C-V karakteristiği.

Bir $p-n$ heteroeklem diyotun fakirleşmiş bölge sığası; yarıiletken katkı yoğunlukları, etkin diyot alanı ve ekleme uygulanan voltaja bağlı olarak geleneksel heteroeklem teorisi Denklem (4.11) ile ifade edilebilir (Huan ve ark. 2005), (Chirakkara ve Krupanidhi 2012)

$$C^2 = \left[\frac{q \varepsilon_1 \varepsilon_2 N_A N_D}{2(\varepsilon_{s1} N_A + \varepsilon_{s2} N_D)} \right] \frac{1}{(V_{bi} - V)} \quad (4.11)$$

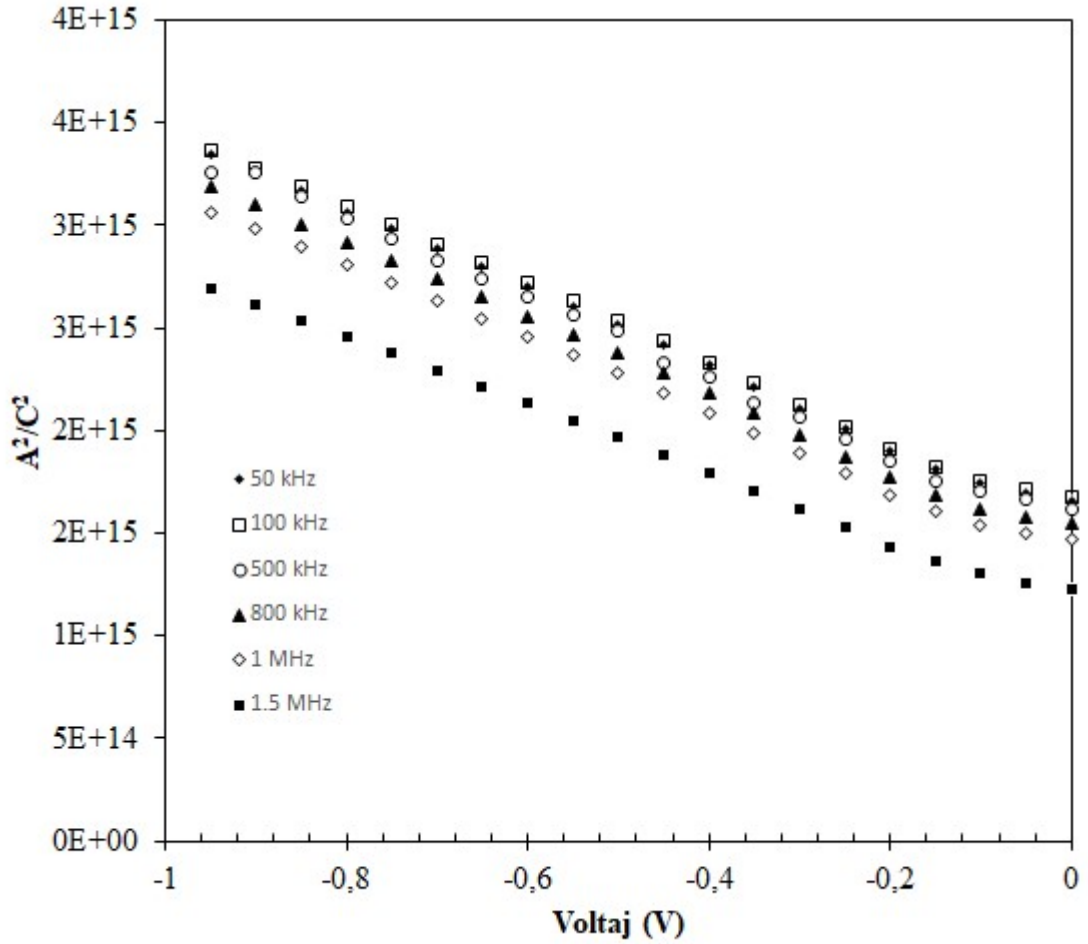
Burada ε_{s1} p -tipi Si alt-taşın dielektrik sabiti, ε_{s2} ZnS ince filmin dielektrik sabitidir. Ancak $N_D \gg N_A$ olduğu için fakirleşmiş bölgenin Si içine doğru genişlediğini yani ZnS/p-Si heteroeklemi tek-tarafli abrupt (keskin) eklem olarak ele alırız ve Denklem (4.11)'i ters besleme gerilimi için Denklem (4.12)'ye indirgeyebiliriz:

$$\frac{A^2}{C^2} = \left[\frac{2(V_{bi} - V)}{q\epsilon_{s1}N_A} \right] \quad (4.12)$$

Şekil 4.10'daki grafikte ölçülen tüm frekans değerleri için $A^2/C^2 - V$ eğrileri verilmiştir. Bu eğrilerin lineer kısımlarının x-eksenini kestirilmesiyle V_{bi} ve bu eğrilerin lineer kısımlarının eğimi ile Denklem (4.13)'den faydalanılarak N_A elde edilir.

$$N_A = \frac{2}{q\epsilon_{s1} \times \text{eğim}} \quad (4.13)$$

Her frekans değeri için elde edilen V_{bi} ve N_A değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.10. Oda sıcaklığında farklı frekanslar için Al/ZnS/p-Si/Al heteroeklem diyotun $A^2/C^2 - V$ karakteristiği.

Al/ZnS/p-Si/Al heteroeklem diyotun bariyer yüksekliği Φ_b 'yi C-V ölçümünden Denklem (4.14)'te verilen ifade kullanılarak hesaplayabiliriz.

$$\phi_b = V_{d0} + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right) \quad (4.14)$$

$$V_{d0} = V_{bi} + \frac{kT}{q}$$

Burada V_{d0} sıfır besleme voltajındaki difüzyon voltajı ve $\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right)$ ifadesi de valans bandının üzerindeki Fermi seviyesini temsil etmektedir. N_V valans bandındaki etkin durum yoğunluğudur ve Si için 300 K'de değeri $1,0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 'tür. Tüm frekans değerleri için $A^2/C^2 - V$ eğrisinden yararlanılarak elde edilen bariyer yüksekliği değerleri azalan frekans ile 0,82 eV'den 0,94 eV'e değişmektedir. Bu artan frekans ile bariyer yüksekliğinin azalması ara yüzeydeki muhtemel kusurlardan veya bir oksit tabakası oluşumundan kaynaklanan katkıların yüksek AC sinyali tarafından bertaraf edilmesi ile açıklanabilir. Bariyer yüksekliğinin 1,5 MHz'deki değeri I-V ölçümlerinden hesaplanan bariyer yüksekliği değerleri ile oldukça yakındır. C-V ölçümlerinden elde edilen ve hesaplanan tüm parametreler Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. C-V ölçüm sonuçlarından elde edilen ve türetilen değerler.

Frekans (kHz)	$N_A \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	$V_{bi} \text{ (V)}$	Φ_b
50	$5,76 \times 10^{15}$	0,723	0,94
100	$5,68 \times 10^{15}$	0,713	0,93
500	$5,82 \times 10^{15}$	0,706	0,92
800	$5,87 \times 10^{15}$	0,678	0,90
1000	$5,99 \times 10^{15}$	0,657	0,88
1500	$6,63 \times 10^{15}$	0,603	0,82

5. SONUÇ

Termiyonik vakum ark metodu ile ZnS/*p*-Si heteroeklem diyotun üretimi başarılı bir şekilde yapılmıştır. Üretilen ZnS/*p*-Si heteroeklemi ve cam üzerine kaplanan ZnS ince film üzerine geniş bir yelpazede yapılan ölçümler ve çalışmalar ile oldukça detaylı bir karakterizasyon yapılmıştır.

XRD analizi sonuçlarını *p*-tipi Si alt-taş üzerine kaplanan ZnS ince filmin *zinblend*e kübik yapıda nano-kristal olduğunu ortaya koymuştur. AFM incelemesinden elde edilen görüntüler ve sonuçlar *p*-tipi Si alt-taş üzerine büyütülen ZnS ince filmin oldukça homojen olduğunu ve yaklaşık 2,64 nm kadar küçük bir yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğunu göstermektedir.

Cam üzerine kaplanan ZnS ince filmin optik soğurma spektrumunun ölçülmesi ve çalışılmasıyla ZnS ince filmin optik yasak bant genişliği 3,78 eV değerinde ZnS'ye ait literatür değerleriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Ayrıca optik geçirgenlik spektrumundan 3 farklı dalga boyu değeri için Swanepoel metodu kullanılarak kırılma indisi hesaplanmıştır. Daha sonra Si alt-taş üzerine büyütülmüş olan ZnS ince filmin FilMetrics ince film kalınlık ölçüm sisteminde yapılan ölçümüyle elde edilen kırılma indisleri kıyaslanmış ve her iki ZnS ince filmin kırılma indislerinin uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bu da TVA yönteminin farklı alt-taşlara ince film büyütme yeteneğinin iyi olduğunu göstermektedir.

Hall Etkisi ölçümü ile ZnS ince filmin *n*-tipi iletkenlik tipine sahip olduğu, taşıyıcı yoğunluğunun da $3,1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ olduğu belirlenmiştir. ZnS/*p*-Si heteroeklem diyotun karanlık ve ışık altında akım- voltaj karakteristikleri incelendi. Bu ölçüm ve çalışmalardan, diyotun mükemmel bir doğrultucu davranış gösterdiği ve ışığa duyarlı olduğu belirlendi. Ayrıca ışık altındaki ve karanlık I-V ölçümlerinden ayrı ayrı idealite faktörleri ve bariyer yükseklikleri; 2,72 ve 0,72 eV olarak hesaplandı. Cheung – Cheung metodu kullanılarak da yine idealite faktörü, bariyer yüksekliği ve seri direnç değerleri; 5,2, 0,69 eV ve 3,2 k Ω – 4,0 k Ω olarak hesaplandı. Bu bariyer yüksekliği değerleri C-V

ölçümlerinde 1,5 MHz frekansı için elde edilen bariyer yüksekliği değeri 0,82 eV ile uyumludur. ZnS/*p*-Si heteroeklemi p-n diyot özelliği göstermektedir.

Bu sonuçlara bakılarak termiyonik vakum ark sisteminin ZnS/*p*-Si heteroekleminin üretimi için uygun bir yöntem olduğu ve diğer üretim yöntemlerine kıyasla zaman, maliyet, üretim süresi ve cihaz kalitesi gibi avantajlar sağladığı söylenebilir.



KAYNAKLAR

- Ateş, A., Güzeldir, B., Sağlam, M. 2011.** ZnS thin film and Zn/ZnS/n-Si/Au-Sb sandwich structure grown with SILAR method and defining the characteristic parameters. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 14: 28-36.
- Bouguila, N., Bchiri, D., Kraini, M., Timoumi, A., Halidou, I., Khirouni, K., Alaya, S. 2015.** Structural, morphological and optical properties of annealed ZnS thin films deposited by spray technique. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26: 9845-9852.
- Cheung S.K., Cheung N.W., 1986.** Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*. 49(2): 85-87.
- Chirakkara, S., Krupanidhi, S.B. 2012.** Study of n-Zno/p-Si (100) thin film heterojunctions by pulsed laser deposition without buffer layer. *Thin Solid Films*, 520: 5894-5899.
- Cullity, B. D. 1978.** Elements of X-ray Diffraction, Addison-Wesley, Reading, MA, USA.
- Hsiao, Y.J., Meen, T.H., Ji, L.W., Tsai, J.K., Wu, Y.S., Huang, C.J. 2013.** Preparation of ZnS microdisks using chemical bath deposition and ZnS/p-Si heterojunction solar cells. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 74: 1403-1407.
- Huang, J., Wang, L.J., Tang, K., Xu, R., Zhang, J.J., Lu, X.G., Xia, Y.B., 2011.** Photoresponse Properties of an n-ZnS/p-Si Heterojunction. *Chin. Phys. Lett.*, 28(12): 127301(3pp).
- Hwang, D.H., Ahn, J.H., Hui, K.N., Hui, K.S., Son, Y.G. 2012.** Structural and optical properties of ZnS thin films deposited by RF magnetron sputtering. *Nanoscale Research letters*, 7: 26.
- Hu, C.C. 2010.** Bond Model of Electrons and Holes: Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., USA, 4-8 pp.
- Lei, Hu., Liu, C.H., Lin, B.X., Fu, Z.X. 2005.** Influence of Interface Charge on Electrical Properties of ZnO/Si Heterojunction. *Chin. Phys. Lett.*, 22(1): 185-187.
- Madugu, M.L. Olusola, O.I., Echendu, O.K., Kadem, B., Dharmadasa, I.M. 2016.** Intrinsic Doping in Electrodeposited ZnS Thin Films for Application in Large-Area Optoelectronic Devices. *Journal of Electronic Materials*, 45(6): 2710–2717.
- Nematollahi, M., Yang, X., Aas, L.M.S., Ghadyani, Z., Kildemo, M., Gibson, U.J., Reenaas, T.W. 2015.** Molecular beam and solar pulsed laser deposition of ZnS:Cr for intermediate band solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 141: 322-330.
- Özen, S., Şenay, V., Pat, S., Korkmaz, Ş. 2015.** Investigation on the morphology and surface free energy of the AlGaIn thin film. *Journal of Alloys and Compounds*, 653: 162-167.
- Rhoderick, E.H., Williams, R.H. 1988.** Metal-Semiconductor Contacts. Clarendon, Oxford, 257pp.
- Salih, A.T., Najim, A.A., Muhi, M.A.H., Gbashi, K.R. 2017.** Single-material multilayer ZnS as anti-reflective coating for solar cell applications. *Optics Communications*, 388: 84-89.
- Swanepoel, R. J. (1980).** Applications and processing of transparent conducting oxides. *J. Phys. E: Sci. Instrum*, 16: 1214.
- Sze, S.M. 1981.** Physics of Semiconductor Devices 2nd ed., John Willey and Sons inc., New Jersey, USA, 256 pp.

- Sze S.M. 2002.** Semiconductor Devices: Physics and Technology 2nd ed., John Willey and Sons inc., New Jersey, USA, 28-30 pp.
- Sze S.M., Kwok, K.N. 2007.** Physics of Semiconductor Devices 3rd ed., John Willey and Sons, New Jersey, USA, 789 pp.
- Şenay, V., Özen, S., Pat, S., Korkmaz, Ş. 2016.** Optical, structural, morphological and compositional characterization of a Co-doped GaAs semiconducting thin film produced by thermionic vacuum arc. *Journal of Alloys and Compounds*, 663: 829-833.
- Tapan, I., Ahmetoglu, M. 2003.** A ZnS–Si hetero-junction photodiode for short wavelength photon detection. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 510: 92-96.
- Tauc, J.C. 1972.** Optical Properties of Solid, North-Holland, Amsterdam, 372 pp.
- Tauc, J. 1974.** Amorphous and Liquid Semiconductor, Plenum Press, London, New York, 175 pp.
- Turgut, G., Keskenler, E.F., Aydın, S., Doğan, S., Duman, S., Sönmez, E., Esen, B., Düzgün, B. 2013.** A study on characterization of Al/ZnS/p-Si/Al heterojunction diode synthesized by sol-gel technique. *Materials Letters*, 102-103: 106-108.
- Wang, C.F., Hu, B., Li, W.B., Yi, H.H. 2014.** Luminescence properties of ZnS/porous Si composites. *Optik*, 125: 554-556.
- Xu, H.J., Li, X.J. 2009.** Structure and photoluminescent properties of a ZnS/Si nanoheterostructure based on a silicon nanoporous pillar array. *Semiconductor Science and Technology*, 24: 075008 (6pp).
- Xu, X., Bullock, J., Schelhas, L.T., Stutz, E.Z., Fonseca, J.J., Hettick, M., Pool, V.L., Tai, K.F., Toney, M.F., Fang, X., Javey, A., Wong, L.H., Ager, J.W. 2016.** Chemical Bath Deposition of p-Type Transparent, Highly Conducting $(\text{CuS})_x:(\text{ZnS})_{1-x}$ Nanocomposite Thin Films and Fabrication of Si Heterojunction Solar Cells. *Nano Letters*, 16(3): 1925-1932.
- Yacobi, B. G. (2003).** Semiconductor materials: An Introduction to Basic Principles, Springer Science & Business Media, New York, USA, 117-120, 146-147 pp.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hüseyin Kaan KAPLAN
Doğum Yeri ve Tarihi : Finike/Antalya, 07.09.1988
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Finike Cumhuriyet Çok Programlı Lisesi 2005
Lisans : Uludağ Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik 2015
Yüksek Lisans : Uludağ Ü. Fen Bilimleri Ens. Fizik ABD 2017

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : -
İletişim (e-posta) : kaplanhkaan@gmail.com
Yayınları :

Kaplan, H.K., Sarsıcı, S., Akay, S.K. 2016. Fotovoltaik Hücre Uygulamaları İçin Cam Üzerine RF Magnetron Sıçratma ile Oluşturulmuş ZnO İnce Filmlerin Elektrik ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi. V. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 12-13 Mayıs 2016, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.

Kaplan, H.K., Sarsıcı, S., Akay, S.K. 2016. Photo-Detector Potential of ZnS/n-Si Isotype Heterojunction Device Fabricated By Thermionic Vacuum Arc. Turkish Physical Society 32nd International Physics Congress, 6-9 September 2016, Bodrum, TURKEY.

Sarsıcı, S., Kaplan, H.K., Akay, S.K. 2016. Electrical and Optical Investigation of ZnS/p-Si Heterojunction Fabricated By Using Thermionic Vacuum Arc. Turkish Physical Society 32nd International Physics Congress, 6-9 September 2016, Bodrum, TURKEY.