



**KİMYASAL PÜSKÜRTME METODUYLA
ÜRETİLEN CdS İNCE FİLMİNİN Cd/CdS/p-Si/Al
YAPIDA KULLANILMASI**

Şeydanur AKTAŞ

**Yüksek Lisans Tezi
Fizik Anabilim Dalı
Katıhal Fiziği Bilim Dalı
Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM
2017
Her hakkı saklıdır**

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KİMYASAL PÜSKÜRTME METODUYLA ÜRETİLEN CdS İNCE
FİLMİNİN Cd/CdS/p-Si/Al YAPIDA KULLANILMASI

Şeydanur AKTAŞ

FİZİK ANABİLİM DALI
Katıhal Fiziği Bilim Dalı

ERZURUM
2017

Her Hakkı Saklıdır



TEZ ONAY FORMU

KİMYASAL PÜSKÜRTME METODUYLA ÜRETİLEN CdS İNCE FİLMİNİN Cd/CdS/p-Si/Al YAPIDA KULLANILMASI

Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM danışmanlığında, **Şeydanur AKTAŞ** tarafından hazırlanan bu çalışma, **23/02/2017** tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **FİZİK** Anabilim Dalı **KATİHAL FİZİĞİ** Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan: **Prof. Dr. Songül DUMAN**

İmza :

Üye : **Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM**

İmza :

Üye : **Doç. Dr. Betül GÜZELDİR**

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun **02.03/2017** tarih ve **9/80** nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KİMYASAL PÜSKÜRTME METODUYLA ÜRETİLEN CdS İNCE FİLMİNİN Cd/CdS/p-Si/Al YAPIDA KULLANILMASI

Şeydanur AKTAŞ

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı
Katıhal Fiziği Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM

Yüksek lisans tezi olarak hazırladığımız bu çalışmada, taban malzeme olarak *p*-tipi Si kristali kullanıldı. Kullanılan kristal taban malzemenin mat yüzeyine alüminyum metali buharlaştırılarak omik kontak yapıldı. Diğer yüzeyine ise Kimyasal Püskürtme (Spray Pyrolysis) yöntemi ile CdS ince filmi büyütüldü. Büyütülen ince filmin yüzey özellikleri numunenin SEM görüntüsü alınarak incelendi. SEM görüntüsü incelendiğinde büyütülen CdS ince filminin *p*-Si kristal yüzeyini hemen hemen homojen olarak kapladığı görüldü. XRD ölçümleri filmin polikristal yapıda büyüdüğünü gösterdi. Soğurma ölçümü alınarak CdS ince filminin yasak enerji aralığı 2.29 eV olarak hesaplandı. Yüzey özellikleri incelenen CdS filmin üzerine 10^{-7} torr basınçta Cd metali buharlaştırılarak Cd/CdS/*p*-Si/Al sandviç yapısı elde edildi. Çalışmamızın ilk aşamasında elde ettiğimiz sandviç yapının 80 K-300 K sıcaklık aralığında *I*-*V* (akım-voltaj) ve oda sıcaklığında *C*-*V* (kapasite-voltaj) karakteristikleri incelendi. *I*-*V* karakteristikleri incelenirken diyot parametrelerini hesaplamada Termionik Emisyon, Norde ve Cheung metodları kullanıldı. Bu metodlarla hesaplanan diyot parametreleri karşılaştırılarak birbirleriyle uyumu incelendi. Doğru beslem *I*-*V* karakteristiklerinden idealite faktörleri, engel yükseklikleri ve seri direnç değerleri hesaplandı ve bu parametrelerin değişiminin “engel inhomojenliği modeline” uyduğu görüldü. Cd/CdS/*p*-Si/Al sandviç yapının *C*-*V* ölçümleri oda sıcaklığında farklı frekanslarda (50 kHz, 100 kHz, 300 kHz, 500 kHz ve 1000 kHz) alındı. Ters beslem C^{-2} -*V* grafiğinden ise difüzyon potansiyeli, Fermi enerji seviyesi ve engel yüksekliği değerleri elde edildi. Sonuç olarak, Kimyasal Püskürtme metoduyla *p*-Si yarıiletkeni üzerine büyütülen CdS ince filminin Cd/*p*-Si metal-yarıiletken kontaklarda güvenle kullanılabileceği görüldü.

2017, 79 sayfa

Anahtar Kelimeler: Schottky Kontak, Kimyasal Püskürtme Metodu, Sandviç Yapı, CdS İnce Film, Norde Metodu, Cheung Metodu

ABSTRACT

Master Thesis

Cd/CdS/p-Si/Al STRUCTURE USING OF THE CdS THIN FILM OBTAINED WITH SPRAY PYROLYSIS METHOD

Şeydanur AKTAŞ

Atatürk University
Graduate School of Naturel and Applied Sciences
Department of Physics
Department of Solid State Physics

Supervisor: Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM

In our study, prepare a master's thesis, as p-type crystalline Si substrate was used. Omic contact was performed by evaporating Al metal on the matt surface of crystal. On the other surface of it CdS thin film were enlarged with the technique of Spray Pyrolysis. Structural characteristics of the grown thin film was examined SEM image. When examining SEM image of CdS thin film were totally covered the p-Si crystal surface of it was nearly homogeneous. By using absorbtion measurements of the CdS thin films energy bandgap were calculated as 2.29 eV. On the CdS films whose surface features were investigated, at 10^{-7} torr pressure was obtained Cd/CdS/p-Si/Al sandwich structure by evaporating Cd. Firstly, the current-voltage (I-V) characteristics on 80K between 300K and capacitance-voltage (C-V) characteristics at room temperature of the this structure was measured. In the calculation of diode parameters from I-V characteristics, Thermionic Emission, Norde and Cheung methods were used. The calculated parameters with different method were compared with each other. The C-V measurements of the Cd/CdS/p-Si/Al sandwich structure were obtained at room temperature at 50kHz, 100kHz, 300kHz, 500kHz and 1000kHz. From reverse bias C^{-2} -V graphics diffusion potentials, Fermi energy level and barrier heights values were obtained. Consequently, it was seen that CdS thin film grown on p-Si semiconductor will be used confidently in Cd/p-Si metal-semiconductor contacts thanks to Spray Pyrolysis method.

2017, 79 pages

Keywords: Schottky Contacts, Spray Pyrolysis Method, Sandwich Structure, CdS Thin Film, Norde Method, Cheung Method.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak hazırladığım bu çalışma Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünde yapılmıştır. Tez konumu belirlemede, çalışmalarımı yapmamda benden desteğini ve engin bilgisini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarım sırasında çalıştığım numunelerin hazırlanması ve ölçümlerin alınıp hesaplamaların yapılmasında bana büyük desteği olan Sayın Doç. Dr. Betül GÜZELDİR'e, Sayın Öğr. Gör. Oğuzhan ÖZAKIN'a, Ahmet TAŞER'e, Fatma YILDIRIM'a ve laboratuvardaki çok kıymetli çalışma arkadaşlarım Ebru KAYA'ya, Melike EMELLER'e çok teşekkür ederim. Bu çalışmanın gerçekleşmesine imkan sağlayan başta Fizik Bölümü başkanı olmak üzere tüm Fizik Bölümü öğretim üye ve elemanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca bana destek olan, sabır gösteren başta çok değerli ailem, teyzem Nermin KARATAŞ ve eşi Rahmi KARATAŞ, arkadaşlarım Zeynep GÜLTEKİN ve Fatmanur BABAGİL'e çok teşekkür ederim.

Şeydanur AKTAŞ

Şubat, 2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	13
2.1. Metal-Yarıiletken Eklemler.....	13
2.1.1. Temel kavramlar.....	14
2.1.2. Schottky ve omik kontaklar.....	15
2.1.3. Schottky diyodun kapasite-voltaj karakteristikleri.....	20
2.2. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken Diyotlar	21
2.2.1. İdeal MIS diyot için band diyagramı.....	22
2.2.2. Uzay-yükü bölgesi.....	24
2.2.3. MIS diyodun kapasitesi	30
2.2.4. İdeal olmayan MIS diyotlar.....	32
2.3. Norde Fonksiyonları Kullanılarak Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi	33
2.4. Cheung Fonksiyonları Kullanılarak Schottky Diyot Karakteristiklerinin Elde Edilmesi	36
2.5. Yapısal ve Yüzeysel Karakterizasyon Teknikleri	38
2.5.1 X- Işını difraksiyonu	38
2.5.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	41
2.5.3. X Işınlarnı kullanarak enerji dağılım analizi (EDAX)	42
2.6. Yarıiletkenlerde Optik Soğurma	43
2.6.1. Direkt ve indirekt bandgap soğurması.....	44
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	46
3.1. p-Si Kristalinin Temizlenmesi.....	46

3.2. p-Si Kristaline Omik Kontak Yapılması	47
3.3. Kimyasal Püskürtme Yöntemiyle CdS İnce Filminin p-Si Yarıiletkeni Üzerinde Büyütülmesi	48
3.4. Cd/CdS/p-Si/Al Yapının Üretilmesi ve Elektriksel Karakterizasyonu	50
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	52
4.1. Giriş	52
4.2. CdS İnce Filmlerinin Optik, Yapı ve Yüzeysel Özelliklerinin Analizleri	52
4.2.1. Soğurma ölçümlerinin alınması	52
4.2.2. CdS ince filminin X-Işını difraksiyonu	54
4.2.3. CdS İnce filminin yüzey görüntüsü	55
4.2.4. CdS ince filminin X-ışınlarını kullanarak enerji dağılım analizi (EDAX)	56
4.3. Cd/CdS/p-Si/Al Yapının Akım-Voltaj Özelliklerinin Numune Sıcaklığına Bağlı Olarak İncelenmesi	57
4.4. Arayüzey Hal Yoğunluğunun Hesaplanması	65
4.5. Cd/CdS/p-Si/Al Yapının Oda Sıcaklığında Yapılan C-V Ölçümlerinden Diyot Parametrelerinin Hesaplanması	67
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	72
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ	80

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	Diyodun etkin alanı
A*	Richardson sabiti
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
C ⁻² -V	Ters beslem kapasitansın karesi- Gerilim
CBD	Kimyasal Banyo Biriktirme
C-f	Kapasite-frekans
C _i	Yalıtkanın kapasitesi
C-V	Kapasite-Voltaj
CVD	Chemical Vapor Deposition
DC	Doğru Akım
E	Elektrik alan
E _c	İletkenlik bandının tabanı
EDAX	Enerji Dağılımlı X-ışını spektrometresi
E _{Fm}	Metalin Fermi enerjisi
E _{FS}	Yarıiletkenin Fermi enerjisi
E _v	Valans bandının tavanı
F(V)	Norde fonksiyonu
FE-SEM	Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu
I ₀	Doyma akımı
I _{sc}	Kısa Devre Akımı
I-V	Akım – Voltaj
I-V-T	Akım-Voltaj-Sıcaklık
J	Akım yoğunluğu
k	Boltzmann sabiti
L _D	Boşluklar için debye uzunluğu
m*	Etkin kütle
MBE	Molecüler Beam Epitaxi
m _e	Elektronun kütlesi
MOCVD	Metal-Organic Chemical Vapor Deposition

n	İdealite Faktörü
N_a	Akseptör konsantrasyonu
N_d	Donor konsantrasyonu
N_{ss}	Arayüzey Hal Yoğunluğu
p_i	Asal hol yoğunluğu
PL	Fotoluminesans
PLD	Pulsed Laser Deposition
q	Elektronun yükü
Q_d	Deplasyon bölgesi yükü
R_s	Seri Direnç
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SILAR	Sıralı İyonik Tabaka Adsorption ve Reaksiyonu
T	Sıcaklık
TE	Termoiyonik Emisyon
UV	Morötesi Işıklar
V_d	Difüzyon potansiyeli
V_{FB}	Düz bant voltaj kayması
V_{oc}	Açık Devre Voltajı
W	Uzay yükü bölgesinin genişliği
XRD	X-Işını Difraksiyonu
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
Φ_b	Engel Yüksekliği
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ	Elektron ilgisi
Ψ_B	Asal ve gerçek Fermi seviyeleri arası fark
Ψ_s	Yüzey potansiyeli
λ	Dalga boyu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kontak durumundan önce metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları ve Fermi enerjileri.....	14
Şekil 2.2. Metal ve yarıiletkenin kontak haline getirildiği zaman dengedeki durumu	15
Şekil 2.3. Dört mümkün metal-yarıiletken eklem şekillerinden yukarıda verilen ikisi Schottky kontaklıdır	17
Şekil 2.4. Dört mümkün metal-yarıiletken eklem şekillerinden yukarıda verilen ikisi Omik kontaklıdır	18
Şekil 2.5. Bir metal- (n-tipi) yarıiletken Schottky kontaklı band diyagramı	19
Şekil 2.6. Dış gerilimin $V=0$ olduğu (a) n-tipi (b) p-tipi yarıiletkenlerle yapılan bir ideal MIS diyodun enerji band diyagramı	23
Şekil 2.8. Bir MIS diyodun p-tipi yarıiletkenin yüzeyindeki enerji band diyagramı	25
Şekil 2.9. $N_A=4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ve $T=300 \text{ K}$ de p-tipi silikon için yüzey potansiyeli Ψ_s üzerine uzay yükünün bağıllığı	28
Şekil 2.10. Tersinim durumundaki ideal MIS diyodun (a) band diyagramı, (b) yük dağılımı, (c) elektrik alanı ve (d) potansiyeli	29
Şekil 2.11. (a) i) düşük frekanslar, ii) yüksek frekanslar ve iii) derin tükenim için bir MIS diyodun kapasitesinin besleme şematik bağıllığı. (b) bir Si/SiO ₂ diyodun ($N_A= 1.45 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) yüksek frekans kapasitesi.....	31
Şekil 2.12. X-ışınları tüpünün şematik diyagramı	39
Şekil 2.13. Bir kristal tarafından X-ışınlarının kırınımının şeması.....	39
Şekil 2.14. SEM in şeması	41
Şekil 2.15. Örnek bir EDAX grafiği	43
Şekil 2.16. Yarıiletken tarafından bir fotonun optik soğrulması	44
Şekil 2.17. Yarıiletkenlerde (a) direk bandgap soğurması, (b) indirek bandgap soğurması	45
Şekil 3.1. Buharlaştırma işlemi için kullanılan cihaz... ..	47
Şekil 3.2. Tavlama Fırını	47
Şekil 3.3. Kimyasal püskürtme işleminin yapıldığı cihaz.....	48

Şekil 3.4. Cd/CdS/p-Si/Al yapının şematik görünümü.....	50
Şekil 3.5. I-V ölçüm sistemi	51
Şekil 3.6. C-V ölçüm sistemi	51
Şekil 4.1. Cam altlık üzerine büyütülen CdS ince filminin soğurma-dalgaboyu grafiği	53
Şekil 4.2. Cam altlık üzerine büyütülen CdS ince filminin $\alpha^2-h\nu$ grafiği	53
Şekil 4.3. Cam altlık üzerine büyütülmüş CdS ince filminin X- Işını difraksiyonu.	54
Şekil 4.4. p-Si yarıiletken altlık üzerine büyütülmüş CdS ince filminin X- Işını difraksiyonu	55
Şekil 4.5. p-Si üzerine kimyasal püskürtme yöntemi ile büyütülen CdS ince filminin SEM görüntüsü.....	56
Şekil 4.6. Kimyasal püskürtme metodu ile yarıiletken altlık üzerine büyütülen CdS ince filminin EDAX analizi	57
Şekil 4.7. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının sıcaklığa bağlı $\ln(I)$ -V grafikleri	60
Şekil 4.8. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının sıcaklığa karşı düz beslem voltajı değişimleri.....	60
Şekil 4.9. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının numune sıcaklığına bağlı $F(V)$ -V grafikleri.....	61
Şekil 4.10. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının numune sıcaklığına bağlı $dV/d(\ln I)$ - I grafikleri	62
Şekil 4.11. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının numune sıcaklığına bağlı $H(I)$ - I grafikleri.....	62
Şekil 4.12. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının termoiyonik emisyon, Cheung ve Norde metodları yardımıyla hesaplanan engel yüksekliği değerlerinin numune sıcaklığı ile değişimleri	63
Şekil 4.13. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının termoiyonik emisyon ve Cheung metodları yardımıyla hesaplanan idealite faktörü değerlerinin numune sıcaklığı ile değişimleri	64
Şekil 4.14. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının Norde ve Cheung metodları yardımıyla hesaplanan seri direnç değerlerinin sıcaklıkla değişimleri	64
Şekil 4.15. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının arayüzey hal yoğunluğunun arayüzey hal enerjisine karşı değişimleri.....	66

- Şekil 4.16.** Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının oda sıcaklığında ve 50 kHz, 100 kHz, 300 kHz, 500 kHz ve 1 MHz frekans değerlerinde alınan doğru ve ters beslem C - V değişimleri 68
- Şekil 4.17.** Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının oda sıcaklığında ters beslem durumunda ve 50 kHz, 100 kHz, 300 kHz, 500 kHz ve 1 MHz frekans değerlerinde $1/C^2$ nin V 'ye göre değişimleri 69



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Dört muhtemel metal-yarıiletken eklem şekillenimleri ve elde edilen kontak tipleri.	18
Çizelge 3.1. Çözelti hazırlamada kullanılan bileşiklerin molariteleri ve molekül ağırlıkları	49
Çizelge 4.1. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının numune sıcaklığına bağlı olarak termoionik emisyon, Norde ve Cheung metodları yardımıyla hesaplanan parametreleri	67
Çizelge 4.2. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının oda sıcaklığında ve farklı frekanslarda ters beslem $C^{-2} - V$ grafiklerinden elde edilen parametreleri.....	71

1. GİRİŞ

Günümüz elektronik teknolojisinde Schottky diyotlar, üretim kolaylığı ve karakteristiklerinin iyi bilinmesi sebebiyle yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Schottky diyotlar; güneş pillerinde, alçak gerilim devrelerinde, dedektörlerde ve elektronik sanayinin daha birçok kısmında geniş bir yelpazede uygulama alanına sahiptirler.

Güneş pillerinin ve diğer optoelektronik cihazlarının yapısında yarıiletkenler önemli bir yere sahiptirler. Bu yapılarda kullanılan yarıiletkenler ise çoğunlukla ince film olarak imal edilmektedir. Yarıiletken ince filmlerin büyütülmesinde saçtırma (Sputtering), moleküler demet epitaksi (MBE), sol-jel, metal organik kimyasal buharlaştırma (MOCVD), vakumda buharlaştırma, Successive Ionic Layer Adsorption and Reactive (SILAR), kimyasal banyo biriktirme (CBD) ve kimyasal püskürtme (Spray Pyrolysis) gibi metotlar kullanılmaktadır.

Özkan (2007), yaptığı doktora çalışmasında CdS filmleri ultrasonik kimyasal püskürtme yöntemiyle $300\pm5^{\circ}\text{C}$ sıcaklığındaki cam tabanlar üzerine büyütmüştür. 6 farklı sıcaklık değerinde ayrı ayrı 3 saat boyunca hava ortamında termal tavlama yapmıştır. Daha sonra filmlerin kalınlık ölçümünü yapmış ve oda sıcaklığında elde edilen XRD (X-Ray Diffraction) desenlerinden tanecik büyüklüklerini hesaplamıştır. Numunelerin temel absorptans spektrumları yardımıyla; geçirgenliklerini, kırılma indislerini, yasak enerji aralıklarını ve Urbach parametrelerini hesaplamıştır. Filmlerin öz dirençlerini karanlık ve aydınlık ortamlarda hesaplayarak filmlerin fotoiletkenlikleri hakkında hesaplamalar yapmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda filmlerin ışığa karşı duyarlı olduklarını gözlemlemiştir. Filmlerin AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu), SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve EDAX (Enerji Dağılımlı X-ışını Spektrometresi) görüntülerini almış ve bunlara dayanarak filmlerin hegzagonal yapıda büyüdüğünü belirlemiştir. Dislokasyonların az olduğu numunelerde kristalleşmenin daha iyi olduğunu, termal tavlama sonucunda numunelerin optiksel iletiminin ve iletkenliklerinin arttığını, dielektrik sabitlerinin ise azaldığını ifade etmiştir. Çözeltinin karıştırma hızının,

çözeltiye eklenen tioüre miktarının ve Cd konsantrasyonlarının filmler üzerinde ne gibi değişikliklere sebep olduklarını da araştırmıştır. AFM görüntülerinden herbir numune için pürüzlülük katsayılarını hesaplamış ve bu katsayının düşük olduğu numunelerin yapısal, elektriksel ve optiksel olarak en iyi numuneler olduklarını belirlemiştir. Daha kaliteli filmler elde etmek için deney şartlarının oldukça önemli olduğunu ve sabit taban yerine döner taban kullanılmasının daha iyi olacağını söylemiştir. Tavlama işleminin sonucunda filmlerin iyileştirilebildiğini gözlemlemiş ve uygun tavlama sıcaklığının 300 °C olduğunu söylemiştir. Deneysel çalışmalarının sonucunda bu CdS filmlerin heteroeklem yapılarda kullanılması halinde pil verimliliğinin artacağı tespit edilmiştir.

Khallaf *et al.* (2008), yaptıkları çalışmada CBD yöntemi ile büyütülen CdS filmlerde Cd kaynakların etkisini geniş çapta araştırarak rapor etmişlerdir. Çalışmada kadmiyum sülfat, kadmiyum klorit, kadmiyum iyodür ve kadmiyum asetat olmak üzere dört farklı kadmiyum kaynak kullanmışlardır. Filmlerin elektrik/optik özellikleri, film kalınlığı kristal yapısı ve yüzey morfolojisi üzerine Cd kaynakların etkisini çalışmışlardır. Film büyüme oranının ve yasak enerji aralığının kadmiyum kaynaklara duyarlı olduğunu bulmuşlardır. Kadmiyum klorit ve kadmiyum iyodür kullanıldığında düşük öz dirençli ve yüksek mobiliteli filmler elde etmişlerdir.

Sağlam *et al.* (2009), SILAR yöntemini kullanarak Cd/CdS/n-Si/Au-Sb sandviç yapıyı hazırlamışlardır. CdS ince film, n-Si altlık üzerine direkt olarak büyütülmüştür. Cd/CdS/n-Si/Au-Sb sandviç yapısının oda sıcaklığında alınan I-V karakteristikleri doğrultma özelliği göstermiştir. I-V karakteristikleri üzerine termal tavlama etkilerini elde etmek amacıyla bu yapı N₂ gazı altında 50°C, 100°C, 200°C ve 300°C’de 3 dakika tavlansmıştır. Yapının engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç gibi karakteristik parametrelerini düz beslem I-V karakteristiklerinden hesaplamışlardır. Bu sonuçlardan yola çıkarak 300°C’ye kadar yapılan tavlama işlemlerinde karakteristik parametrelerin önemli ölçüde değişmediğini gözlemlemişlerdir.

Güzeldir *et al.* (2010), Cd/CdS/n-GaAs/In, Zn/ZnS/n-GaAs/In ve Cu/CuS/n-GaAs/In yapılarını oda sıcaklığında SILAR metodu ile hazırlamışlardır. İdealite faktörü ve engel

yüksekliği gibi karakteristik parametreleri, termoiyonik emisyon metodu vasıtasıyla I-V ölçümlerinden elde etmişlerdir. Seri direnç değerlerini ise Cheung fonksiyonlarını kullanarak, yapının yüksek akım bölgesinde hesaplamışlardır. Düz beslem gerilimi altında alınan I-V karakteristiklerini kullanarak arayüzey hal yoğunluğunu (N_{ss}) elde etmişlerdir. N_{ss} karakteristiklerine baktıklarında, hal yoğunluğunun bant ortasından iletkenlik bandının tabanına doğru exponansiyel olarak yükseldiğini görmüşlerdir. Sandviç yapıların deneysel değerlerini farklı metotlarla hesaplamışlar ve şu değerleri elde etmişlerdir: I-V metoduyla Cd/CdS/n-GaAs/In yapı için idealite faktörünü 1.567 ve engel yüksekliğini 0.603 eV olarak bulmuşlardır. Aynı hesaplamaları Zn/ZnS/n-GaAs/In için yaptıklarında $n=1.604$ ve $\Phi_b=0.623$ eV ve Cu/CuS/n-GaAs/In için ise $n=1.665$ ve $\Phi_b=0.589$ eV olarak hesaplamışlardır. Cheung metoduyla Cd/CdS/n-Si/Au-Sb yapının idealite faktörünü 1.78; Zn/ZnS/n-GaAs/In yapı için 1.863 ve Cu/CuS/n-GaAs/In yapı için ise 1.902 olarak elde etmişlerdir. Bu yapılar için engel yüksekliklerini de sırasıyla 0.716 eV, 0.722 eV ve 0.691 eV olarak bulmuşlardır. Özet olarak bu çalışmada bu yapıların iyi bir diyot davranışı gösterdiğini görmüşlerdir. Elektriksel karakterizasyonlardan elde ettikleri sonuçlara göre, bu yapıların gelecekte entegre devreler ve diğer elektronik cihazların yapısında doğrultucu kontak olarak kullanılabilir olduğunu söylemişlerdir.

Yakuphanoglu *et al.* (2010), yaptıkları çalışmada sol-jel metodu ile nanocluster-n-CdO/p-Si heteroeklem diyot imal etmişlerdir. Nanocluster CdO filmlerin yapısını ve optik özelliklerini incelemişlerdir. CdO filmlerin, kübik yapıda kristalleştığını ve polikristal olduklarını gözlemlemişlerdir. SEM görüntülerinden; CdO filmin yüzey morfolojisinin hemen hemen homojen olduğunu ve CdO filmin, nanopartiküllerin bir araya gelmeleri ile oluşturulmuş kümelerden meydana geldiğini görmüşlerdir. CdO filmlerin optik band-gap aralığını optik soğurma metodunu kullanarak 2.45 eV olarak bulmuşlardır. p-Si yarıiletken ve CdO geçirgenliğinden oluşmuş p-n heteroeklemlerin elektriksel özelliklerini, I-V ve C-f metodları ile incelemişlerdir. Diyodun idealite faktörünü 5.41 olarak bulmuşlar ve elde edilen n değerinin iki ayrı iletken malzeme ve seri direnç arasındaki arayüzey halleri nedeniyle birim değerinden daha yüksek olduğu kanısına varmışlardır. Aynı zamanda diyodun maksimum açık devre voltajını (V_{oc}) 0.12

V olarak ve kısa devre akımını da (I_{sc}) 0.53×10^{-6} A olarak elde etmişlerdir. Diyodun ara yüzey hal yoğunluğunun değerini ise düz beslem gerilimi altında 7.82×10^{13} den $3.02 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ye kadar değişen değerler olarak bulmuşlardır.

Ikhmayies and Ahmad-Bitar (2011), yaptıkları çalışmada spray metoduyla elde ettikleri CdSIn ince filmler için seçilmiş kontakları, I-V karakteristiklerini kullanarak, oda sıcaklığında ışıklı ve karanlık ortamda incelemişlerdir. Omik kontak olarak indiyum, alüminyum ve gümüşü seçmişlerdir ki bunları elde etmek için de vakum ortamında film yüzeyine buharlaştırma yöntemini kullanmışlardır. Omik kontak formu olarak alüminyumdan sonra en iyi özellikleri indiyumun gösterdiğini görmüşlerdir. İndiyum kontaklı filmlerin ışıktan biraz etkilendiklerini ve iyi elektriksel özellikler gösterdiğini söylemişlerdir. I-V grafiklerine bakarak kontaklarda gelişim için katkılama ve tavlama işlemlerinin uygun bir işlem olduğu kanısına varmışlardır. Çünkü bu işlemlerin kontak potansiyelinde azalma ve yarıiletkenle birlikte bir alaşımın oluşmasında etkili olduğunu söylemişlerdir.

Güzeldir *et al.* (2011), SILAR yöntemini kullanarak n-Si üzerine oda sıcaklığında CdS ince filmler büyütmüşler, bu filmlerin yapısal özelliklerini XRD ve SEM metodları ile incelemişlerdir. XRD ve SEM incelemeleri sonucu filmlerin iyi kaplanmış, polikristal yapıya sahip ve kristalleşme seviyelerinin iyi olduğunu görmüşlerdir. Cd/CdS/n-Si/Au-Sb yapısını SILAR metodu ile CdS ince filmini n-Si altlık üzerine büyüterek hazırlamışlardır. Engel yüksekliği ve idealite faktörünün etkilerini, yapının düz beslem altındaki I-V ve C-V karakteristiklerinden elde etmişlerdir. Cd/CdS/n-Si/Au-Sb yapısı için, I-V karakteristiklerinden engel yüksekliğini 0.664 eV-0.710 eV ve idealite faktörünü ise 1.190-1.400 arasında değişen değerler olarak bulmuşlardır. Yanal homojen engel yüksekliğini, idealite faktörü ve engel yüksekliği arasındaki deneysel lineer ilişkiden 0.719 eV olarak belirlemişlerdir. Deneysel engel yüksekliğini ve idealite faktörünü, Gaussian fonksiyonu ile fit edilmiş I-V karakteristiklerinden sırasıyla (0.683 ± 0.01) eV ve (1.287 ± 0.05) olarak bulmuşlardır. Engel yüksekliğini, ters beslem altında düzenlenmiş C^{-2} -V karakteristiklerinden elde etmişler; 0.720 eV-0.865 eV arasında değiştiğini gözlemlemişler ve istatistiksel analiz ortalamasını (0.759 ± 0.02) eV

olarak elde etmişlerdir. Buna ek olarak, katkılama konsantrasyonunu C^{-2} -V karakteristiklerinden $(8.55 \pm 1.62)10^{14} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplamışlardır.

Aydoğan and Sağlam (2012), polyaniline/p-Si/Al ve polypyrrole/p-InP eklemlerini üretmişlerdir. Elektrokimyasal polimerizasyon metodunu, polimer filmlerin elde edilmesi için kullanmışlardır. I-V ve C-V/f gibi ölçümlerden bazı elektriksel karakteristiklerin analizini yapmışlar; I-V karakteristiklerden aygıtın idealite faktörü ve engel yüksekliğini sırasıyla polyaniline/p-Si/Al için $n=2.12$ ve $\Phi_b=0.79 \text{ eV}$; polypyrrole/p-InP için ise $n=1.68$ ve $\Phi_b=0.59 \text{ eV}$ olarak bulmuşlardır. polyaniline/p-Si/Al eklemin seri direnç değerini sıcaklığa bağlı olarak gerçekleştirmişlerdir ve sıcaklığa bağlı olarak seri direnç (R_s) değerinin azaldığını görmüşlerdir. Seri direncin voltaj ve sıcaklığa bağlılığını polimer tabaka yada yalıtkan arayüzey ve arayüzey hal yoğunluğuna atfetmişlerdir. polypyrrole/p-InP aygıtların C-V ve C-f karakteristiklerini oda sıcaklığında incelemişler ve seri dirençlerin polypyrrole/p-InP aygıtlar için ihmal edilebilir düzeyde olduğunu görmüşlerdir.

Taşer (2012), yaptığı yüksek lisans çalışmasında SILAR metoduyla Cd/CdSe/n-GaAs/In yapıyı elde ederek bu yapının karakteristiklerini numune sıcaklığına bağlı olarak incelemiştir. Yapının I-V karakteristiklerini sıcaklığa bağlı olarak, C-V karakteristiklerini de oda sıcaklığında incelemiş ve bunlarla birlikte CdSe filmin yapısal özelliklerini araştırmak için ise XRD ve SEM ölçümlerini kullanmıştır. I-V ölçümlerini 20 K'lık adımlarla 60 K den başlayarak 300 K'e kadar olan sıcaklık değerlerinde almıştır. XRD ölçümlerinden filmlerin farklı düzlemler boyunca yöneldiğini ve polikristal yapıda olduğunu, SEM ölçümlerinden ise filmlerin oldukça düzgün yüzey yapısına sahip olduğunu gözlemlemiştir. Oda sıcaklığında idealite faktörünü 1.488, engel yüksekliği değerini 0.727 eV olarak elde etmiştir. Sıcaklığın artmasıyla idealite faktörünün azaldığını ve engel yüksekliğinin arttığını gözlemlemiştir. Seri direnç hesaplaması için Cheung metodunu kullanmıştır. Sıcaklığın artmasıyla seri direncin azaldığını gözlemlemiş ve bunu düşük sıcaklıklarda serbest taşıyıcı yoğunluğunun azalmasının bir sonucu olduğuna bağlamıştır. Bütün bu incelemeler sonucunda elde

ettiği yapının doğrultma özelliği gösterdiğini ve bu sebepten ötürü alternatif devre elemanı olarak kullanılabileceğini söylemiştir.

Oliva *et al.* (2012), yaptığı çalışmada kimyasal banyo tekniği ile cam altlıklar üzerine Zn ve Cu katkılı CdS ince film büyütmüşlerdir. CdS katkılama sürecinde, tutunmayı sağlamak amacıyla klasik CdS kimyasal banyo içerisine $ZnCl_2$ ve $CuCl_2$ katkı maddelerini dahil etmişlerdir. Birikim süresi ve CdS filmlerin fiziksel özellikleri üzerindeki katkılama konsantrasyonunun etkisini araştırmışlardır. Zn ve Cu katkılı CdS filmlerin yüzeysel özellikleri, kalınlığı, band aralığı enerjisi, kristal yapısı ve temel bileşimini incelemişler; bunları katkısız CdS filmlerin özellikleri ile karşılaştırmışlardır. Zn katkılı ve Cu katkılı CdS filmlerin her ikisinin de tercihli yönelim olarak (111) ile kübik kristal yapı özelliği gösterdiğini görmüşlerdir. Katkısız CdS ile karşılaştırma yaptığında, katkılı CdS filmlerin enerji-bant aralıklarının daha düşük değerde olduğunu gözlemlemişlerdir. Zn-katkılı CdS filmler, Cu-katkılı CdS filmlerinin değerlerinden daha yüksek kalınlık ve sertlik değerleri göstermiştir. Fotolüminesans sonuçlarından, Zn ve Cu katkılı CdS kristal yapısında valans bandının üzerine akseptör seviyelerin oluştuğunu görmüşler ve sonuç olarak katkılı CdS filmlerin düşük bandgap değerlerinde olduğunu söylemişlerdir.

Barikan (2012), yüksek lisans çalışması olarak CBD yöntemini kullanarak farklı altlıklar üzerine CdS ince filmler büyütmüş ve bu filmlerin yapısal, optik ve fotoelektrik özelliklerini incelemiştir. Altlık olarak cam, cam+PbS, $GaSe_{\text{Kristal}}$, $InSe_{\text{Kristal}}$, $GaSe_{\text{Kristal}}+PbS$, $InSe_{\text{Kristal}} +PbS$ yi kullanmıştır. Elde ettiği ince filmlerin analizi için XRD, SEM, AFM ve EDAX ölçümlerini yaparak bunları birlikte değerlendirmiştir. Bu incelemeler sonucunda CdS ince filmlerin yapısal özellikleri için hegzagonal ve kübik yapıda kristalleştğini belirtmiştir. Farklı altlıklar üzerine büyütülen filmlerin (002) yönelimindeki pik şiddetlerinin farklı olduğunu görmüştür. Tek kristal üzerine büyütülen filmlerde ortalama parçacık boyutunun daha büyük olduğunu söylemiştir. Tüm altlıklar üzerine büyütülen filmlerin I-V karakteristiklerini karanlık ve ışıklı ortamda belirleyerek CdS filmlerin ışığa duyarlı olduğunu görmüştür. Elde ettiği filmlerin yapısal, morfolojik, optik ve fotoelektrik özelliklerini inceledikten sonra CdS

filmlerin güneş pilleri, pencere tabaka, fotosensör güç kaynakları, lazer materyaller vb. yapıların tasarlamasında tercih edilmesinin bu özelliklerinden kaynaklandığını söylemiştir.

Yıldırım (2012), yüksek lisans tez çalışması olarak SILAR metoduyla Cd/CdS/n-GaAs/In ve Cd/CdSe/n-GaAs/In yapıları elde etmiş ve bu yapıların elektriksel karakteristikleri üzerine tavlamanın etkilerini incelemiştir. Sandviç yapıları elde ettikten sonra I-V ve C-V ölçümlerini ilk olarak oda sıcaklığında incelemiş ve daha sonra tavlamanın etkisini gözlemlemek amacıyla bu iki yapıyı azot gazı ortamında 50°C'lik adımlarla 400°C'ye kadar olan sıcaklıklarda 3 dakika tavlamıştır. Her bir tavlama işleminden sonra I-V ve C-V ölçümlerini oda sıcaklığında tekrarlamıştır. Tavlamadan sonra tavlama sıcaklığına bağlı olarak doğru beslem I-V ölçümlerinden idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerlerini hesaplamıştır. Sonrasında yine bu tavllanmış yapılar için oda sıcaklığında; 50 kHz, 100 kHz, 200 kHz, 300 kHz, 500 kHz ve 1 MHz frekans değerlerinde C-V ölçümlerini almıştır. Tüm bu hesaplamalar sonucunda sandviç yapıların I-V, C-V karakteristiklerinin termal tavlama ile az da olsa iyileştiğini gözlemlemiştir ve bu yapıların yarıiletken kontaklarda güvenli bir şekilde kullanılabileceğini söylemiştir.

Chattopadhyay and Guya Roy (2013), kimyasal banyo metoduyla CdS ince filmler elde etmişlerdir. Kimyasal banyo yöntemiyle büyütülen CdS ince filmleri, farklı sıcaklıklarda tavlarken alt bant aralığı optik soğurmayı, Urbach ile ilgili özel referansı kullanarak analiz etmişlerdir. Alt-bant aralığı bölgesinde materyalin soğurma katsayısının, foton enerjisinin belirli kritik bir değerine kadar hemen hemen sabit kaldığını ve daha sonra exponansiyel olarak arttığını gözlemlemişlerdir ve Urbach genel kuralının hakim olduğunu söylemişlerdir. Sabit soğurma bölgesi ve Urbach bölgede soğurma katsayılarının tavlama sıcaklığına karşı duyarlı olduğunu tespit etmişlerdir. Soğurma katsayısının sıcaklığa bağımlı, alt bant boşluk bölgesinde optik geçişin faal olması için iki farklı değişiklik gösterdiğini söylemişlerdir. SEM görüntülerinin, XRD ve DC akım-gerilim karakteristiklerinin dikkatlice analizleri sonucunda, alt-bant aralığı

bölgesinde etkili soğurma spektrumlarının malzemenin tane sınırları ve derin seviyelerini kapsayan optik geçiş süreçleri ile ilişkili olduğu sonucuna varmışlardır.

Al-Salman and Abdullah (2013), yaptıkları çalışmada Co–katkılı ZnO nano çubukları oda sıcaklığında RF–magnetron saçtırma yöntemini kullanarak Si / SiO₂ altlık üzerine başarılı bir şekilde sentezlemişlerdir. Katkısız ve Co-katkılı ZnO nano yapıları XRD, alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE–SEM), AFM ve fotoluminesans (PL) spektrumuyla karakterize etmişlerdir. ZnO örgüsünde özgül ağırlık yapısını değiştirmeden; Co²⁺ nın, Zn²⁺ nın yerine geçtiğini göstermişlerdir. Bu durumun ZnO yapısını yüksek kristalit haline getirdiğini söylemişler ve kobalt katkılı aşamanın ekstra safhalar olmadan %3 ve %4’e artarak yavaş yavaş nanoçubuklara dönüştüğünü gözlemlemişlerdir. Sentezlenmiş nano çubuk gruplarının altlık üzerinde boyuna ve yoğun bir şekilde büyüdüğünü gözlemlemişlerdir. Yaklaşık uzunluklarını %3 Co için 341 nm ve %4 Co için ise 382.3 nm olarak bulmuşlardır. PL analizi ile morötesi ışınların (UV) yayılma yoğunluğunun azaldığını ve artan Co atom yüzdesiyle birlikte mavi bir nesnenin ortaya çıktığını gözlemlemişlerdir. Bu sonuçlardan yola çıkarak görünür UV ışık spektrumlarından elde ettikleri bant aralığı değerleriyle (3.26-3.33 eV) uyumlu olduğunu söylemişlerdir. I-V karakteristiklerine bakarak Pd elektrotlarla birlikte Co – katkılı ZnO nano yapılarına dayanan Schottky diyotların yüksek engel yüksekliği (0.715 – 0.797 eV) ve düşük akım yoğunluğuna (0.035–0.841 μ A) sahip olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Bu engel yüksekliğinin diyotların 2 saat boyunca 500°C’de tavlansından sonra azaldığını gözlemlemişlerdir. RF-magnetron saçtırma yöntemiyle hazırlanmış Co-katkılı ZnO çubukların daha öncelerde hiç rapor edilmediğini söylemişlerdir.

Yüksel *et al.* (2013), yaptıkları çalışmada Au/perylene-monoimide(PMI)/p-Si Schottky engel diyot imal etmişlerdir. Diyodun 100 K ile 300 K geniş sıcaklık değerleri arasında I-V karakteristikleri, idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri ile elektriksel ve arayüzey karakteristiklerini incelemişlerdir. Yapının detaylı analizini termoiyonik emisyon (TE) metodunu kullanarak yapmışlardır. n değerlerinin birden uzaklaşmasına neden olan arayüzey durumlarıyla görüntü yükü azalması rejenerasyon-

rekombinasyon süreçleri gibi olası mekanizmaları tartışmışlardır. Cheung metodunu da, akım gerilim karakteristiklerinin analizi için kullanmışlar ve sonuçlar arasında iyi bir uyum gözlemlemişlerdir. Bu sonuçlardan Schottky diyotun elektriksel özelliklerinin, perylene-monaimide organik ara tabaka materyalinin modifikasyonuna ve aynı zamanda sıcaklığa karşı oldukça duyarlı olduğunu görmüşlerdir. Sıcaklığın artmasıyla birlikte engel yüksekliğinin arttığını ve idealite faktörünün azaldığını görmüşlerdir. Engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlılığının; Schottky engel yüksekliğinin, arayüzey yapısında ki homojensizliğine bağlı olduğu kanısına varmışlardır. Bu gibi homojen olmayan davranışları, engel yüksekliğinin Gaussian dağılımının olduğunu varsayarak, termiyonik emisyon metoduna dayanarak açıklamışlardır.

Huang *et al.* (2013), yaptıkları çalışmada Al/Alq₃/p-Si Schottky diyotların I-V karakteristiğini incelemişler ve bu karakteristiklere dayanarak kontak ara yüzeyindeki potansiyel engel ile kontağın davranışını gözlemlemişlerdir. Engel yüksekliğini 0.78 eV ve idealite faktörünü 1.53 olarak bulmuşlardır. Al/Alq₃/p-Si diyotların engel yüksekliğinin klasik Al/p-Si diyotlardan (~0.58 eV) daha yüksek olduğunu görmüşlerdir. Organik film (Alq₃), diyodun kontak ara yüzeyinde taşıyıcı geçişlerinin kontrolünü ortaya koymuştur. Ters beslem altında düzenlenmiş C-V ölçümlerinden elde edilen lineer değişime sahip C⁻²-V grafiğinden engel yüksekliğini 0.69 eV olarak bulmuşlardır. Diyodun elektriksel karakteristiklerini ayrıca Norde ve Cheung metodlarını kullanarak tartışmışlardır.

Ocaya (2014), keyfi bir Schottky diyottan istatistik parametrelerin çıkarımını basit bir grafik metotla yapmışlardır. Bu metot sıcaklığı içeren akım-voltaj metodunun dağılımıdır. Dolayısıyla bu metot da akım-voltaj-sıcaklık (I-V-T) metodunu kastetmektedir. Voltaj-sıcaklık karakteristiklerini ilk olarak iki sürekli akımda elde etmiş ve daha sonra belirli bir akım yoğunluğunda ortak davranışlara sahip her bir voltaj ya da sıcaklığın karakteristikleri üzerine düşünmüş ve spesifik bir parametre hesaplamışlardır. Bu çalışma; idealite faktörünün, engel yüksekliğinin ve diyot direncinin matematiksel olarak hesaplanmasının basitleştirildiğini göstermiştir. Diyodun başlangıçta sıfır akım ve temel direnç şartları altında ideal olduğunu düşünmüşlerdir.

Temel direncin sıfır olmadığı durumların etkisini sonradan ölçmüşlerdir. Son olarak örneklerin analizleri üzerine ticari BAT54 Schottky diyot ve Au/n-Ge, Au/n-Si ve Au/n-GaAs Schottky diyotların fabrikasyonu için yayımlanan dataları sunmuşlardır. Farklı bölgelerin karakteristiklerine I-V-T metodunun uygulanışının, kaynak yayınlara dayananların aksine, hesaplanan engel yüksekliğinde idealite faktöründe ve dirençte daha düşük varyansları ortaya çıkardığını gözlemlemişlerdir. Bundan dolayı bu metod da diyotları karakterize etmek için uygun alternatif bir I-V-T metodudur. Bu kontrol altında yatan neden, araştırmacı tarafından akım yoğunluğu üzerine uygulanmıştır.

Urgessa (2014), kendiliğinden bağ oluşturmuş (self-assemble) ZnO nano çubukları 80 °C de kimyasal banyo metoduyla Si altlık üzerine sentezlemişlerdir. Oda sıcaklığında fotoluminesans analizi sonucu artan tavlama ile kusurların azaldığını ve malzemenin optik kalitesinin arttığını gözlemlemişlerdir. Bu aygıtlar üzerinde yaptıkları akım-voltaj ölçümleriyle kusursuz bir doğrultma elde etmişlerdir. Eklem karakteristiklerini kapasite-voltaj ölçümlerini kullanarak da incelemişlerdir ve eklem karakteristiklerini genel olarak p-Si altlığın özelliklerine dayanarak belirlemişlerdir. Enerji-bant diyagramı ve eklemdeki olası arayüzey durumlarına dayanarak, aygıttaki akım transferlerinin büyük ölçüde yük taşıyıcılarının sıçramasıyla belirlendiğini söylemişlerdir.

Hernandez *et al.* (2014), lazer biriktirme (PLD) yöntemiyle ürettikleri CdS ince filmlerde optik ve elektriksel karakteristiklerinin sonuçlarındaki etkileri ve kusurların kontrolünü incelemişlerdir. CdS filmlerde boş kükürt pozisyonlarını ve yapıdaki Cd konsantrasyonlarını PLD sırasında ortam basıncını kullanarak kontrol etmişlerdir. Özdirenci 10^{-1} – 10^4 Ω arasında değişen CdS film elde etmişlerdir. Hall etkisi ölçümlerinden, taşıyıcı konsantrasyonunu 10^{19} – 10^{13} cm^{-3} değerleri arasında elde etmişlerdir ve bunun sebebinin gözlemlenen özdirenç değişikliğinden kaynaklı olduğunu söylemişlerdir. Aynı basınç değeri için Hall mobilitesini 2 den 12 cm^2/Vs 'e kadar değişen değerler olarak elde etmişlerdir ve buna rağmen, enerjiband aralığının yaklaşık 2,42 eV'ta etkilenmeden kaldığını görmüşlerdir. CdS filmlerde kusurların artışı nedeniyle optik geçirgenlik azalmıştır. Rutherford geri saçılma spektroskopisi; CdS film

sitokiyometrisinin, birikim basıncına bağlı olduğunu göstermiştir. CdS kusurlarının bulunmasının, taban malzemede daha fazla enerji türlerine ulaşılmasına sebep olduğunu ve PLD birikim sırasında CdS filmlerde yüzeyin zarar görmesini tetiklediğini söylemişlerdir.

Zengand Lin (2014), yaptıkları çalışmada sülfid davranışının dışında grafen/n-Si diyotların elektriksel özelliklerinin detayları ve fabrikasyonunun raporunu sunmuşlardır. Sülfid davranışının dışında grafen/n-Si Schottky diyotların çok düşük doğrultma davranışı göstermesiyle birlikte idealite faktörünü 4,2 olarak bulmuşlar ve yüksek sızıntı gözlemişlerdir. $n > 2$ olması aygıtta elektriksel iletkenlik boyunca, ara yüzey kusurlarının etkili olduğu anlamına gelmiştir. Ancak 5 dakikalık sülfid davranışının etkisiyle birlikte grafen/n-Si diyotlar iyi bir doğrultma özelliği, düşük sızıntı akım değeri göstermiştir ve idealite faktörü $n=1.8$ olarak bulunmuştur. Sonuçlara bakıldığında bu gibi diyotlarda arayüzey kusurlarının azaldığını görmüşlerdir. Bu deneysel göstergeler sülfid davranışı kullanılarak fonksiyonel aygıtları elde etmek için ara yüzey durumların yan etkilerini en aza indirmenin mümkün olabileceğini önermiştir. Buna ek olarak 10 dakikalık sülfid davranışıyla grafen/n-Si Schottky diyot aygıtı 10 dakika sülfid davranışına maruz bırakıldığında çok düşük doğrultma davranışı ve yüksek sızıntı gösterdiğini gözlemişlerdir, idealite faktörünü ise 2.5 olarak bulmuşlardır. Aygıtın performansını geliştirmek için uygun sülfid davranışında zamanın önemli bir etki olduğu kanısına varmışlardır.

Yukarıda sunulan literatür özetinden de anlaşıldığı gibi, yarıiletkenin yüzey özellikleri devre elemanının performansı, güvenilirliği ve kararlılığı üzerine baskın bir etkiye sahiptir. Metal/yarıiletken Schottky diyotların engel yükseklikleri yarıiletken yüzeyinde oluşturulan ince filmin yapısına, kalınlığına ve kullanılan metale bağlıdır. Dolayısıyla yarıiletken yüzeyine büyütülecek ince bir tabaka ile yapının engel yüksekliği arttırılabilir veya azaltılabilir. Yani potansiyel engel yüksekliği ayarlanabilir ve bu da özellikle optoelektronikte oldukça önemlidir. Bu nedenle bu tez çalışmasında CdS ince filmi kimyasal püskürtme metoduyla doğrudan p-Si altlık üzerinde büyütülerek

Cd/CdS/p-Si/Al alternatif yapısı üretilmiştir ve bu yapının karakteristik parametreleri incelenmiştir.

Hazırlamış olduğum bu yüksek lisans tez çalışması 5 bölümden oluşmaktadır: Birinci bölüm: **“Giriş”**; konu ile ilgili literatürde yapılmış olan çalışmaları içerir. İkinci bölüm **“Kuramsal Temeller”**; konu ile ilgili temel bilgileri içerir. Üçüncü bölüm: **“Materyal ve Yöntem”**; Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapılarının hazırlanması ve üretilmesi için gerekli olan malzemeler ve deney düzeneği ile ölçülerin alınmasında kullanılan cihazlar hakkındaki bilgileri içerir. Dördüncü bölüm: **“Araştırma Bulguları”**; CdS ince filmlerin optiksel ve yapısal özellikleri ile beraber Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapıların oda sıcaklığında alınan C-V karakteristikleri, sıcaklığa bağlı I-V ölçümleri ve bunlardan hesaplanan temel diyot karakteristik parametrelerini içerir. Beşinci bölüm: **“Tartışma ve Sonuç”**; sonuçların yorumlanmasını içerir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Metal-Yarıiletken Eklemler

Yarıiletkenle bir metal kontak hale getirildiğinde, mutlaka yarıiletken ve metalin Fermi enerjileri arasındaki farklılık eşitlenir ve bantlarda bükülme meydana gelir. Aslında Fermi enerjilerindeki farklılığın anlamı bir malzemedeki elektronların diğerinden daha yüksek enerjiye sahip olmalarıdır. Elektronlar bu yüzden bir materyalden diğer materyale akış eğilimi gösterirler. Metal-yarıiletken kontaklardaki elektronların geçişleri p-n eklemdeki geçişlerle benzerlik gösterir. Böyle eklemler sıklıkla metalürjik eklemler ya da metal kontaklar olarak da adlandırılırlar. Çünkü metaller yarıiletken endüstrisinde çoğunlukla harici elektrik devrelerinde bir yarıiletkenle kontak ya da bağlantı için kullanılırlar.

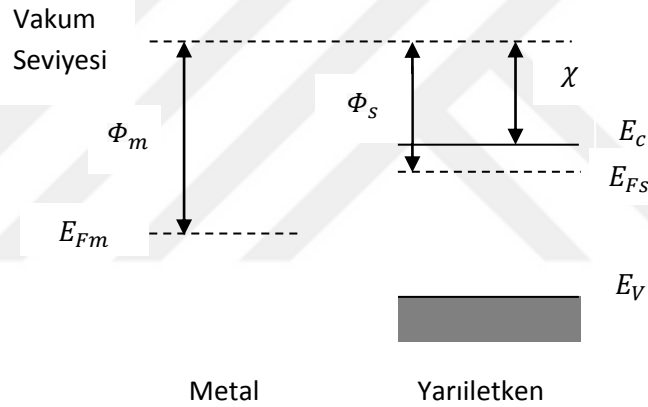
Bir metalde elektron alış veriş hızı oldukça kolaydır. Bu yük dağılımının karşılıklı dengeye gelmesiyle bölgesel dahili elektrik alan oluşur. Elektrik alan kuvveti yeteri kadar büyüdüğü zaman yük dağılımı durur ve metalürjik eklem oluşur.

Bir uçtan diğer uca yük nötralliğinin muhafaza edilmesi gerektiğinden dolayı yarıiletken içindeki fazla elektriksel yüklerin ve metal içindekilerin sayıca eşit fakat zıt işaretli olmaları gerekir. Ancak metalin sahip olduğu yük yoğunluğunun yarıiletkendekinden fazla olmasından dolayı, metal içindeki fazla yüklerin yayılımı geniş çaplıdır ve yarıiletken içindeki genişlikle kıyaslama yapıldığında ihmal edilebilecek kadar küçüktür.

Bu durum bir tarafı aşırı dop edilmiş bir p-n eklemine benzerdir. Sonuç olarak dahili elektrik alan ve band bükülmesinin yarıiletken içinde mevcut olmasının yanı sıra aşağıdaki bölümlerde metal-yarıiletken eklem fiziksel özelliklerinin nicel açıklaması da yapılacaktır.

2.1.1. Temel kavramlar

Şekil 2.1’de belirtilen gerekli fiziksel parametrelerin açıklaması: E_{Fm} metal için Fermi enerjisi ve $\Phi_m > 0$ iş fonksiyonudur. Metalin iş fonksiyonu metal yüzeyinden bir elektronu koparmak ve vakum içinde tutmak için gerekli olan enerjidir. Daha nicel bir şekilde söyleyecek olursak, iş fonksiyonu Şekil 2.1’de gösterildiği gibi Fermi enerjisi ve vakum seviyesi arasındaki enerji farkıdır. Yarıiletken ile ilgili parametreler: E_{Fs} Fermi enerjisi, $\Phi_s > 0$ iş fonksiyonu ve $\chi > 0$ elektron ilgisi. Elektron ilgisi, bir elektronun yarıiletkenin iletkenlik bandından kopartılıp vakum içerisinde tutmak için gerekli enerjidir veya vakum seviyesi ile iletkenlik bandının tabanı arasındaki enerji farkıdır.

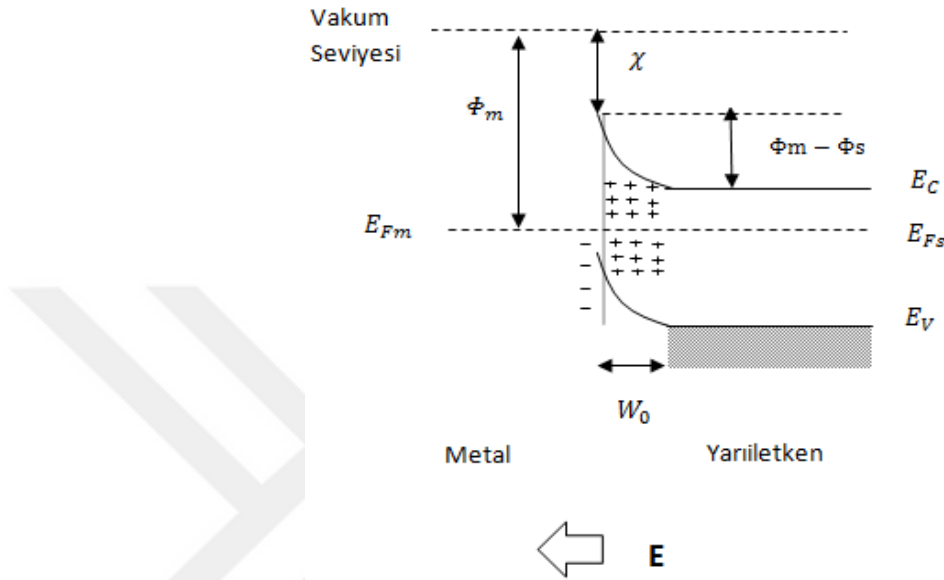


Şekil 2.1. Kontakt durumundan önce metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları ve Fermi enerjileri

*Her iki materyal için vakum seviyeleri aynı fakat Fermi enerjileri genelde farklıdır.

Band bükülme miktarı ve elektronların geçiş yönü metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farka bağlıdır. Bu materyaller ayrı olduğu zaman Fermi seviyeleri Şekil 2.1’de gösterildiği gibi ayrıdır. Fakat materyaller kontak durumuna getirildiğinde Fermi enerjisi eklemine her iki tarafında eşit olur. Vakum seviyesi, yarıiletkenin Fermi enerjisi E_{Fs} ’den yukarıda iken metalin Fermi seviyesi E_{Fm} ’den de daha yukarıda bir enerjidedir. Bu durumda eklemine her iki tarafındaki Fermi enerjilerinin eşitlenmesi için yarıiletkenin enerji bandları $\Phi_m - \Phi_s$ miktarı kadar aşağı doğru kaymak zorundadır. Eğer $\Phi_m > \Phi_s$ ise Şekil 2.2’de gösterildiği gibi yarıiletkenin enerji bandı metale nazaran aşağı doğru kayar ve elektronlar yarıiletkenden metale doğru geçerler. Eklemine her iki tarafında görülen yük taşıyıcılarının işaretleri ve dahili

elektrik alanının yönü Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Eğer $\Phi_m < \Phi_s$ ise yarıiletkenin enerji bandı metale nazaran yukarı doğru kayar ve elektronlar metalden yarıiletkene doğru geçerler.



Şekil 2.2. Metal ve yarıiletkenin kontak haline getirildiği zaman dengedeki durumu

*Her iki materyalin Fermi enerjileri eşitlendiğinde, eklemdaki yarıiletkenin enerji bandındaki değişim, enerji seviyeleri, metal-yarıiletken ekleminde birikmiş yük taşıyıcıları ve dahili elektrik alan.

2.1.2. Schottky ve omik kontaklar

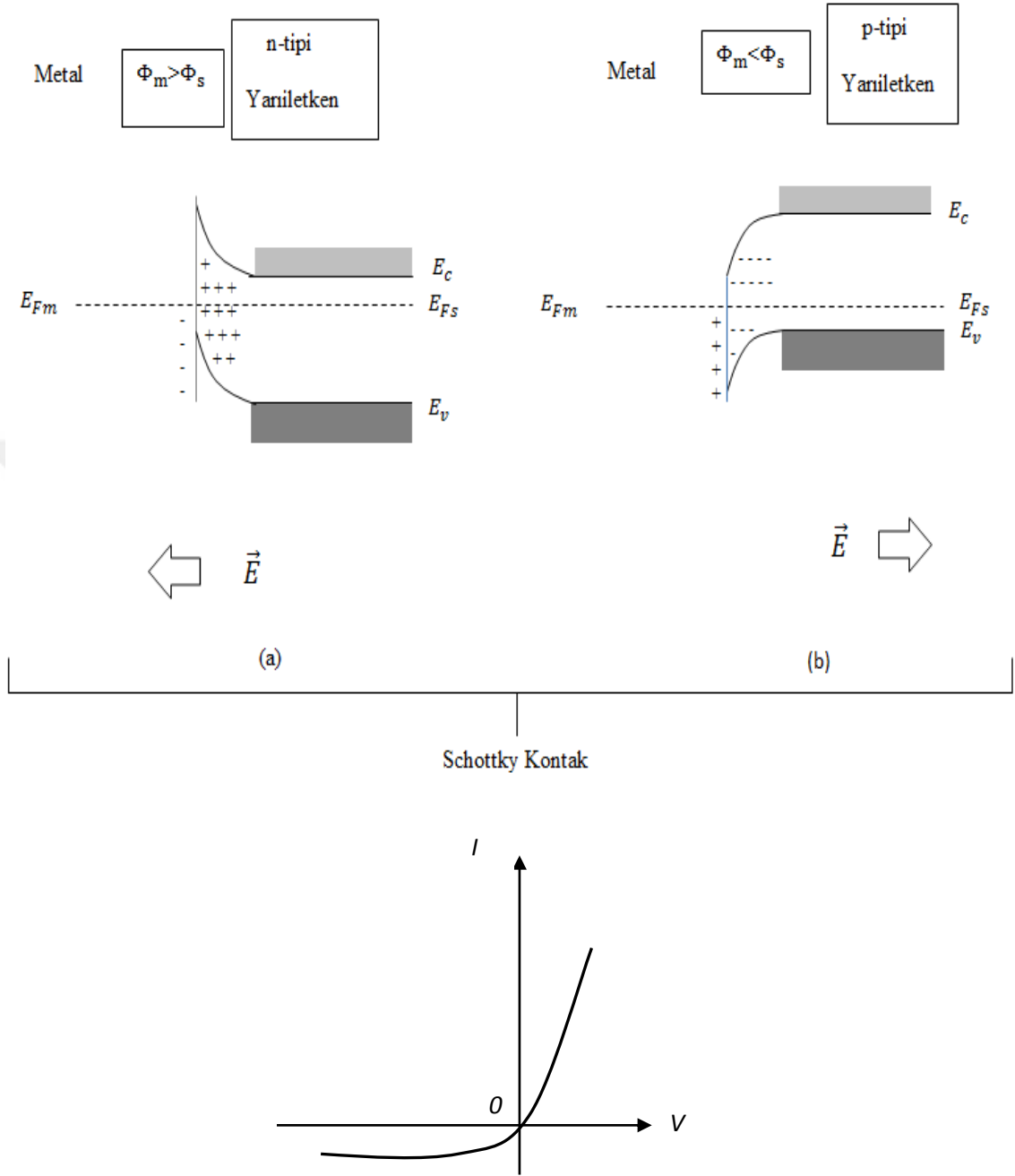
Metal-yarıiletken eklemının elektriksel özelliği yük dağılımı sonucu oluşan deplasyon bölgesine bağlıdır. Bu olgu sırayla iş fonksiyonlarının farkına $\Phi_m - \Phi_s$ ve yarıiletkenin tipine bağlıdır (n tipi veya p tipi).

Gerçekte biliyoruz ki $\Phi_m > \Phi_s$ olduğu zaman elektronlar yarıiletkenden metale doğru geçerler. Eğer yarıiletken n-tipi ise bu süreçten sonra yarıiletkendeki elektron ya da çoğunluk taşıyıcıları azalır. Böylelikle eklem kenarında bir tükenim bölgesi oluşur ve bir harici beslem uygulandığı zaman p-n eklemine benzer bir diyot gibi davranış elde edilir. Bu durum Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Bu durum sıklıkla doğrultucu kontak ya da Schottky kontak olarak adlandırılır.

Ancak eğer yarıiletken p-tipi ise, p-tipi katkı bakımından zengin olan yarıiletkenden elektronlar ayrılır. Bu süreç daha fazla holler veya çoğunluk taşıyıcıları oluşturur. Bu durumda tükenim bölgesi oluşmaz fakat daha çok çoğunluk yük taşıyıcıları eklem bölgesinin yakınında toplanırlar ve kontak bir diyot gibi davranış göstermez. Çoğunluk taşıyıcılar bir dış beslem altında her iki yönde serbestçe akarlar. Bu durum Şekil 2.4’de gösterilmiştir. Bu durum omik kontak olarak adlandırılır ve dolayısıyla akım-voltaj karakteristikleri doğrusaldır.

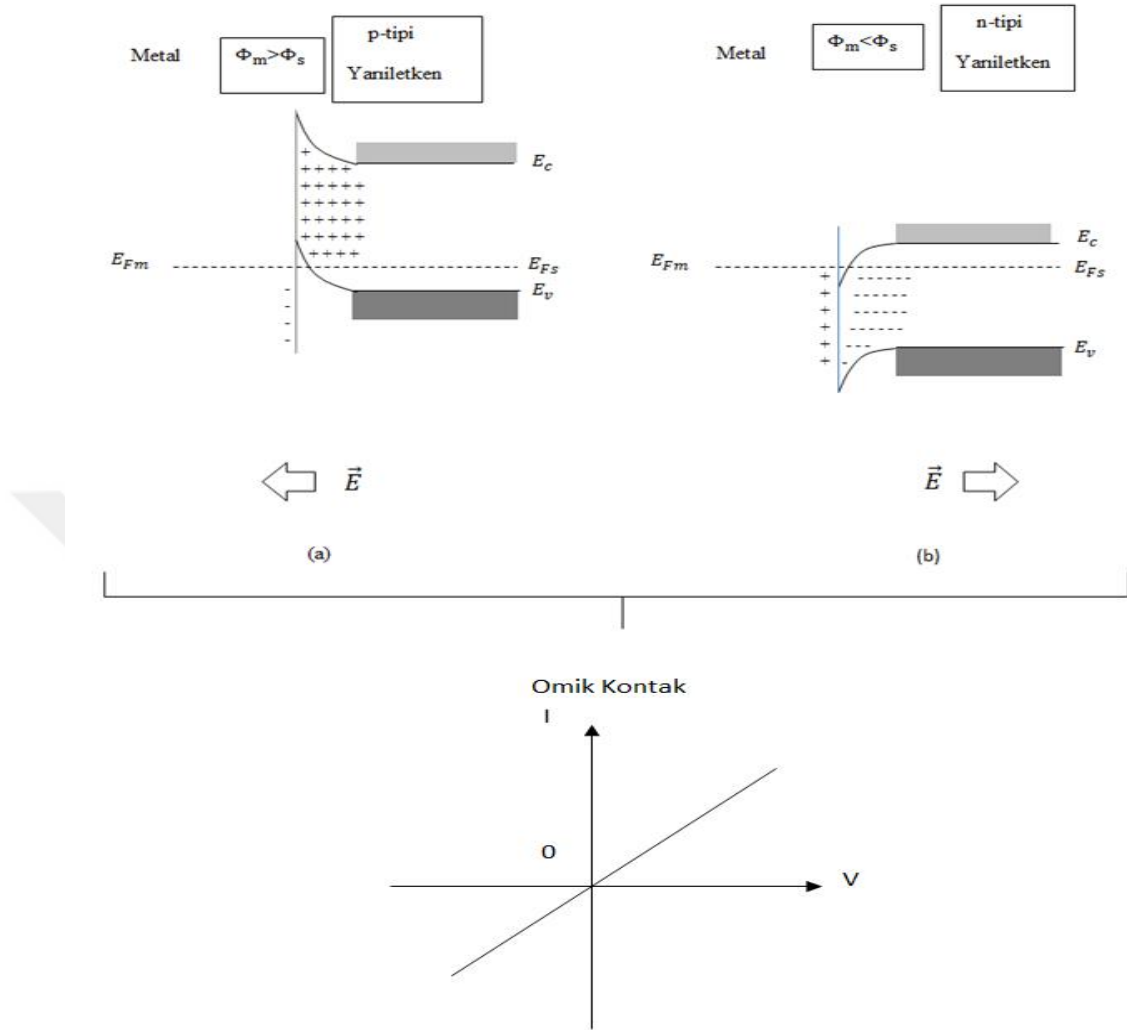
Şimdi eğer $\Phi_m < \Phi_s$ durumunu göz önüne alırsak elektronlar metalden yarıiletken içine doğru geçerler. Önceki analizi ters çevirmek gerekir. Başka bir deyişle p-tipi bir yarıiletken için eklem Schottky kontak olacak iken n-tipi yarıiletken için eklem omik kontak olacaktır.

Bu dört konfigürasyon Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’de gösterilmiştir ve Çizelge 2.1’de özetlenmiştir.



Şekil 2.3. Dört mümkün metal-yarıiletken eklem şekillerinden yukarıda verilen ikisi Schottky kontakttır

*(a) $\Phi_m > \Phi_s$ n-tipi, (b) $\Phi_m < \Phi_s$ p-tipi. Meydana gelen potansiyel engeli yarıiletkendeki çoğunluk taşıyıcıların eklem üzerinden serbest hareketlerini engellediğinden dolayı Schottky kontak elde edilmektedir. Bu nedenle şeklin altında gösterilen I-V karakteristiği doğrultma karakteristiğini göstermektedir



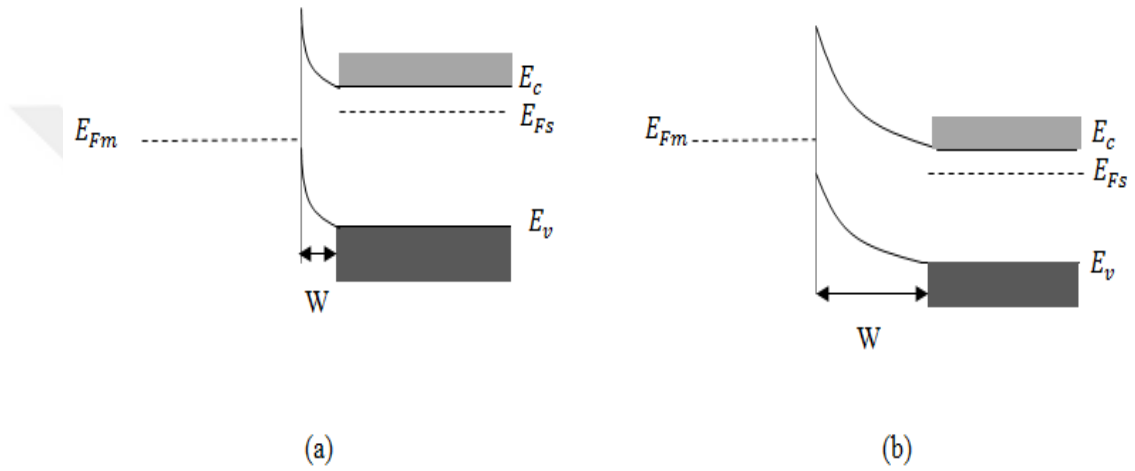
Şekil 2.4. Dört mümkün metal-yarıiletken eklem şekillerinden yukarıda verilen ikisi Omik kontak türüdür

*(a) $\Phi_m > \Phi_s$ p-tipi ve (b) $\Phi_m < \Phi_s$ n-tipi. Şekil 2.3 de gösterilen konfigürasyonların tersine, bu eklemlerde potansiyel engeli oluşmadığı için yarıiletkenlerdeki çoğunluk taşıyıcılar metal-yarıiletken eklem üzerinden hareket edebilirler. Bu nedenle şeklin altında gösterilen I-V karakteristiği omik davranış göstermektedir.

Çizelge 2.1 Dört muhtemel metal-yarıiletken eklem şekilleri ve elde edilen kontak tipleri

	Yarıiletken	Kontak
$\Phi_m > \Phi_s$	n- tipi	Schottky
$\Phi_m < \Phi_s$	p-tipi	Schottky
$\Phi_m > \Phi_s$	p-tipi	Omik
$\Phi_m < \Phi_s$	n-tipi	Omik

Bir Schottky kontak durumunda metal ve yarıiletken arasına dışarıdan bir V kadar potansiyel uygulandığında eklemde var olan potansiyel engeli $-qV$ miktarı kadar kayabilir. Bu, p-n eklemi gibi benzer yolla akım akışına etki eder. Bu n-tipi yarıiletken durumu için Şekil 2.5’de gösterilmiştir. Bir metal-yarıiletken eklemde akım akışından çoğunluk taşıyıcıları sorumludur. Oysa bir p-n eklemde akım iletimi azınlık taşıyıcıları ile oluşur.



Şekil 2.5. Bir metal- (n-tipi) yarıiletken Schottky kontağın band diyagramı

*(a) doğru beslem altında potansiyel engeli azalmıştır (b) ters beslem altında potansiyel engeli artmıştır.

Bir metal-yarıiletken eklem için işaret kuralı yarıiletkenin tipi dikkate alınarak bir p-n eklemine benzer durumdadır. Bir Schottky kontağın akım iletim mekanizması bir p-n ekleminkinden farklı olmasına rağmen ideal bir Schottky kontak için akım-voltaj ilişkisi ideal bir p-n eklemine benzer ifadeye sahiptir:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{k_b T}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

Burada I_0 ters saturasyon akımıdır ve yarıiletkenin elektron ilgisi ve metalin iş fonksiyonu arasındaki farkı ile eksponansiyel olarak orantılıdır.

$$I_0 = AA^*T^2 e^{\left(\frac{(\Phi_m - \chi)}{k_b T}\right)} \quad (2.2)$$

A^* etkin Richardson sabitidir ve çoğu metal yarıiletken eklemler için $10 \text{ K}^{-2}\text{cm}^{-2}$ den $100 \text{ K}^{-2}\text{cm}^{-2}$ ye kadar değişmektedir. $(\Phi_m - \chi)$ niceliği sıkça $q\Phi_b$ ile ifade edilir. Burada Φ_b Schottky potansiyel engel yüksekliği olarak adlandırılır. Gerçek bir Schottky kontakta termoiyonik emisyonun yanında kirlilik ve arayüzey hallerinin de dikkate alınması gerekir. Bu durumda akım-voltaj ilişkisi şu şekilde verilir:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{nk_b T}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

Burada n idealite faktörüdür ve genellikle 1 ve 2 arasında değerler almaktadır.

2.1.3. Schottky diyodun kapasite-voltaj karakteristikleri

Schottky engel yüksekliğinin bilinmesiyle elektrik alan profili, deplasyon genişliği ve deplasyon kapasitansı gibi parametreler p-n eklemleri için elde edilen aynı yolla hesaplanabilir. Metal tarafında deplasyon tabakası olmadığından dolayı bir n-tipi materyalden yapılan Schottky engeli için problem p^+n diyodundaki problemle aynıdır.

Deplasyon yaklaşımına göre, deplasyon bölgesinde hareketli yük yoktur ve yarıiletken deplasyon bölgesinin dışında nötrdür. Harici bir V potansiyeli için deplasyon genişliği W , Poisson denkleminin çözümünden

$$W = \left[\frac{2\varepsilon(V_{bi} - V)}{qN_d} \right]^{1/2} \quad (2.4)$$

şeklinde elde edilebilir (Singh 2001).

Burada N_d , n-tipi yarıiletkenin katkı konsantrasyonudur. Yüksek elektron yoğunluğundan dolayı metal tarafında deplasyon bölgesinin var olmadığı düşünülmektedir.

V potansiyeli, düz beslem için pozitif, ters beslem için negatif olarak uygulanan potansiyeldir. Deplasyon bölgesi yükü deplasyon genişliğinden;

$$Q_d = qN_dW = [2\varepsilon qN_d(V_{bi} - V)]^{1/2} \quad (2.5)$$

şeklinde türetilebilir. A kesit alanına sahip bir devre elemanı için kapasite

$$C = A \left[\frac{dQ_d}{dV} \right] = A \left[\frac{q\varepsilon N_d}{2(V_{bi} - V)} \right]^{1/2} = \frac{\varepsilon A}{W} \quad (2.6)$$

bağıntısıyla verilir. p-n eklem diyotla benzer olarak kapasitenin tersi

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi} - V)}{A^2 q \varepsilon N_d} \quad (2.7)$$

şeklinde elde edilir.

Böylece $1/C^2$ - V grafiğinden hem built-in potansiyeli hem de katkı konsantrasyonu hakkında önemli bilgiler elde edilebilir.

2.2. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken Diyotlar

Bir yalıtkan, metal–yalıtkan-yarıiletken (MIS) diyot içinde, metal ve yarıiletken arasına sıkıştırılmıştır. Sonuç olarak, bir MIS kontak sıfır dc ilettime sahiptir.

Genellikle yarıiletkenin arka yüzeyinde bir omik kontak vardır. Yalıtkan olarak sıklıkla yarıiletkenin kendi oksidi kullanılır. Özellikle Si üzerindeki SiO₂ önemli teknolojik gelişmelere sahip olmuştur. İkinci durumda, bu diyotlar Metal-Oksit-Yarıiletken (MOS) olarak adlandırılırlar. Bu yapı yarıiletken yüzeylerin araştırılması için ve yarıiletken teknolojisi için karşı konulmaz bir öneme sahiptir.

2.2.1. İdeal MIS diyot için band diyagramı

İdeal bir MIS diyot aşağıdaki 3 şartı sağlamalıdır (Grundmann 2014):

(i) Şekil 2.6'da gösterildiği gibi, dış bir potansiyel uygulanmadığında yarıiletken ve metalin iş fonksiyonu arasındaki enerji farkı Φ_{ms} sıfırdır.

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(\chi_s - \frac{E_g}{2q} \pm \Psi_B \right) \quad (2.8)$$

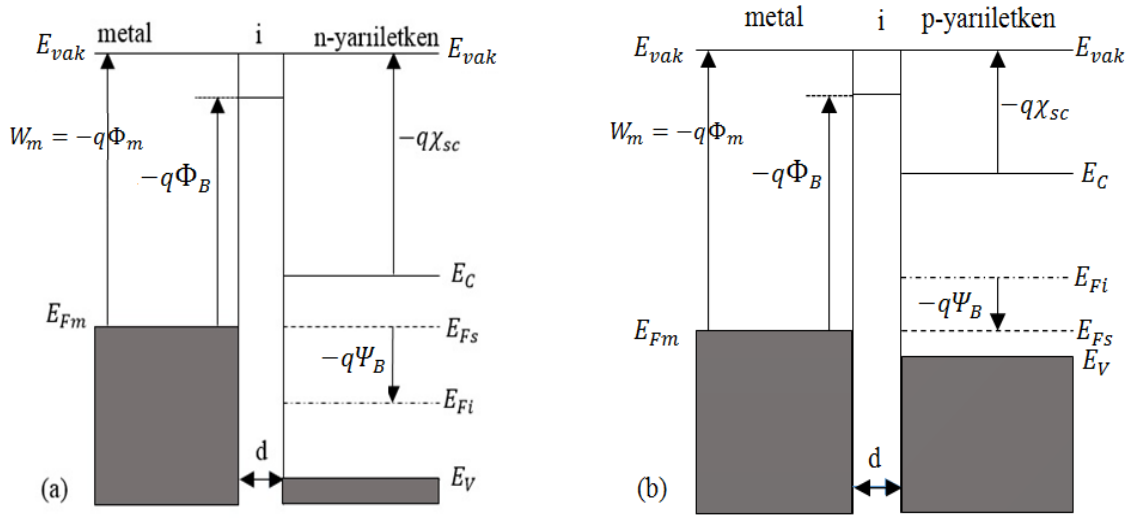
Bağıntıdaki (+) ve (-) işaretleri yarıiletkenin tipine göre uygulanır. Ψ_B asal ve gerçek Fermi seviyeleri arasındaki farktır.

(ii) Yalnızca mevcut yükler yarıiletken içindekilerdir ve zıt yükler yalıtkanın yakın metal yüzeyindedir.

(iii) Yarıiletken ve metal arasında dc akımı yoktur yani yalıtkanın iletkenliği sıfırdır.

Bir ideal MIS diyoda potansiyel uygulandığı zaman; yığılım, tükenim, tersinim olmak üzere 3 genel durum meydana gelebilir (Şekil 2.7). Bunları ilk olarak p-tipi yarıiletken için tartışalım:

Şekil 2.7a da metaldeki negatif gerilim için yığılım durumu gösterilmiştir. Voltajın bir kısmı yalıtkan boyunca, geri kalanı da yarıiletken boyunca düşer. Valans bandı Fermi seviyesine göre yukarıya doğru bükülmüştür. Ancak yarıiletkendeki kuazi-Fermi seviyesi, dc akım olmamasından dolayı sabittir.



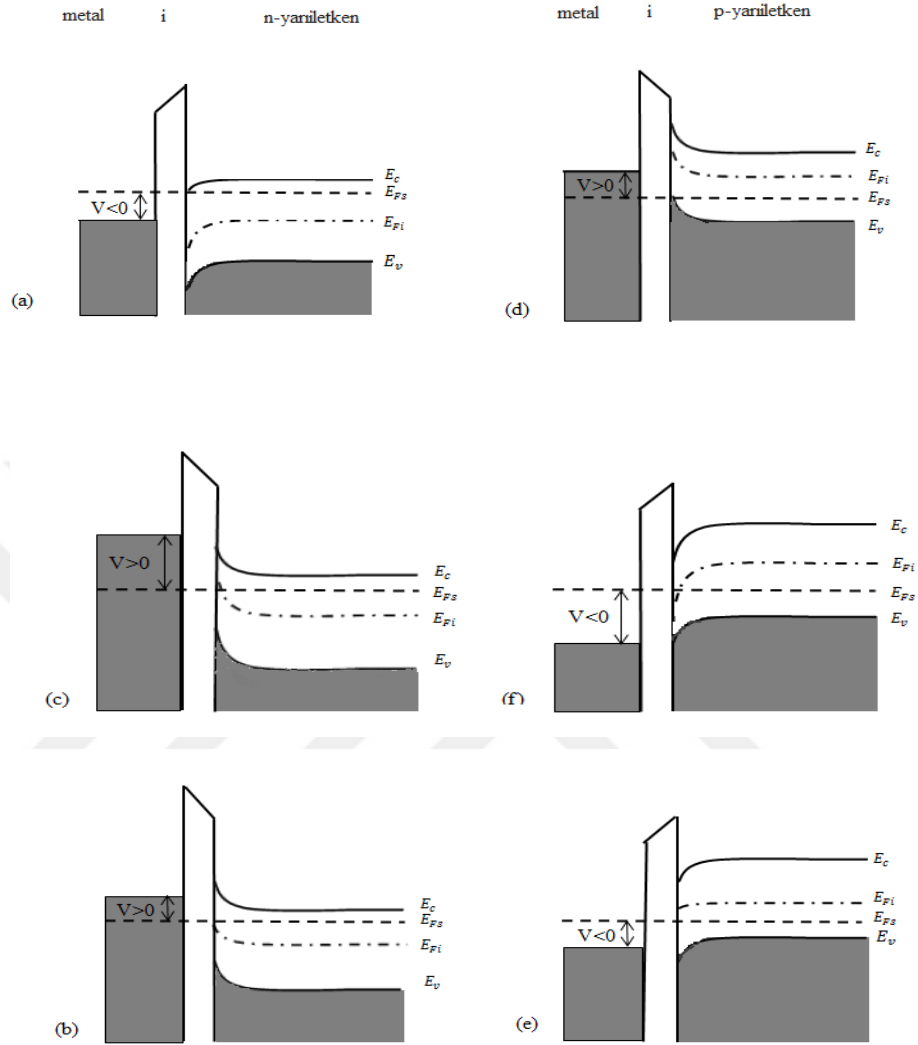
Şekil 2.6. Dış gerilimin $V=0$ olduğu (a) n-tipi (b) p-tipi yarıiletkenlerle yapılan bir ideal MIS diyodun enerji band diyagramı

*Yalıtkan (i) bölgesi d kalınlığı ile gösterilmiştir.

Taşıyıcı yük yoğunluğu (holler) $E_F - E_V$ enerji aralığına eksponansiyel olarak bağlı olduğu için bir yük yığılması (hollerin) yalıtkanın arayüzeyinin yakınlarında yarıiletkenin içinde meydana gelir.

Şekil 2.7b’de tükenim durumu gösterilmiştir. Şimdi bir artan ters voltaj yani metale pozitif bir voltaj uygulanmıştır. Bu durumda yalıtkana yakın yarıiletken içerisinde çoğunluk yük taşıyıcılarının tükenimi meydana gelmiştir. Yarıiletken içindeki kuazi-Fermi seviyesi asal seviyenin altında kalır ($E_i \approx E_C + E_g/2$). Eğer voltaj daha yüksek değerlere çıkarılırsa kuazi-Fermi seviyesi asal seviye ile kesişir ve yalıtkanın yakınında E_{Fi} nin üzerine doğru uzanır. Bu bölgede elektron konsantrasyonu hol konsantrasyonundan daha fazladır ve böylece tersinim durumu oluşur. Tersinim durumu, eğer Fermi seviyesi E_{Fi} ye yakın ise “zayıf” olarak; Fermi seviyesi iletkenlik bandı kenarına yakın uzandığında “güçlü” olarak adlandırılır.

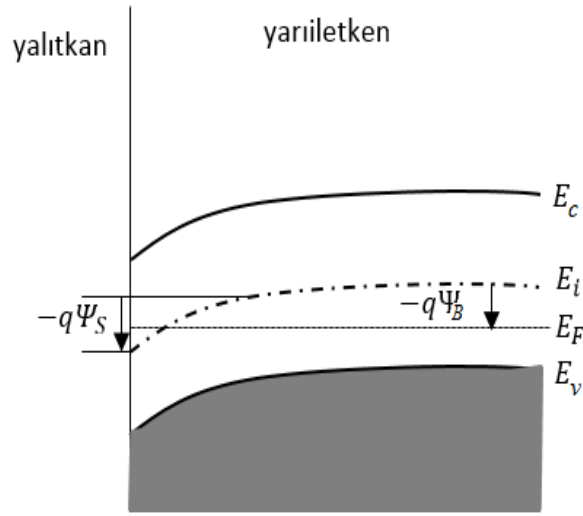
n-tipi yarıiletkenler için yığılma ve tükenim durumları, potansiyelin zıt işaretli olması ile meydana gelir. Tersinim durumunda yalıtkan yakınlarında $p > n$ dir.



Şekil 2.7. $V \neq 0$ durumu için; ideal MIS diyodun enerji band diyagramı (a, b, c) n-tipi ve (d, e, f) p-tipi yarıiletken için, (a, d) yığılım (b, e) tükenim ve (c, f) tersinim durumunu göstermektedir

2.2.2. Uzak-yükü bölgesi

Şimdi ideal bir MIS diyotta yük ve elektrik alan dağılımını hesaplayalım. Önce asal gövde Fermi seviyesi ve gerçek asal seviye E_{Fi} nin ayrılmasının ölçüsü olan Ψ potansiyelini tanımlayacağız, yani $-q\Psi(x) = E_{Fi}(x) - E_{Fi}(x \rightarrow \infty)$ (Şekil 2.8’de görüldüğü gibi) şeklindedir.



Şekil 2.8. Bir MIS diyodun p-tipi yarıiletkenin yüzeyindeki enerji band diyagramı

* $\Psi_s < 0$ için yığılma, $\Psi_s > 0$ için tükenim ve (burada görüldüğü gibi) $\Psi_s > \Psi_B > 0$ için tersinim durumu meydana gelir.

Potansiyelin yüzeydeki değeri Ψ_s yüzey potansiyeli olarak tanımlanır. Eğer yüzeydeki asal Fermi seviyesi, gövde Fermi seviyesinden aşağıda ise potansiyelin değeri pozitifdir yani $\Psi_s > 0$ dır.

Elektron ve hol konsantrasyonları (p-tipi yarıiletken için);

$$n_p = n_{po} \exp(\beta \Psi) \quad (2.9a)$$

$$p_p = p_{po} \exp(-\beta \Psi) \quad (2.9b)$$

olarak verilir.

Burada n_{po} (p_{po}) sırasıyla gövde elektron (hol) konsantrasyonları ve $\beta = q/kT > 0$ dır. Bu nedenle net serbest yük;

$$n_p - p_p = n_{po} \exp(\beta \Psi) - p_{po} \exp(-\beta \Psi) \quad (2.10)$$

eşitliği ile verilir.

Yüzeyde elektron ve hol konsantrasyonları “s” indisi ile gösterilir ve

$$n_s = n_{po} \exp(\beta \Psi_s) \quad (2.11a)$$

$$p_s = p_{po} \exp(-\beta \Psi_s) \quad (2.11b)$$

bağıntılarıyla verilir.

(2.12) bağıntısıyla verilen yük yoğunluğu ile birlikte $\frac{d^2\Psi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_s}$ şeklindeki Poisson denklemini kullanabiliriz.

$$\rho(x) = q[p(x) - n(x) + N_D^+(x) - N_A^-(x)] \quad (2.12)$$

Sınır koşulu olarak yüzeyden uzakta ($x \rightarrow \infty$ için) yük nötralliği vardır, yani;

$$n_{po} - p_{po} = N_D^+ - N_A^- \quad (2.13)$$

ve $\Psi = 0$ dır. Unutulmamalıdır ki $N_D^+ - N_A^-$ homojen bir yarıiletkende tamamen iyonizasyon durumunda sabit olmalıdır. Bu yüzden (2.13) bağıntısı (fakat yük nötralliği değil) yarıiletkenin her yerine uygulanır. (2.10) denklemi kullanılarak Poisson denklemi;

$$\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} = -\frac{q}{\epsilon_s} \{p_{po}[\exp(-\beta\Psi) - 1] - n_{po}[\exp(\beta\Psi) - 1]\} \quad (2.14)$$

şeklinde yazılabilir. Poisson denkleminin integrali alınarak ve uygun notasyonlar kullanılarak;

$$F(\Psi) = \left[\exp(-\beta\Psi) + \beta\Psi - 1 + \frac{n_{po}}{p_{po}} (\exp(\beta\Psi) - \beta\Psi - 1) \right]^{1/2} \quad (2.15a)$$

$$L_D = \left[\frac{\varepsilon_s kT}{q^2 p_{po}} \right]^{1/2} = \left[\frac{\varepsilon_s}{q\beta p_{po}} \right]^{1/2} \quad (2.15b)$$

bağıntıları elde edilir. Böylece L_D , boşluklar için Debye uzunluğu olmak üzere elektrik alan;

$$E = -\frac{\partial\Psi}{\partial x} = \pm \frac{\sqrt{2}kT}{qL_D} F(\Psi) \quad (2.16)$$

olarak yazılabilir. Pozitif (negatif) işaretler sırasıyla $\Psi > 0$ ($\Psi < 0$) içindir. Yüzeyde Ψ değeri için Ψ_s alınacaktır. Birim alan başına toplam yük Q_s oluşturduğu;

$$E_s = -\frac{\partial\Psi}{\partial x} = \pm \frac{\sqrt{2}kT}{qL_D} F(\Psi_s) \quad (2.17)$$

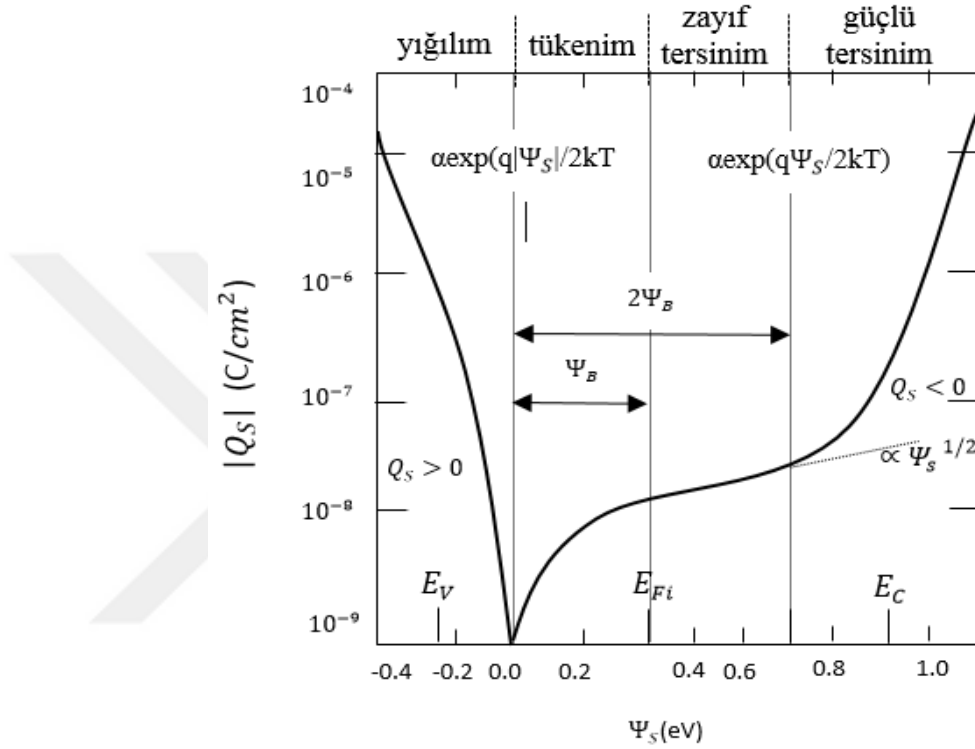
yüzey alanını gözönüne alarak $Q_s = -\varepsilon_s E_s$ olarak Gauss kanunuyla verilir.

Yüzey potansiyelinin uzay yükü yoğunluğuna bağlılığı Şekil 2.9'da tasvir edilmiştir. Eğer Ψ_s negatif ise (2.15a) da F ilk terim tarafından baskındır, uzay yükü pozitifdir (yığılım) ve $Q_s \propto \exp(-\beta|\Psi|/2)$ ile orantılıdır. $\Psi_s=0$ için (ideal) MIS diyod düz band durumuna sahiptir ve uzay yükü sıfırdır. $0 \leq \Psi_s \leq \Psi_B$ için uzay yükü negatiftir (tükenim) ve F (2.15a) da ikinci terim tarafından baskındır yani $\Psi_s \propto \sqrt{\Psi_s}$. $\Psi_s > \Psi_B$ için zayıf inversiyon bölgesidir, uzay yükü (2.15a) da ki dördüncü terimle baskındır ve $Q_s \propto -\exp(-\beta|\Psi|/2)$ dir. Kuvvetli tersinim yaklaşık olarak $\Psi_s^{inv} \approx 2\Psi_B = \frac{2kT \ln(N_A/n_i)}{q}$ de başlar.

Yük, alan ve potansiyel ile birlikte kuvvetli tersinimde band diyagramı, Şekil 2.10'da gösterilmiştir. MIS diyot üzerindeki toplam gerilim düşmesi V ;

$$V = V_i + \Psi_s \quad (2.18)$$

şeklindedir. Burada V_i yalıtkan üzerindeki voltaj düşmesidir.



Şekil 2.9. $N_A=4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ve $T=300 \text{ K}$ de p-tipi silikon için yüzey potansiyeli Ψ_s üzerine uzay yükünün bağılılığı
 * $\Psi_s=0$ için düz band koşulu mevcuttur.

Tersinim durumda uzay yükü bölgesindeki

$$Q_s = Q_d + Q_n \quad (2.19)$$

şeklindeki birim alan başına yük,

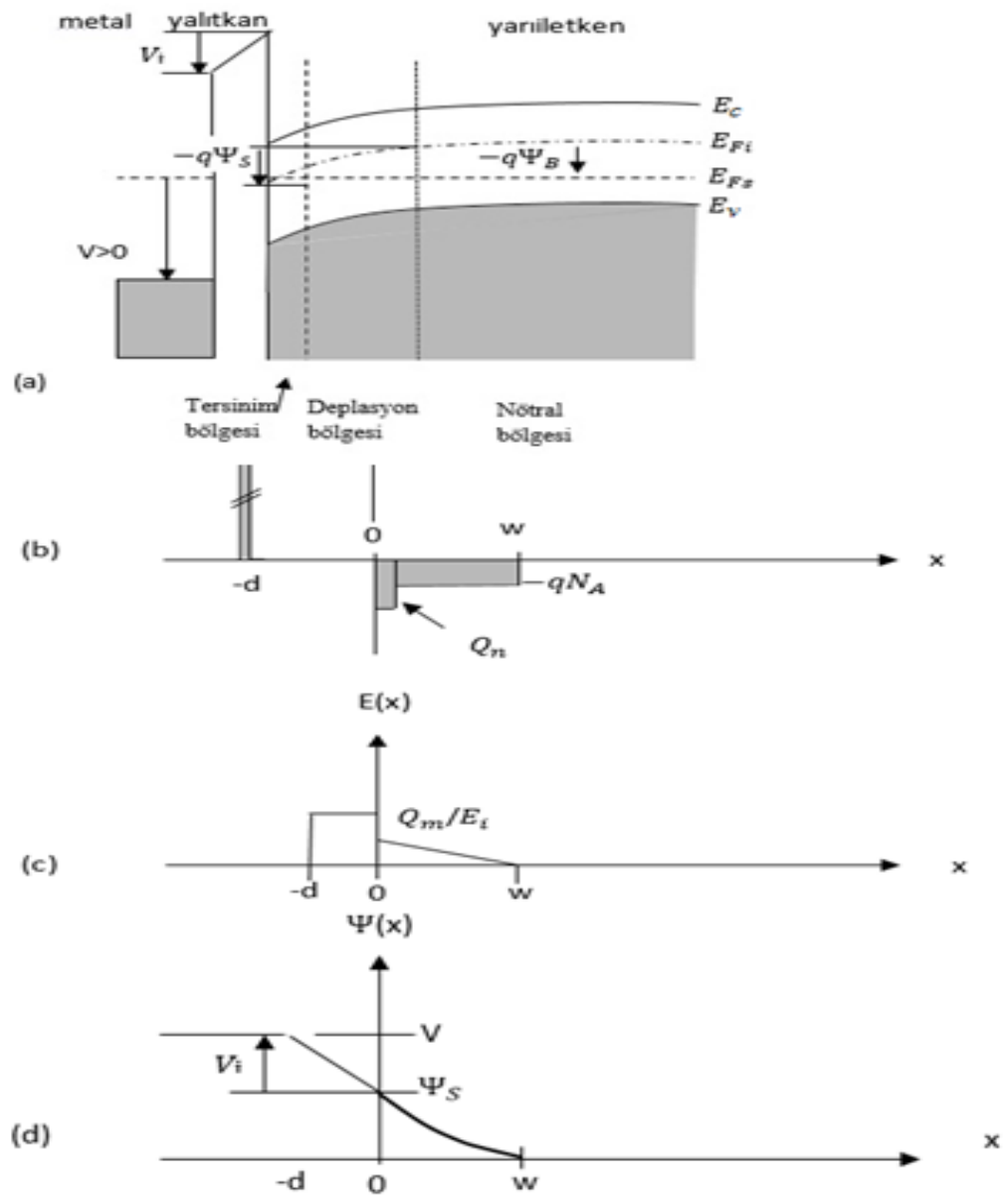
$$Q_d = -qWN_a \quad (2.20)$$

şeklindeki deplasyon yükü (iyonize olmuş akseptörler) ile sadece arayüzeye yakın mevcut olan Q_n tersinim yükünün toplamından ibarettir. Burada W deplasyon bölgesinin

genişliğidir. Global yük nötralliginden dolayı metal yüzeyi,

$$Q_m = -Q_s \quad (2.21)$$

şeklinde zıt yük taşır. İdeal bir MIS diyod durumunda yalıtkanın kendisinin yüklere katkısı yoktur.



Şekil 2.10. Tersinim durumundaki ideal MIS diyodun (a) band diyagramı, (b) yük dağılımı, (c) elektrik alanı ve (d) potansiyeli

2.2.3. MIS diydun kapasitesi

Yalıtkan, d kalınlıklı ve ϵ_i dielektrik sabitli bir kapasitörü temsil eder. Bu yüzden yalıtkanın kapasitesi,

$$C_i = \frac{\epsilon_i}{d} \quad (2.22)$$

bağıntısıyla verilir. - Q_s ve Q_s yükleri arasında bulunan yalıtkandaki E_i elektrik alan şiddeti

$$E_i = \frac{|Q_s|}{\epsilon_i} \quad (2.23)$$

şeklindedir. Yalıtkan üzerindeki voltaj düşmesi V_i ,

$$V_i = E_i d = \frac{|Q_s|}{C_i} \quad (2.24)$$

bağıntısıyla verilir.

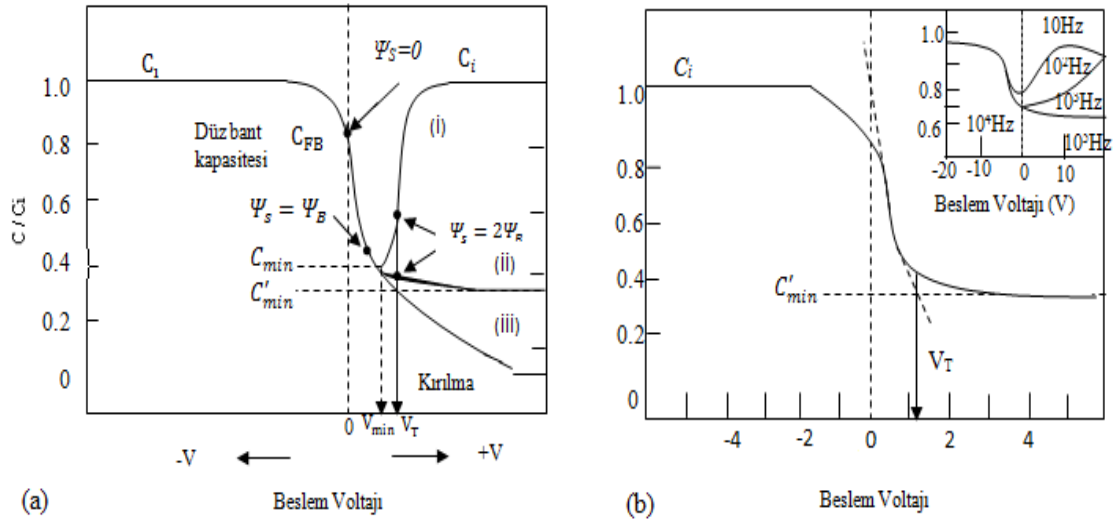
MIS diydun toplam kapasitesi C , deplasyon tabakasının C_d kapasitesiyle seri durumda olan yalıtkan kapasitesiyle birlikte

$$C = \frac{C_i C_d}{C_i + C_d} \quad (2.25)$$

şeklinde verilir.

Uzay yükü bölgesinin kapasitesi uygulanan beslem ile Şekil 2.11'deki gibi değişir. Doğru beslem için (yığılım), uzay yükü bölgesinin kapasitesi çok büyüktür. Bu nedenle,

MIS diyodun toplam kapasitesi $C \approx C_i$ şeklinde yalıtkan kapasitesiyle verilir. Uygulanan voltaj azaltıldığı zaman uzay yükü bölgesinin kapasitesi düz band durumu için ($\Psi_s = 0$) $C_d = \epsilon_s/L_d$ 'ye düşer. Yüksek ters uygulama voltajları için, yarıiletken yüzeyde tersinim olmuştur ve uzay yükü bölgesi kapasitesi tekrar yükselmiştir. Bu durumda, yine toplam kapasite $C \approx C_i$ ile verilir.



Şekil 2.11. (a) i) düşük frekanslar, ii) yüksek frekanslar ve iii) derin tükenim için bir MIS diyodun kapasitesinin besleme şematik bağıllığı. (b) bir Si/SiO₂ diyodun ($N_A = 1.45 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) yüksek frekans kapasitesi

*Bu grafiğin içindeki grafik değişik frekanslar için besleme bağıllığı göstermektedir.

Önceki tartışmalarda yarıiletkendeki yük yoğunluğunun yeterince hızlı bir şekilde beslemdeki değişimleri takip edebileceği kabul edilmişti. İnversiyon yükü, rekombinasyon zaman sabiti τ ile sınırlandırılmış olan rekombinasyon yoluyla gözden kaybolmalıdır. τ^{-1} civarındaki frekanslar (daha hızlı) için, tersinim tabakasındaki yük frekansı takip edemez ve yarıiletkenin kapasitesi $C_d \cong \epsilon_s/W_m$ değeri ile verilir. W_m tersinimin başlangıcında mevcut olan maksimum deplasyon tabaka genişliğidir ve

$$W_m \cong \left(\frac{2\epsilon_s}{qN_A} \Psi_s^{inv} \right)^{1/2} = \left(\frac{4\epsilon_s kT \ln(N_A/n_i)}{q^2 N_A} \right)^{1/2} \quad (2.26)$$

bağıntısıyla verilir.

Daha ileri arttırılan voltajlar için (tersinim bölgesi içinde), elektrik alan tersinim yükü ile perdelenir ve deplasyon tabakasının genişliği sabit kalır. Böylece tersinim bölgesindeki toplam kapasite

$$C \cong \frac{\varepsilon_i}{d + \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_s} W_m} \quad (2.27)$$

bağıntısıyla verilir.

2.2.4. İdeal olmayan MIS diyotlar

Gerçekte, yani ideal olmayan durumda, MIS diyotta metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarındaki Φ_{ms} farkı sıfır değildir. Bu yüzden, düz bant voltaj kayması V_{FB} ,

$$V_{FB} = \Phi_{ms} - \frac{Q_{ox}}{C_i} \quad (2.28)$$

bağıntısıyla verilir.

Aynı şekilde, düz-bant voltajı, şimdiye kadar ihmal edilmiş olan oksit içindeki Q_{ox} yükleriyle kayabilir. Böyle yükler oksit içinde tuzaklanmış, sabitleşmiş veya hareketli (Na gibi iyonik yükler) olabilirler.

Metal olarak Al ($\Phi_m = 4.1$ eV) ve n-tipi Si ($\Phi_s = 4.35$ eV) için, düz-bant voltaj kayması sıfır beslem için $\Phi_{ms} = -0.25$ V dur.

2.3. Norde Fonksiyonları Kullanılarak Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi

Metal-yarıiletken kontak yapılarının doğru beslem altındaki I - V karakteristiklerinden, Schottky diyot parametrelerinin bulunabilmesi için ideal bir Schottky diyotta (idealite faktörü n 'nin 1'e eşit olduğu diyotlarda) seri direnç değerini elde etmek için Norde tarafından bir metot geliştirilmiştir (Norde 1979).

$n = 1$ durumu için seri direnç ve engel yüksekliğini tanımlayan $F(V)$ fonksiyonu Norde tarafından:

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (2.29)$$

şeklinde verilmiştir. Bu bağıntıda $I(V)$ ifadesi, termoiyonik emisyon teorisinden elde edilen akımdır ve ayrıca akım yoğunluğu

$$I = AJ = \left[AA^*T^2 \exp \left(\frac{-q\Phi_b}{kT} \right) \right] \left[\exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2.30)$$

bağıntısı ile verilir.

V 'nin $F(V)$ 'ye göre grafiğinin çizilmesi ile engel yüksekliği Φ_b :

$$\Phi_b = F(V_{min}) + \frac{V_{min}}{2} - \frac{kT}{q} \quad (2.31)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Bu ifade de $F(V_{min})$, $F(V)$ 'nin minimum değeridir ve V_{min} minimum voltaj değeridir.

Sato ve Yasamura (1985), Norde tarafından ortaya atılan teoriyi geliştirerek Schottky diyot parametreleri R_s , Φ_b ve n değerlerini, idealite faktörünün 1'den büyük olduğu ($1 < n < 2$) durumlarda hesapladılar.

(2.30) bağıntısında eşitliğin her iki tarafının logaritması alınarak (2.29) bağıntısında yerine konulursa;

$$F(V) = \left(\frac{n-2}{n}\right)V + \frac{IR_s}{n} + \Phi_b \quad (2.32)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikte $R_s = 0$ ideal durumu için $F(V)$ - V grafiğinin eğimi $(n-2)/2n$ olan bir doğru şeklindedir ve bu doğrunun $F(V)$ eksenini $V=0$ 'da kestiği nokta Φ_b engel yüksekliğini verir. Seri direnç sıfırdan farklı olduğu durumlarda ise $F(V)$ fonksiyonu bir minimumdan geçer ve

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{V}{AA^*T^2R_s} \right) \quad (2.33)$$

bağıntısı ile verilebilir. (2.33) eşitliğinin V 'ye göre türevi alınarak düzenlenirse,

$$\frac{\partial F(V)}{\partial V} = \frac{1}{2} \left[\frac{(n-2)}{2} + \frac{\beta IR}{n + \beta IR} \right] = \frac{n-2 + \beta IR}{2(n + \beta IR)} \quad (2.34)$$

ifadesi elde edilir. $F(V)$, $\beta = kT/q$ ve $\partial F(V)/\partial V = 0$ şartlarında bir minimumdan geçer. Minimumdaki akım değeri I_{0i} ve gerilim değeri ise V_{0i} dır. Bu ifade de,

$$\frac{n-2 + \beta I_{0i} R_i}{2(n + \beta I_{0i} R_i)} = 0 \quad (2.35)$$

$$n - 2 + \beta I_{0i} R_i = 0 \quad (2.36)$$

eşitlikleri yazılır. Bu eşitlikte R_i ve Φ_b ifadeleri için sırasıyla;

$$R_i = \frac{(2-n) kT}{I_{oi} q} \quad (2.37)$$

$$\Phi_b = F(V_{oi}) + \left(\frac{2-n}{n}\right) V_{oi} - \left(\frac{2-n}{n}\right) \frac{1}{\beta_i} = F(V_{oi}) + \left(\frac{2-n}{2n}\right) \left(\frac{V_{oi}}{2} - \frac{kT_i}{q}\right) \quad (2.38)$$

bağıntıları elde edilir. Bu ifadelerde R_i , β_i , V_{oi} ve I_{oi} ($i=1,2,\dots,n$) farklı sıcaklıklara karşılık gelen değerlerdir. Norde fonksiyonunun ilk terimi olan $\frac{V}{2}$ ifadesi

yerine K. E. Bohlin $\frac{V}{\gamma}$ kullanarak Norde fonksiyonunu (2.39) eşitliğindeki gibi türetmiştir (Bohlin 1986). Bu eşitlikte γ ; idealite faktöründen büyük, isteğe bağlı sabittir. Norde fonksiyonu $F(V)$,

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (2.39)$$

şeklinde K. E. Bohlin tarafından tanımlanmıştır. Bu eşitlikte $I(V)$ değeri I - V grafiğinden elde edilen akımdır. (2.39) eşitliğinin logaritması alınırsa,

$$F(V) = \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n}\right) V + \frac{IR_s}{n} + \Phi_b \quad (2.40)$$

bağıntısı elde edilir. İdeal diyotta $R_s=0$ olduğu düşünülürse $F(V)$ 'nin V 'ye göre grafiği, eğimi $(n-\gamma)/\gamma$ olan bir doğru olur. $R_s \neq 0$ ise bu fonksiyon,

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (2.41)$$

şeklinde olur. Bu fonksiyon yüksek voltaj değerlerinde eğimi $1/\gamma$ olan bir doğruya yaklaşır.

$F(V)$ fonksiyonunun V 'ye göre türevini alıp minimum noktada sıfıra eşitlersek,

$$I_m = \frac{\gamma - n}{\beta R_s} \quad (2.42)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntıdaki I_m ifadesi minimum noktadaki akım değeridir. Son durumda seri direnç ve engel yüksekliği eşitlikleri,

$$R_s = (\gamma - n) \frac{kT}{qI_m} \quad (2.43)$$

$$\Phi_b = F_m \left[\frac{(\gamma - n)}{n} \right] \left[\frac{V_m}{\gamma} \frac{kT}{q} \right] \quad (2.44)$$

olarak elde edilir. Bu eşitliklerde V_m minimum noktadaki gerilim ve F_m 'de minimum akım ve gerilim değerlerine karşılık gelen Norde fonksiyonunun minimum değeridir.

2.4. Cheung Fonksiyonları Kullanılarak Schottky Diyot Karakteristiklerinin Elde Edilmesi

Metal-yarıiletken kontak yapısına ait doğru beslem I - V karakteristikleri kullanılarak Schottky engel diyot parametrelerinin hesaplanmasında Cheung (1986) tarafından farklı bir yöntem ileri sürülmüştür (Temirci 2000). Diyodun etkin alanı A , termoiyonik emisyon yönteminden elde edilen J akım yoğunluğu ile çarpılırsa diyottan geçen toplam akım değeri;

$$I = AJ = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.45)$$

şeklinde elde edilir (Rhoderick and Williams, 1988). $qV \gg kT$ ise bu ifade de, 1 ihmal edilebilir. Pratikte uygulanan gerilimin tamamının tükenim bölgesine düşmediği dikkate alındığı zaman, ideal durumdan sapmalar gözlenecektir. Bu sapmaları açıklayabilmek için birimsiz sabit olan idealite faktörünü göz önüne aldığımızda bağıntı aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$I = AJ = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.46)$$

Bu bağıntıda uygulanan V geriliminin IR_s kadarlık kısmı seri direnç üzerine düşeceğinden dolayı V yerine $V - IR_s$ yazarsak yukardaki bağıntı

$$I = AJ = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.47)$$

şeklinde elde edilir. (2.47) bağıntısının tabii logaritması alınıp, V'ye göre çözümü yapılırsa,

$$V = \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) + n\Phi_b + IR_s \quad (2.48)$$

bağıntısı elde edilir. (2.48) ifadesinin $\ln I$ 'ya göre türevi alınır;

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (2.49)$$

bağıntısı elde edilir. (2.49) ifadesinde $\frac{dV}{d(\ln I)}$ 'nın I'ya göre grafiği bir doğru olacaktır.

Bu grafik kullanılarak hesaplanan doğrunun eğimi R_s seri direncini ya da nötral bölge direncini verecektir. Doğrunun düşey eksenini kestiği nokta yardımı ile idealite faktörü hesaplanabilir (Temirci 2000). Φ_b potansiyel engelini elde etmek için bir $H(I)$ fonksiyonu:

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) \quad (2.50)$$

tanımlanabilir. (2.48) ve (2.49) bağıntılarından;

$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (2.51)$$

yazılabilir. $H(I)$ - I grafiği (2.51) bağıntısı kullanılarak çizildiğinde, çizilen bu grafiğin de bir doğru şeklinde olduğu görülür ve bu doğrunun eğimi bize R_s seri direncini verir. Doğrunun $H(I)$ eksenini kestiği nokta yardımıyla da $q\Phi_b$ engel yüksekliği bulunur (Cheung and Cheung 1986).

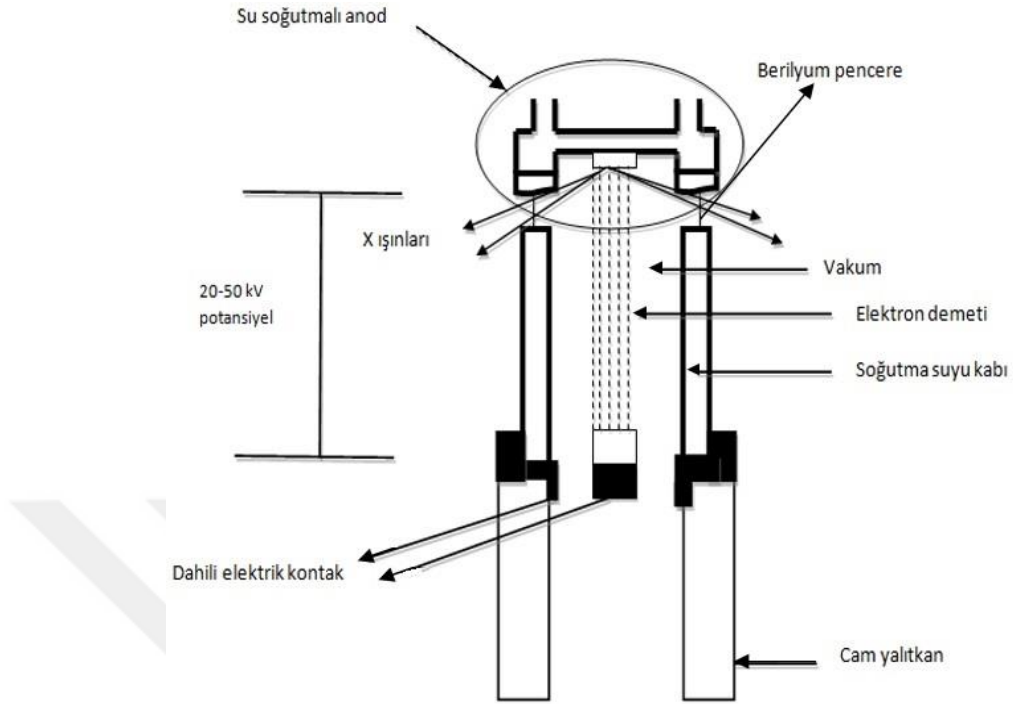
2.5. Yapısal ve Yüzeysel Karakterizasyon Teknikleri

2.5.1 X- Işını difraksiyonu

X-ışını kırınımı bir angström mertebesinde dalga boyuna sahip elektromanyetik dalgaları kullanır. Dalga difraksiyonu, incelenen maddenin boyutları gelen dalganın dalga boyu ile aynı büyüklük mertebesinde olduğu zaman meydana geldiğinden dolayı X-ışınları kristal örgü yapılarını incelemek için idealdirler.

Yarıiletken ince filmlerin X-ışını kırınimleri genellikle bir kırınım ölçer ile gerçekleştirilir. X-ışınlarının kaynağı X-ışınları tüpü olarak (Şekil 2.12) adlandırılır ve su soğutmalı bakır hedeften oluşur. Bu bakır hedef vakum tüpünün içine isabet eden hızlandırılmış elektron demetini durdurur. Bremsstrahlung etkisinden dolayı, X-ışınları bakır elementinin karakteristik dalga boylarında yayılır. Bu elastik olmayan etkileşimler sayesinde X-ışınları yüksek enerjilere sahip ışınlar olarak yayılırlar. Daha sonra bu X-ışınları filtre edilirler ve X-ışınlarının yansımaya izin verilen özel seçilmiş açılarda yerleşmiş neredeyse mükemmel silikon kristalden oluşan monokromotörün kullanımıyla bir ışın demeti olarak kolime edilirler.

Farklı atomlardan kırılan dalgalar birbirleri ile girişim yapabilirler ve sonuçlanan yoğunluk dağılımı bu etkileşim tarafından güçlü bir şekilde modüle edilmiştir. Eğer atomlar kristaldeki gibi periyodik bir tarzda dizilmişlerse, kırınım dalgaları atomların dağılımındaki benzer simetri ile birlikte maksimum ve keskin bir pikden ibaret olacaktır. Bu yüzden kırınım deseni ölçümü bir malzemede atomların dağılımını anlamamıza imkan sağlar.

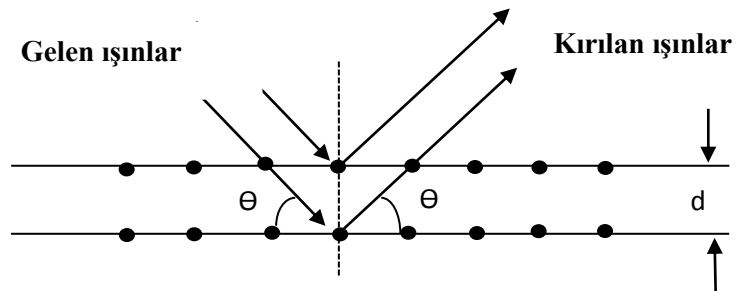


Şekil 2.12. X-ışınları tüpünün şematik diyagramı

X-ışını kırınım deseninde pikler, doğrudan doğruya atomlar arası mesafeler ile ilgilidir. Düzlemler arası mesafesi d olan bir örgü düzlemleri için difraksiyonun oluşum şartı Bragg Kanunu kullanılarak bulunabilir:

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.52)$$

Burada; θ gelme açısı, λ X-ışınlarının dalgaboyu ve n difraksiyon pikinin mertebesini temsil eden tamsayıdır. Bu işlem Şekil 2.13’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Bir kristal tarafından X-ışınlarının kırınımının şeması

Yarıiletkenlerden alınan X-ışını kırınım ölçümleri aşağıdaki yararlı bilgileri sağlayabilir:

Örgü sabitleri: Büyüme düzlemine dik altlık ve epilayer (altlığın üzerine büyütülen tabaka) arasındaki uyum tayin edilebilir.

Rocking eğrisi: Yarı maksimumda tam genişlik olarak da adlandırılan (FWHM) X-ışını rocking eğrisinin genişliği epilayerdeki dislokasyonların sayısı ile ters orantılıdır. Bu nedenle bu ölçümler film kalitesinin bir ölçüsü olarak kullanılabilirler.

Süper örgülerin kalitesi ve kalınlığı: Süperörgü gibi çoklu tabakalı yapılarda çeşitli tabaka kalınlıkları, ana pikin kenarlarında görülen uydu pikler arasındaki mesafe ile tayin edilebilir. Aynı zamanda uydu piklerin sayıları ve şiddetleri film kalitesinin bir ölçüsüdür.

X-ışını kırınım verilerinden filmlerdeki kristallerin yapısı hakkında ayrıntılı bilgi edinmek için, Scherrer denklemi kullanılarak tanecik büyüklüğü (D), dislokasyon yoğunluğu (δ) ve microstrain (ϵ) değerleri aşağıdaki denklemlerden hesaplanabilir (Bedir *et al.* 2013);

$$D = \frac{0,9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (2.53)$$

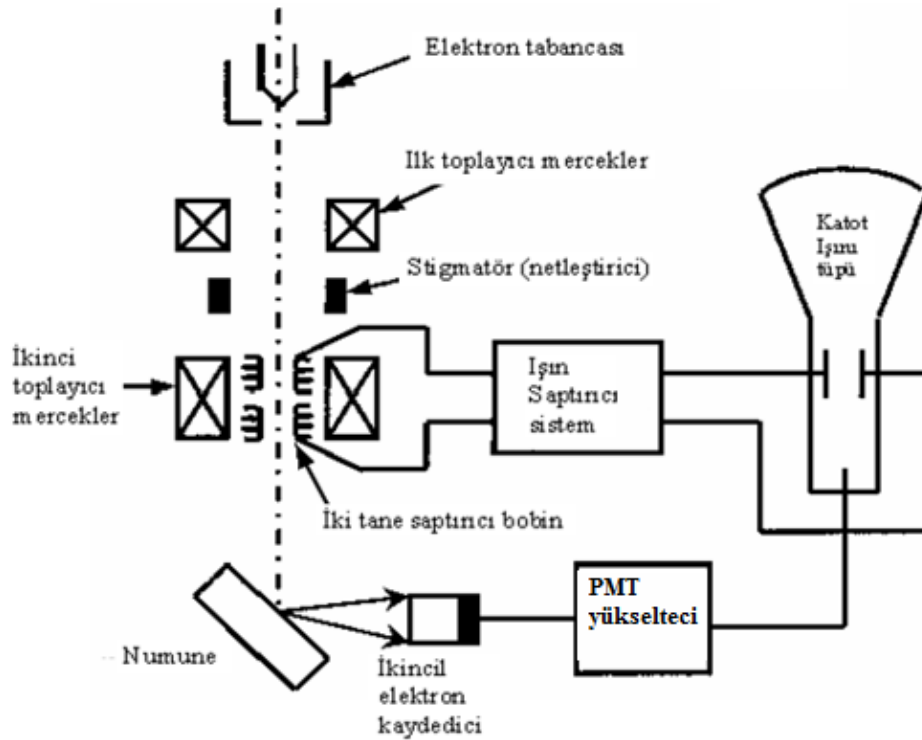
$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (2.54)$$

$$\epsilon = \frac{\beta}{\tan\theta} \quad (2.55)$$

Burada λ kullanılan X-ışınının dalga boyunu, θ Bragg yansıma açısını, β ise radyan olarak yansımaların yarı maksimum genişliğini (FWHM) gösterir.

2.5.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Bir taramalı elektron mikroskobu, yarıiletken karakterizasyonunda geniş çapta kullanılmaktadır. Şekil 2.14’de tipik bir SEM sistemi gösterilmiştir. Elektronlar termoiyonik olarak yada alan emisyon yoluyla tungsten katottan yayılırlar ve 2 ardışık mercek tarafından oldukça dar bir ışın halinde odaklanırlar. İki çift bobin numune yüzeyinin dikdörtgen alanı üzerinde ışını alarak saptırır. Numune üzerine çarpan birincil elektronlar enerjilerini esnek diğer atomik elektronlara ve örgüye aktarırlar. Çok sayıda rastgele saçılma süreçleri sayesinde yüzeyden ayrılan bazı elektronlar numuneye bakan dedektör tarafından toplanır ve kaydedilir. Genellikle dedektör tarafından toplanan elektronlar birkaç angströmden daha büyük olmayan derinlikten kaynaklanan ikincil elektronlardır. Bir fotoçoğaltıcı tüp (PMT) yükselteci, sinyal ve çıkış yükseltmek için kullanılır, bir katot ışını tüpünün şiddetini ayarlama görevi yapar. SEM’lerin genellikle araştırma kaliteleri yaklaşık olarak 50 A° çözünürlükte görüntüler üretebilirler.



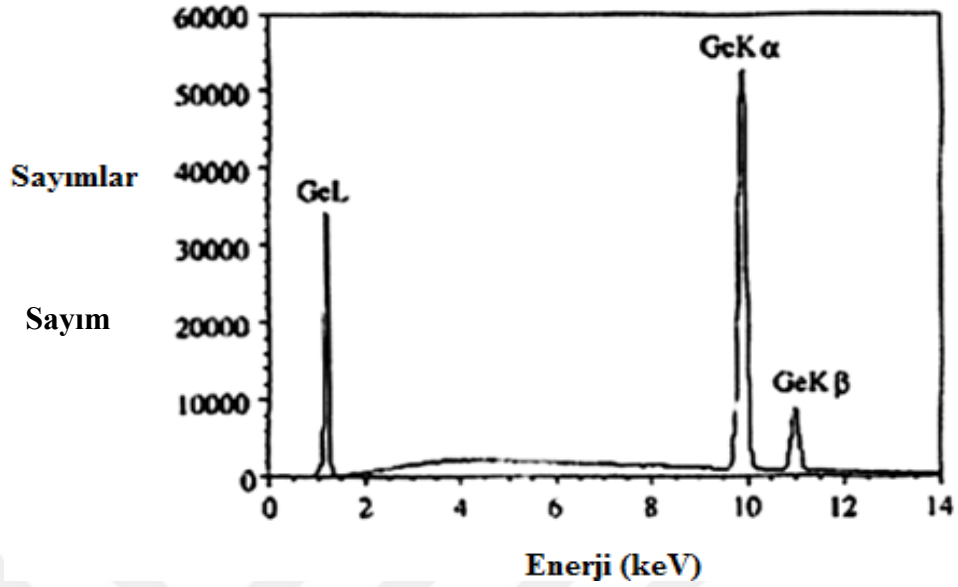
Şekil 2.14. SEM in şeması

SEM ile yalnızca yüzey görüntüsü elde edilmez, aynı zamanda numunenin döndürülmesiyle, yapı içindeki çeşitli tabakaların kalınlıkları hakkında da bilgi elde edilir (kesit SEM).

2.5.3. X Işınlarnı kullanarak enerji dağılım analizi (EDAX)

EDAX'da atomun dış kabuğundaki bir elektron (ör: 2s kabuğu) daha alt bir kabuktaki boşluğa geçer (ör: 1s kabuğu) ve enerjisini düşürür ve bunun sonucu olarak da bir X ışını yayınlanır. Yayınlanan bu X ışınları, emisyonu maruz kalan atomun karakteristiğidir. Bu yüzden, atomun X ışını spektral çizgilerine bakılarak, o spesifik atom belirlenebilir.

EDAX sistemlerinin çoğunluğu incelenen numunede x-ışınlarını uyarması için benzer elektron demeti kaynağını kullanan SEM ile bağlantılıdır. Soğutulmuş bir Si(Li) dedektörü (Si dedektör içine Li katkılanmış) X ışınlarını dedekte etmek için kullanılır. Numuneden yayılan X ışınının dedektör tarafından kaydedilmesi sonucu bir fotoelektron oluşur. Bu fotoelektron sırayla elektron-hol çifti oluşturur. Elektron-hol çiftlerinin sayısı ya da oluşturulan voltaj pulsunun eşdeğer genliği gelen fotonun enerjisi ile orantılıdır. Yükseltme, sıralama ve saymadan sonra gerilim (enerji) aralığındaki pulsları kaydettikten sonra son spektrum elde edilir. Şekil 2.15'de örnek bir EDAX grafiği gösterilmiştir.

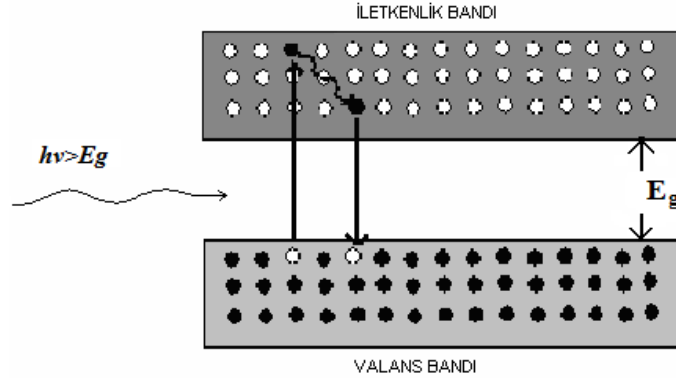


Şekil 2.15. Örnek bir EDAX grafiği

*Ge'dan yayılan çok sayıdaki çizgiler değişik elektron enerji geçişlerine karşılıktır.

2.6. Yarıiletkenlerde Optik Soğurma

Bir yarıiletken üzerine foton düşürüldüğü zaman yarıiletkenin yasak enerji aralığına ve gelen fotonun enerjisine bağlı olarak foton soğrulabilir veya yarıiletken bu foton için geçirgen olabilir. Şayet gelen fotonun enerjisi ($E=h\nu$), yarıiletkenin yasak enerji aralığından (E_g) küçük ise foton soğrulmaz. Şayet gelen fotonun enerjisi yarıiletkenin yasak enerji aralığından büyükse bu durumda foton valans elektronu ile etkileşir ve gelen fotonun enerjisini alarak iletkenlik bandına geçer. Bu süreç sonucunda iletkenlik bandında bir elektron ve valans bandında da bir hol, yani elektron-hol çifti (eksiton) meydana gelir ve fazlalık enerji örgüye fonon olarak aktarılır.



Şekil 2.16. Yarıiletken tarafından bir fotonun optik soğurulması

2.6.1. Direkt ve indirekt bandgap soğurması

Yarıiletkenlerde, valans bandından iletkenlik bandına elektron geçiş durumlarına göre bandgap soğurması direkt ve indirekt olmak üzere ikiye ayrılır.

Direkt band aralığına sahip yarıiletkenlerde bir valans elektronu, enerjisi en az yasak enerji aralığının değerine eşit veya ondan daha büyük olan bir fotonu ($h\nu \geq E_g$) soğurur ve iletkenlik bandına geçer. Bu geçişte momentum korunumu;

$$\hbar k_e + \hbar k_h = 0$$

bağıntısıyla verilir.

$\hbar k_e$ ve $\hbar k_h$; elektronların ve hollerin kristal içerisindeki sahip oldukları kristal momentumlarıdır. Bu tür geçişlerde enerji de korunmaktadır.

İndirekt bandgap; iletkenlik bandının minimumu ile valans bandının maksimumunun enerji-momentum uzayında aynı k değerinde olmadığı durumda görülür. Bu bandgap yapısına sahip yarıiletkenlerde valans bandından iletkenlik bandına bir elektronun momentumunu koruyarak geçiş yapabilmesi için bir fononun soğurulması veya salınması gerekir. Bu durumda momentum korunumu,

$$\hbar k = \hbar k_c \pm \hbar k_q = 0$$

şeklinde verilir (Kittel 1986). Bu bağıntıda;

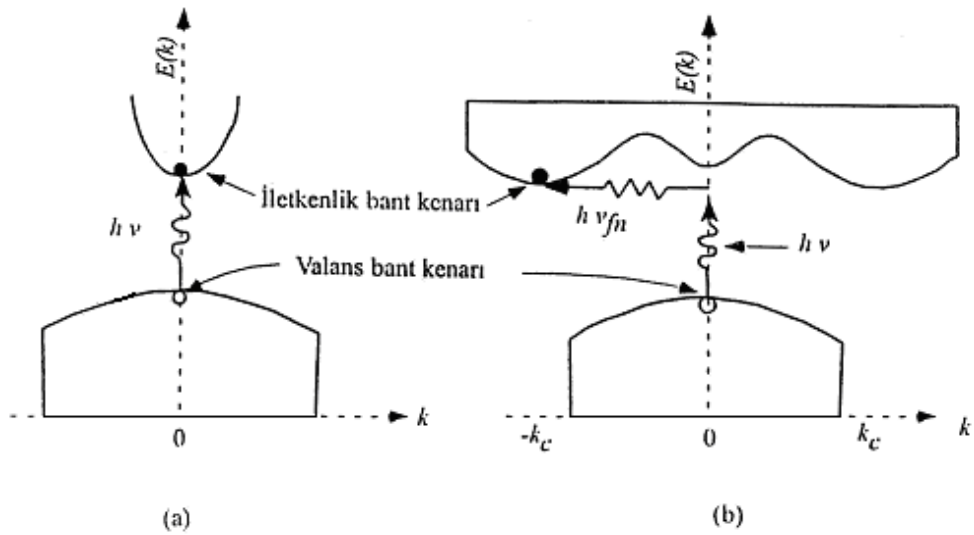
k_q : Fotonun dalga vektörü

k_c : k uzayında valans bandının maksimumu ile iletim bandının minimumu arasındaki farktır.

Bu tür geçişlerde fononun enerjisi,

$$\hbar v = E_g \pm \hbar v_{fn}$$

bağıntısıyla verilir. Bu ifadede $\hbar v_{fn}$ fononun enerjisidir; (+) fonon salınması, (-) ise fonon soğurulması anlamına gelmektedir.



Şekil 2.17. Yarıiletkenlerde (a) direk bandgap soğurması, (b) indirek bandgap soğurması

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. p-Si Kristalinin Temizlenmesi

Bilindiği üzere yarıiletken malzeme ve aygıtlardan ideal sonuç alınabilmesi için yüzeyin organik, oksit ve mekanik kirlere arındırılması şart olduğundan numune temizliği önemlidir. Genellikle yarıiletkenler önce mekanik olarak parlatılıp, daha sonra kimyasal olarak temizlenirler. Ancak bu çalışmada kullanılan p-Si yarıiletkeninin yüzey parlatılması fabrikasyon olarak yapıldığından mekanik temizlemeye ihtiyaç duyulmaksızın direkt olarak kimyasal temizleme işlemine geçildi. Si yarıiletkeninin yüzey temizliği için en yaygın olarak kullanılan RCA temizleme yöntemi tercih edildi. Bu yöntem Si yüzeyindeki organik kalıntıların ve numunenin hava ortamı ile temas etmesi sonucu yüzeyinde oluşan oksit tabakalarının Si yüzeyden atılması için kullanılan bir yöntemdir.

Numune kimyasal temizleme işleminde ilk olarak Asetonda ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı. Buradan alındıktan sonra Metanol içerisinde atılarak 10 dakikada burada ultrasonik olarak yıkandı ve bu işlemten sonra deiyonize su ile iyice yıkanarak azot gazı ile kurutuldu. Diğer yandan Si temizleme için tercih edilen RCA temizleme yönteminin RCA-1 olarak adlandırılan ilk aşamasına geçildi. Bu aşama için ilk olarak ($H_2O:H_2O_2:NH_3;6:1:1$) çözeltileri belirtilen oranlarda karıştırılarak içerisinde temizlenecek numune atıldı ve $60^\circ C$ 'de 10-15 dakika ısıtılma işlemine tabi tutuldu. Bu işlemten sonra numune soğuyan çözelti içerisinde alındı deiyonize suyla iyice yıkandı ve ($H_2O:HF;10:1$) seyreltik HF çözeltisi içine atıldı ve 30 saniye yıkandı. Seyreltik HF işleminden sonra deiyonize suyla iyice yıkanarak RCA-2 aşamasına geçildi. RCA-2 için ($H_2O:H_2O_2:HCl;6:1:1$) çözeltisi hazırlandı, RCA-1 aşamasındaki gibi numune bu çözelti içerisinde $60^\circ C$ 'de 10-15 dakika ısıtılma işlemine tabi tutuldu. Bunun sonrasında deiyonize suyla iyice yıkanarak azot gazı ile kurutuldu. Böylece tamamlanan kimyasal temizleme işleminin ardından Si numune havayla temasının kesilmesi için önceden hazırlanan kaplama ünitesine alındı.

3.2. p-Si Kristaline Omik Kontak Yapılması

Omik kontak işlemine geçmeden önce omik kontak yapımında kullanılacak Al metali %10'luk seyreltilmiş HF ile 30 saniye, kullanılan molibden ısıtıcı ise %10 luk seyreltilmiş HCl ile yıkanarak deiyonize suda iyice çalkalandı ve azot gazı ile kurutuldu. Molibden ısıtıcı kaplama ünitesindeki yerine takıldıktan sonra, kontak metali Al ısıtıcı üzerine yerleştirildi. Uygun yükseklik ayarlanarak omik kontak yapılacak p-Si yarıiletkeni, mat tarafı ısıtıcıya dönük bir şekilde temizlenmiş cam lameller üzerine kondu. Tekrar üzerine cam lamel konarak düşmesi engellendi. Bu işlemlerden sonra kaplama ünitesi vakuma alındı. Vakum odasındaki basınç yaklaşık olarak 10^{-7} torr değerine düşünce ısıtıcıya akım verilerek metal eritildi ve arkasından buharlaştırıldı. Bu işlemler bitince vakum odasına hava verilerek, kaplanmış numune vakum cihazından çıkarılarak tavlama işlemi için kuartz potaya konarak önceden ısıtılarak 580°C ye ayarlanmış fırın içerisine yerleştirildi ve 3 dakika tavlandı. Tavlama süresince numunenin oksitlenmemesi ve fırın içindeki kirliliklerden etkilenmemesi için tavlama fırınına inert bir gaz olan azot gazı verildi. 3 dakika sonunda kuartz pota cam çubuk yardımıyla fırının girişine doğru çekildi ve bir süre soğuması beklendi. Böylelikle tüm bu işlemler sonucunda p-Si yarıiletkeninin omik kontağı yapılmış oldu. Buharlaştırma için kullanılan cihaz ve tavlama fırını sırasıyla Şekil 3.1 ve 3.2'de gösterilmiştir.



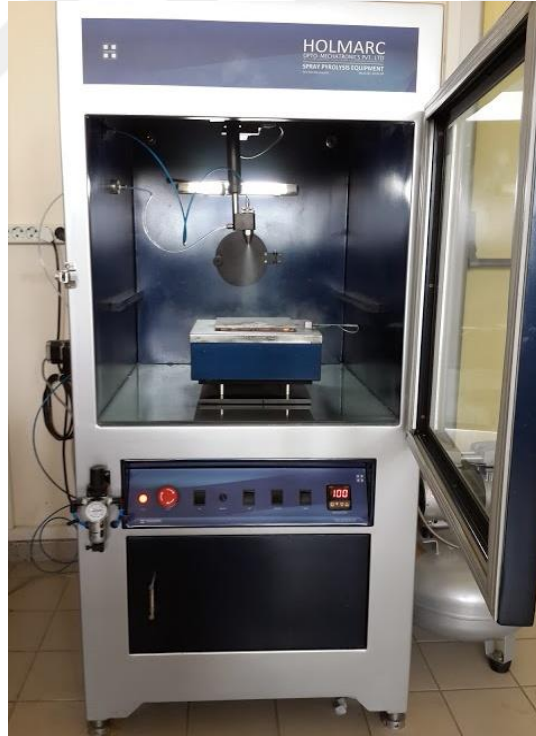
Şekil 3.1. Buharlaştırma işlemi için kullanılan cihaz.



Şekil 3.2. Tavlama Fırını

3.3. Kimyasal Püskürtme Yöntemiyle CdS İnce Filminin p-Si Yarıiletkeni Üzerinde Büyütülmesi

Kimyasal Püskürtme (Spray Pyrolysis) yöntemi; elde edilmek istenilen ince filmin oluşumunda kullanılacak çözeltilerin belli molaritelerde ve hacimlerde karıştırılarak ısıtılmış altlık üzerine püskürtülmesi süreçlerini içeren kimyasal bir çöktürme tekniğidir (Afify *et al.* 1991; Vigil *et al.* 2000). Bu yöntem, ince film üretiminde farklı oranlarda katkılama yapmaya olanak sağlaması, düşük maliyetli olması ve geniş alana uygulanabilmesi özelliklerinden dolayı oldukça kullanışlıdır. Aynı zamanda istenilen özellikte homojen filmler üretmek için elverişlidir (Patil 1999). Yukarıda sayılan özelliklerden dolayı bu çalışmada film üretimi için bu yöntem kullanılmıştır. Kimyasal püskürtme işleminin yapıldığı cihaz Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Kimyasal püskürtme işleminin yapıldığı cihaz

Bu yöntem kullanılarak üretilen filmlerde film kalınlığını etkileyen parametreler;

- Çözeltinin molaritesi ve püskürtülme oranı (flow rate)
- Püskürtme hızı
- Altlık malzeme
- Taşıyıcı gazın cinsi
- Püskürtme süresi
- Püskürtme başlığı ile taban malzeme arasındaki mesafe şeklinde sıralanabilir (Krishnakumar *et al.* 1987).

CdS ince filmi üretiminde ilk olarak cihaz içerisindeki üzerine altlık malzemenin konulacağı blok temizlenmiştir. Daha sonra $1 \times 1 \text{ cm}^2$ boyutunda kesilmiş ve omik kontak yapılmış olan p-Si yarıiletkeni blok üzerine yerleştirilmiştir. Sistem içerisindeki sıcaklık kontrol ünitesi yardımıyla taban sıcaklığı 400°C 'ye ayarlanmıştır. CdS filmi üretebilmek için uygun çözeltiler hazırlanmıştır. Bu çözeltilerde Cd kaynağı olarak CdCl_2 ve S kaynağı olarak da $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$ kullanılmıştır.

Kullanılan çözeltilerin molekül ağırlığı ve molariteleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Çözeltiler hazırlanırken çözücü olarak deiyonize su kullanılmıştır. Çizelge 3.1'de gösterilen molaritelerde hazırlanan çözeltiler 1:1 oranında olacak şekilde alınıp manyetik karıştırıcı ile karıştırılarak başlangıç çözeltisi hazırlanmıştır ve bu karışım sistemin özel bölümüne yüklenmiştir.

Çizelge 3.1. Çözelti hazırlamada kullanılan bileşiklerin molariteleri ve molekül ağırlıkları

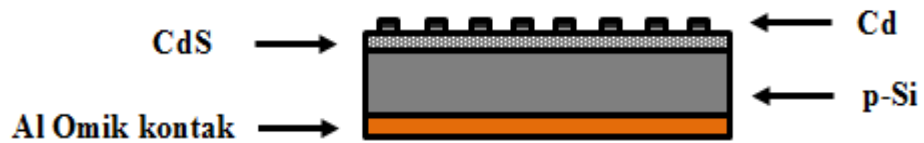
Element	Bileşikler	Molekül Ağırlığı	Molarite
Cd	CdCl_2	183,306 g/mol	0,1
S	$\text{CS}(\text{NH}_2)_2$	76,11 g/mol	0,1

Hazırlanan çözelti yaklaşık 20 dakika süreyle p-Si altlık üzerine püskürtülmüştür. Sistemde taşıyıcı gaz olarak sıkıştırılmış hava kullanılmıştır. İstenilen film kalınlığı

gözlendikten sonra çözelti akışına son verilmiştir fakat filmin homojenliği için hava akışına yaklaşık 10 dakika daha devam edilmiştir. Soğuyan filmler, temizlenmiş numune kutularına alınmıştır. Uygun altlık sıcaklığı (400°C), püskürtme hızı (4 ml/dk) ve püskürtme süresi (20 dk) gibi parametreler yapılan denemeler sonunda elde edilmiştir.

3.4. Cd/CdS/p-Si/Al Yapının Üretilmesi ve Elektriksel Karakterizasyonu

Al omik kontaklı p-Si altlık üzerine kimyasal püskürtme yöntemiyle CdS ince filmi büyütüldükten sonra, ince film üzerinde kontak alanını belirlemek için 1 mm çapındaki dairesel deliklere sahip maske kullanılarak 10^{-7} torr basınç altındaki kaplama ünitesinde Cd metali buharlaştırılmıştır. Bu işlem sonucunda Cd/CdS/p-Si/Al yapısı elde edilmiştir. Elde edilen yapının kesit görünümü Şekil 3.4’de verilmiştir. Üretilen Cd/CdS/p-Si/Al numune krostat içine yerleştirilerek 300 K- 80 K sıcaklık aralığında 20 K adımlarla, sıcaklığa bağlı I-V ölçümleri alınmıştır. I-V ölçümlerinin alınmasında Şekil 3.5’de gösterilen “KEITHLEY 487 Picoammeter/Voltage Source” cihazı kullanılmıştır. Sıcaklığa bağlı I-V ölçümleri tamamlandıktan sonra aynı zamanda numunenin oda sıcaklığında ve farklı frekanslarda (50 kHz, 100 kHz, 300 kHz, 500 kHz ve 1000 kHz) Şekil 3.6 da gösterilen “HEWLET PACKART 4192 A, (50 Hz-13 MHz) LF IMPEDENCE ANALYZER” cihazı kullanılarak C-V ölçümleri alınmıştır. Alınan I-V ve C-V ölçümlerinden temel diyot parametreleri hesaplanmıştır.



Şekil 3.4. Cd/CdS/p-Si/Al yapının şematik görünümü



Şekil 3.5. I-V ölçüm sistemi



Şekil 3.6. C-V ölçüm sistemi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Giriş

Bu bölümde, önce p-Si ve cam altlıklar üzerine büyütülen CdS ince filmlerinin soğurma, XRD ve SEM ölçümleri alınarak optik, yapı ve yüzey değerlendirmeleri yapılmıştır. Daha sonra üretilen Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapısının 80 K ile 300 K sıcaklık değerleri arasında 20 K adımlarla elde edilen I-V karakteristiklerinden; sızıntı akımı I_0 , idealite faktörü n , engel yüksekliği Φ_b ve seri direnç R_s gibi bazı temel elektriksel parametreler Termoiyonik Emisyon, Norde ve Cheung Metodları kullanılarak hesaplanmıştır. Tüm sonuçlar elde edildikten sonra bu üç metotla hesaplanan engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç değerleri mukayese amacıyla aynı grafikte gösterilmiştir. Daha sonra oda sıcaklığında ve farklı frekanslarda alınan ters beslem C-V ölçümlerinden difüzyon potansiyeli V_d , akseptör atomlarının katkı yoğunluğu N_a , Fermi enerjisi E_F ve engel yüksekliği Φ_b hesaplanarak tablolar halinde verilmiştir.

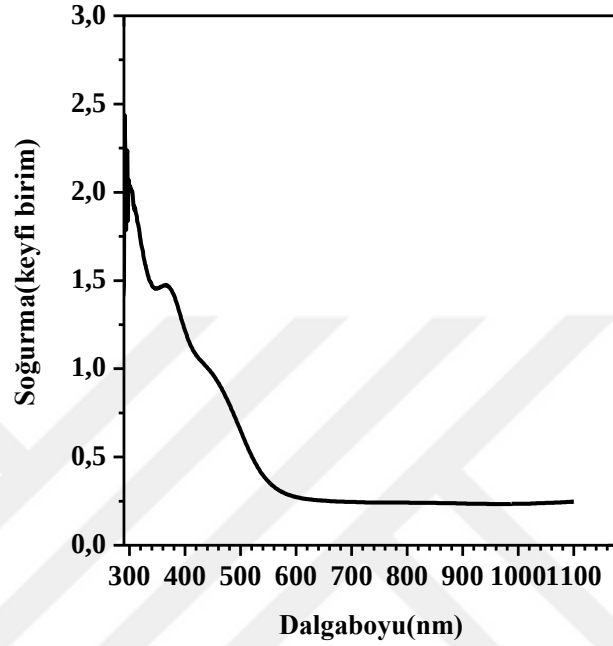
4.2. CdS İnce Filmlerinin Optik, Yapı ve Yüzeysel Özelliklerinin Analizleri

Cam altlık üzerine kimyasal püskürtme yöntemi ile büyütülen CdS ince filmin optik soğurma ölçümleri alınarak, filmin yasak enerji aralığı hesaplanmıştır. XRD, EDAX ve SEM ölçümleri ile p-Si altlık üzerine büyütülen CdS ince filminin yapısal özellikleri incelenmiştir.

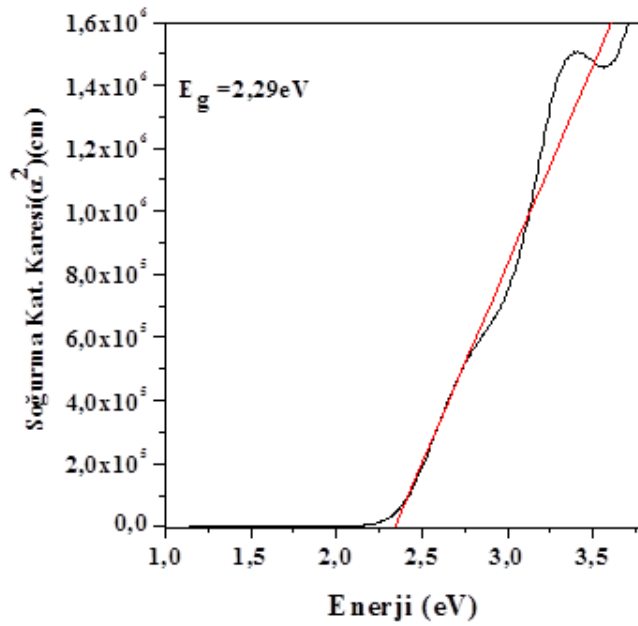
4.2.1. Soğurma ölçümlerinin alınması

Cam altlık üzerine büyütülen CdS ince filminin soğurma ölçümleri kullanılarak çizilen soğurma-dalgaboyu grafiği Şekil 4.1’de, $\alpha^2-h\nu$ grafiği ise Şekil 4.2’de gösterilmiştir. $\alpha^2-h\nu$ grafiğinin doğrusal kısmına çizilen doğrunun, enerji eksenini kestiği nokta

kullanılarak CdS ince filminin yasak enerji aralığı 2.29 eV olarak hesaplanmıştır ve bulunan bu değerin literatürle uyumlu olduğu görülmüştür (Shabana *et al.* 2016).



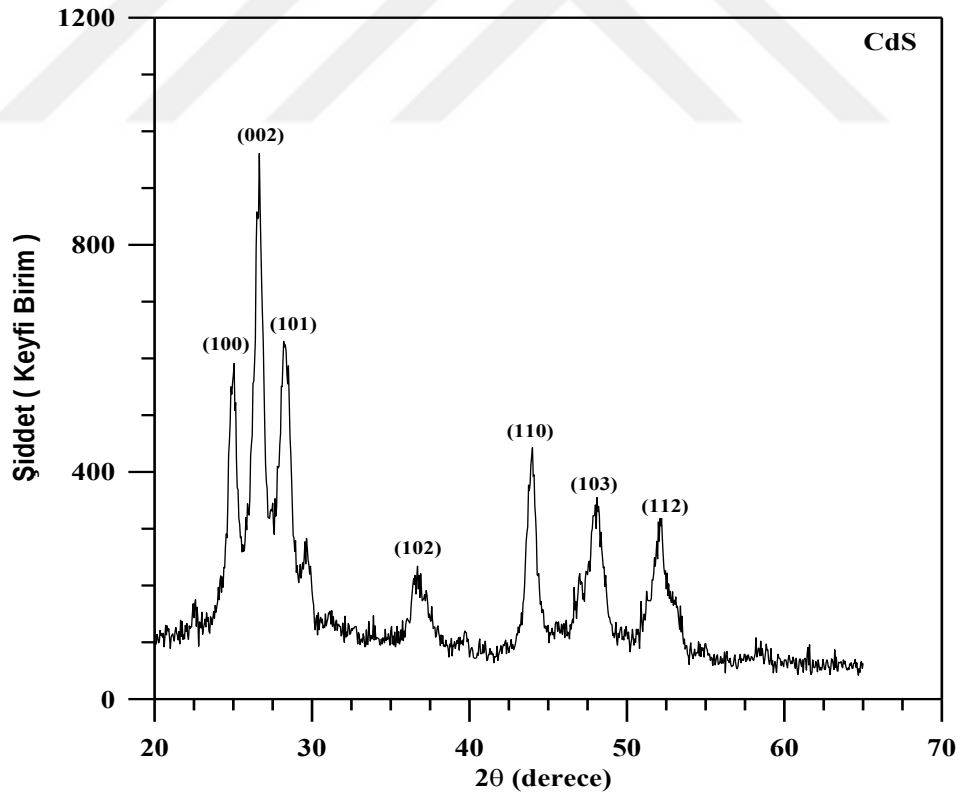
Şekil 4.1. Cam altlık üzerine büyütülen CdS ince filminin soğurma-dalgaboyu grafiği



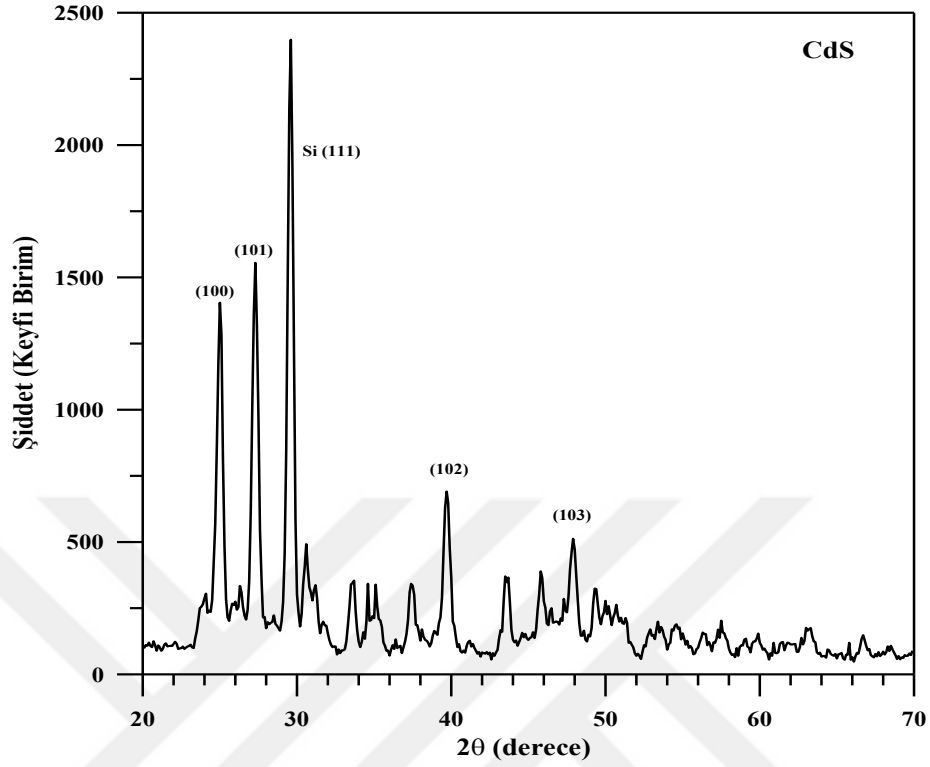
Şekil 4.2. Cam altlık üzerine büyütülen CdS ince filminin $\alpha^2-h\nu$ grafiği

4.2.2. CdS ince filminin X-Işını difraksiyonu

X-ışını kırınım deseni verileri, bir numunede atomların dağılımını anlamamıza olanak sağlar. Bu desende görülen pikler atomlar arası mesafeler ile ilgilidir. Cam ve p-Si yarıiletken taban malzeme üzerine kimyasal püskürtme yöntemiyle büyütülen CdS ince filminin XRD analizi Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Şekil 4.3’de ki X-ışını difraksiyonu deseni incelendiğinde (100), (002), (101), (102), (110), (103) ve (112) düzlemlerine ait piklerin oluşumu gözlenmiştir. Farklı düzlemlere ait piklerden yansıma görülmesi, filmin polikristal hegzagonal yapıda olduğunu göstermiştir (Ma *at al.* 2017; Hurma 2016). (2.53), (2.54) ve (2.55) denklemleri kullanılarak tanecik büyüklüğü (D) 25,7434 nm, dislokasyon yoğunluğu (δ) $15,08916 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-2}$ ve mikro strain (ϵ) 0,8408 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.3. Cam altlık üzerine büyütülmüş CdS ince filminin X- Işını difraksiyonu.



Şekil 4.4. p-Si yarıiletken altlık üzerine büyütülmüş CdS ince filminin X- Işını difraksiyonu

Şekil 4.4’de görülen (100), (101), (102), (103) düzlemleri de p-Si yarıiletken altlık üzerinde büyütülen CdS ince filminin X-ışını difraksiyonu verilerinden elde edilmiştir. Ayrıca p-Si yarıiletkeni (111) düzleminde diğer düzlemlere göre daha baskın bir yansıma vermiştir. Bu film içinde (2.53), (2.54) ve (2.55) denklemleri kullanılarak tanecik büyüklüğü (D) 27,4844 nm, dislokasyon yoğunluğu (δ) $13,2381 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-2}$ ve mikro strain (ϵ) 0,5096 olarak hesaplanmıştır.

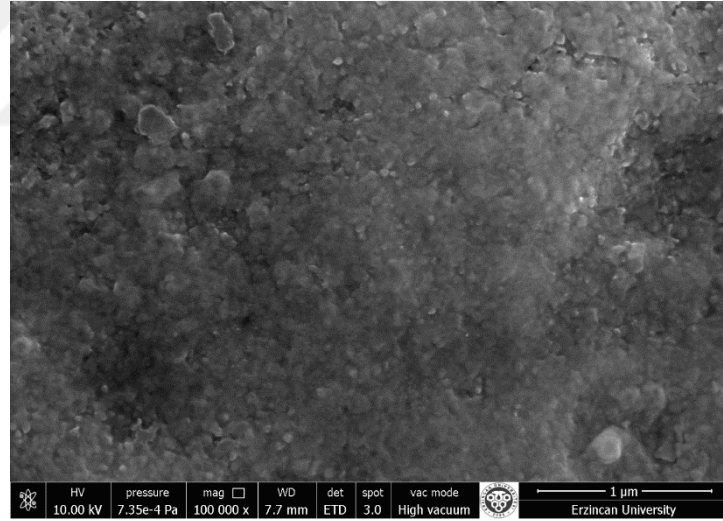
4.2.3. CdS İnce filminin yüzey görüntüsü

Elde edilen ince film malzemelerin fiziksel özellikleri, kristal yapılarına ve yüzeysel durumlarına bağlıdır. Makroskobik düzeyde incelemeler optik mikroskoplarla yapılır ve genel anlamda malzemenin yüzey görüntüsü hakkında bilgiler verir. Mikroskobik düzeyde incelemeler ise malzemelerin yapısal detaylarını (kristal yapıları ve kusurlarını vb.) ortaya koyan elektron mikroskopları ile yapılmaktadır. Taramalı elektron

mikroskobu bu konuda en yaygın kullanılan cihazlardan biridir (Savaskan 1999; Atay *et al.* 2003; Özkan 2007).

SEM, malzeme yüzeyinde küçük bir noktaya gönderilen elektron demeti yardımıyla, yüzeyden saçılan ikincil elektron sinyallerini algılayarak numunenin yapısı, homojenliği, kalitesi ve fabrikasyonları hakkında bilgi verir.

Kimyasal püskürtme yöntemiyle direkt p-Si yarıiletken altlık üzerine büyütülen CdS ince filminin SEM görüntüsü Şekil 4.5’de verilmiştir. Görüntüye bakıldığında filmin yüzey üzerinde homojen olarak büyüdüğü yüzeyi tamamen kapladığı ve bazı kısımlarda boşlukların bulunduğu görülmektedir. Görüntülerde bulunan aydınlık ve karanlık bölgelerin sebebi ise farklı bölgelerden gelen elektron sinyalleridir.

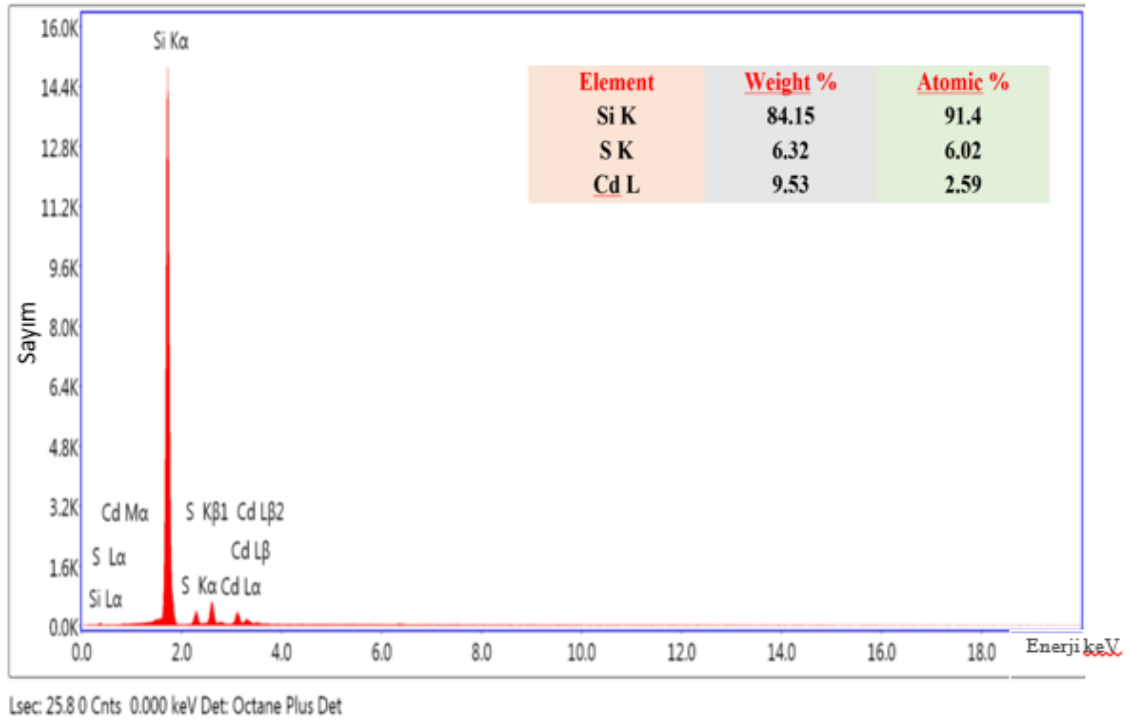


Şekil 4.5. p-Si üzerine kimyasal püskürtme yöntemi ile büyütülen CdS ince filminin SEM görüntüsü

4.2.4. CdS ince filminin X-ışınlarını kullanarak enerji dağılım analizi (EDAX)

Yarıiletken numunelerin iç yapıları hakkında bilgi veren, katkı atomlarının olup olmadığını belirlemek için yapılan Enerji Dağılımlı X-ışını Spektrometresi, malzemenin hangi elementlerden hangi oranlarda oluştuğunu yani materyallerin elemental bileşimini

belirlemek için yapılan bir analizdir. Şekil 4.6'de büyüttüğümüz CdS ince filmine ait EDAX analizi gösterilmiştir. Bu şekillerden de görüldüğü üzere, Cd ve S elementlerine ait piklerin varlığı CdS ince filmlerinin oluştuğunu göstermektedir. Ayrıca Si elementine ait piklerin görülmesinin nedeni ise büyütme işlemlerinde altlık olarak kullanılan p-Si yarıiletkenidir.



Şekil 4.6. Kimyasal püskürtme metodu ile yarıiletken altlık üzerine büyütülen CdS ince filminin EDAX analizi

4.3. Cd/CdS/p-Si/Al Yapının Akım-Voltaj Özelliklerinin Numune Sıcaklığına Bağlı Olarak İncelenmesi

Metal-yarıiletken kontakların I - V karakteristikleri diyot parametrelerinin belirlenmesi açısından çok önemlidir. Termoiyonik emisyon teorisine göre kontak üzerindeki akım ve gerilimin birbirlerine bağlılığı,

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (4.1)$$

eşitliği ile verilmektedir (Rhoderick and Williams 1988). Bu eşitlikte n ifadesi diyodun idealite faktörüdür ve birimsiz bir parametredir. İdeal bir diyot için n değeri 1 olarak verilir. Bir diyot için idealite faktörünün 1 değerinden uzaklaşması, bu diyodun ideallikten uzaklaşması demektir. (4.1) eşitliğinde $qV \gg nkT$ olması durumunda üstel terim ifadesi yanında 1 sayısı ihmal edilebilir. Böyle olması durumunda (4.1) eşitliği;

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) \right] \quad (4.2)$$

olarak yazılır. (4.2) eşitliğinin her iki tarafının tabii logaritması alınarak daha sonra elde edilen ifadenin V 'ye göre türevi alınırsa diyodun idealite faktörü için;

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.3)$$

bağıntısı elde edilir.

$\ln(I)$ - V grafiğinin, düz beslem bölgesine lineer bir fit çizilir ve bu doğrunun eğiminden $dV/d(\ln I)$ değeri elde edilir. Bu eğim ifadesi ile birlikte k (Boltzmann sabiti= $8,625 \times 10^{-5}$ eV/K), q (elektronun yükü= $1,6 \times 10^{-19}$ C) ve T (sıcaklık (K)) değerleri (4.3) eşitliğinde kullanılarak idealite faktörü değeri bulunabilir. $V=0$ değerinde fit olarak çizilen doğrunun akım eksenini kestiği noktadan I_0 doyma akımı elde edilir. (4.2) eşitliğindeki I_0 doyma akımı,

$$I_0 = AA^* T^2 \exp \left(-\frac{q\Phi_b}{kT} \right) \quad (4.4)$$

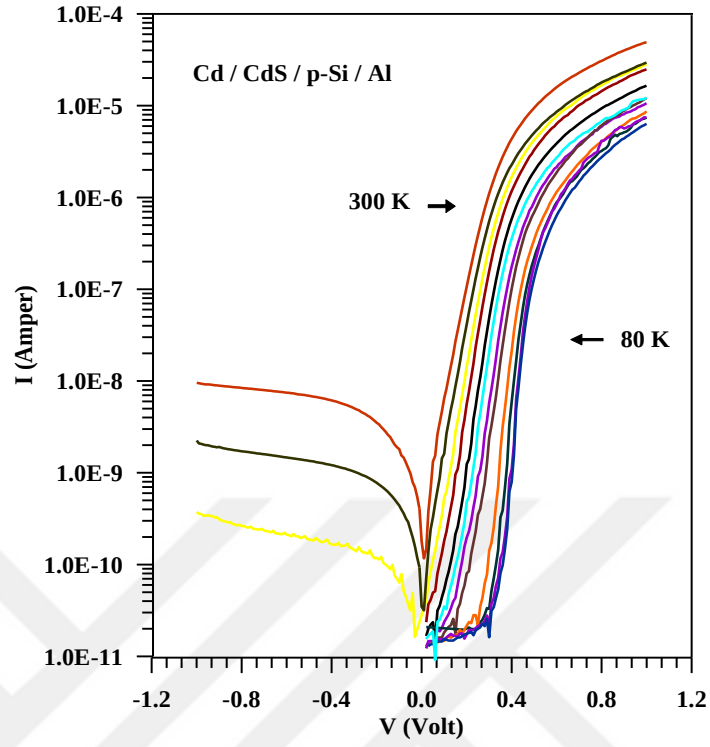
bağıntısı ile ifade edilir. (4.4) bağıntısında eşitliğin her iki tarafının tabii logaritması alınarak bu ifade Φ_b 'ye göre çözümlenirse,

$$q\Phi_b = kT \ln(AA^* T^2 / I_0) \quad (4.5)$$

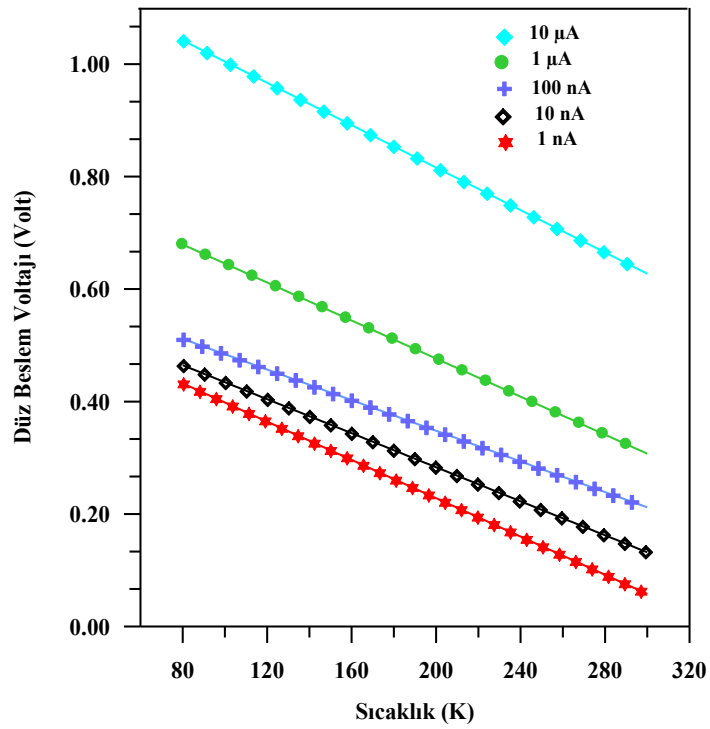
biçiminde Φ_b engel yüksekliği eşitliği elde edilir. Bu eşitlikte A^* , Richardson sabiti olup p-Si için $32 \text{ A/K}^2\text{cm}^2$ dir ve A , diyodun etkin alanı ($7.85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$) dir.

Şekil 4.7’de, üretilen Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapısının $\ln(I)$ - V grafiği sıcaklığın bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Yukarıda bahsedilen termoiyonik emisyon metoduyla ve (4.3)-(4.5) eşitlikleri yardımıyla, elde edilen grafiklerden I_0 , n ve Φ_b değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler Çizelge 4.1’de sıcaklığa bağlı olarak sunulmuştur. Azalan numune sıcaklığı ile idealite faktörü artarken, engel yüksekliği azalmıştır. Yani hem idealite faktörü hem de engel yüksekliğinin sıcaklığa kuvvetli bir şekilde bağlı olduğu görülmüştür. İdealite faktörü ile engel yüksekliğinin oda sıcaklığında termoiyonik emisyon metodundan hesaplanan değerleri sırasıyla 1.36 ve 0.820 eV’dur.

Şekil 4.8’de, üretilen Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapısının seçilen $10 \mu\text{A}$, $1\mu\text{A}$, 100 nA , 10 nA ve 1 nA akım değerlerinde artan sıcaklık değerlerine karşı düz beslem voltajı grafiği çizilerek, düz beslem voltajı üzerine sıcaklığın etkisi incelenmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere seçilen sabit akımlarda artan sıcaklıkla, düz beslem voltajı düşüşü arasında negatif lineer bir eğim bulunmaktadır. Sabit akım kullanıldığında eğim aynı zamanda akımın bir fonksiyonudur. Şekil 4.8’de ki grafikte gösterilen bu karakteristik, elektronik termometrelerin yapımında kullanılmaktadır. Unutulmamalıdır ki diyottan geçen akım azaldığında eğim daha dik hale gelir. Pratik sıcaklık ölçümleri için, uygulama akımı ile birlikte diyotun ısınmadığı düşünülmelidir.

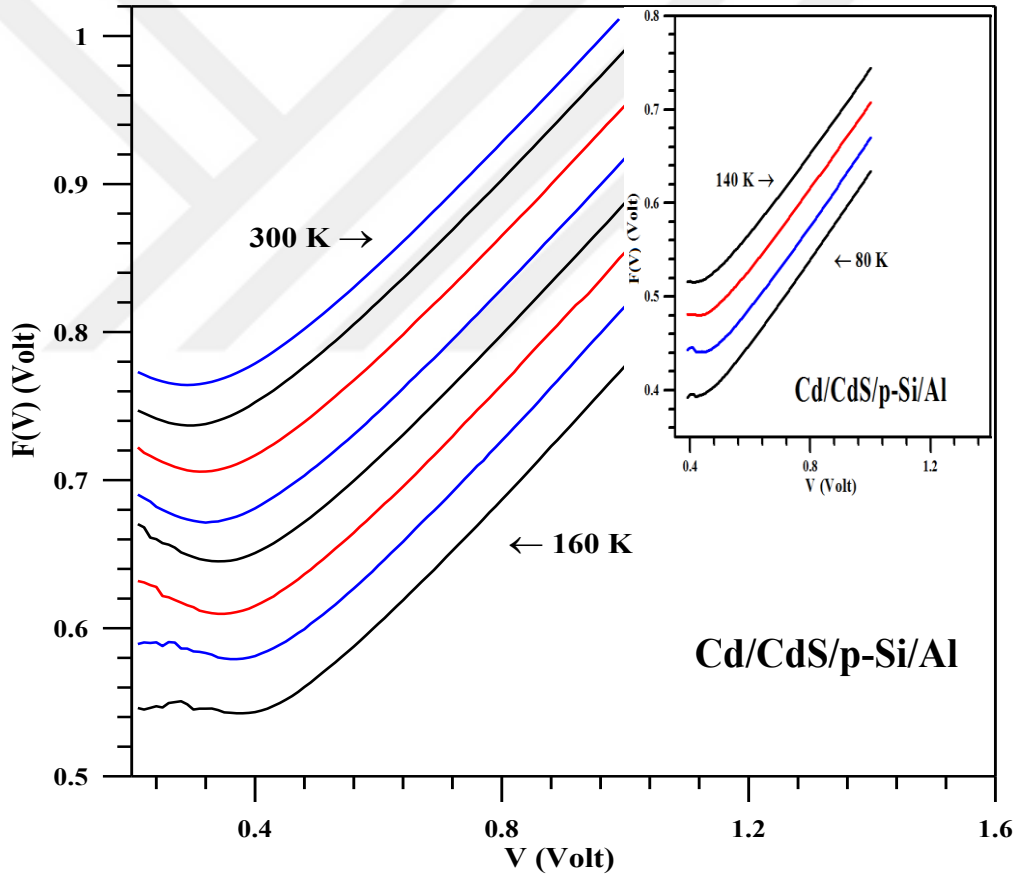


Şekil 4.7. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının sıcaklığa bağlı $\ln(I)$ -V grafikleri



Şekil 4.8. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının sıcaklığa karşı düz beslem voltajı değişimleri

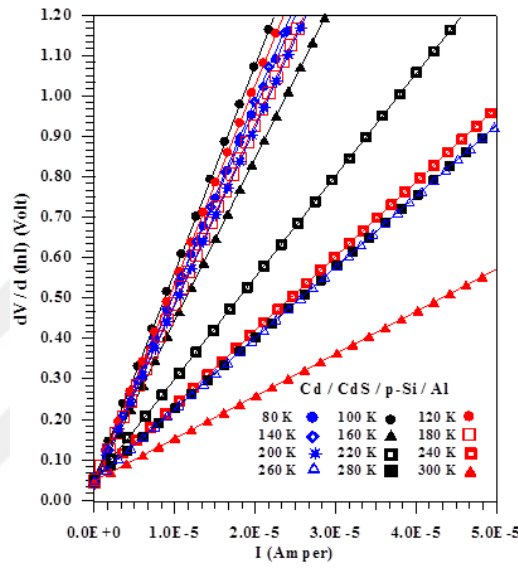
Üretilen Cd/CdS/p-Si/Al yapının seri direnci ve engel yüksekliği numune sıcaklığına bağlı olarak Norde metodundan hesaplanmıştır. Eşitlik (2.40) ile verilen modifiye edilmiş Norde fonksiyonu göz önüne alınarak $F(V)$ - V grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklerin minimum noktalarına karşılık gelen akım ve gerilim değerlerinden yararlanarak ve (2.43) – (2.44) eşitlikleri kullanılarak Φ_b ve R_s değerleri sıcaklığa bağlı olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir. Doğru beslem I - V karakteristikleri kullanılarak elde edilen $F(V)$ - V grafikleri Şekil 4.9’da görülmektedir.



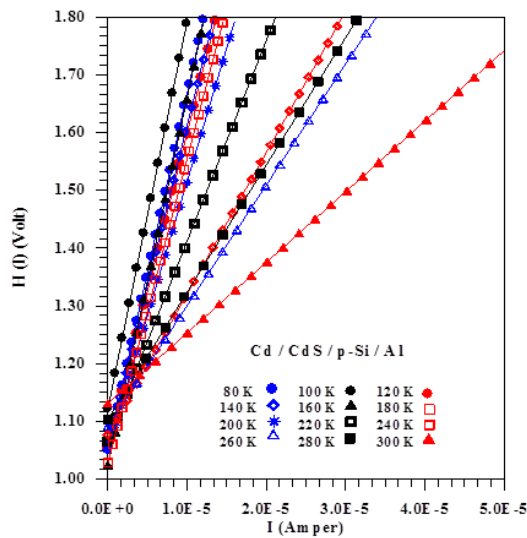
Şekil 4.9. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının numune sıcaklığına bağlı $F(V)$ - V grafikleri

Doğru beslem I - V karakteristiklerinden yararlanarak diyodun karakteristik parametrelerini hesaplamamanın bir yolu da Cheung tarafından geliştirilen fonksiyonları kullanmaktır. Bu fonksiyonlar (2.49) ve (2.51) eşitlikleri ile verilmiştir. (2.49) eşitliği

dikkate alınarak çizilen $dV/d(\ln I)$ - I grafiği Şekil 4.10'da, (2.51) eşitliği dikkate alınarak çizilen $H(I)$ - I grafiği de Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Her iki grafikte verilen doğruların eğimlerinden seri direnç değerleri, $dV/d(\ln I)$ - I grafiğinin düşey eksenini kestiği noktalardan idealite faktörleri ve $H(I)$ - I grafiğinin düşey eksenini kestiği noktalardan da engel yükseklikleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

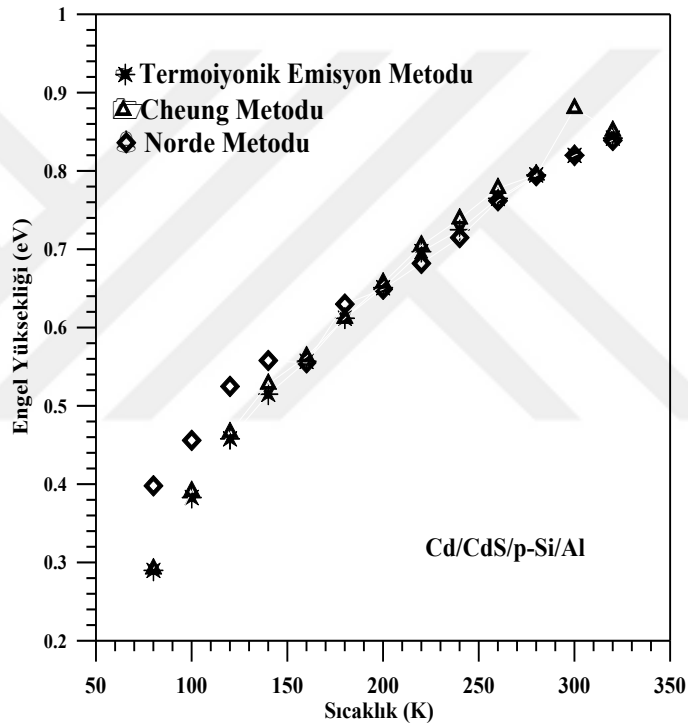


Şekil 4.10. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının numune sıcaklığına bağlı $dV/d(\ln I)$ - I grafikleri

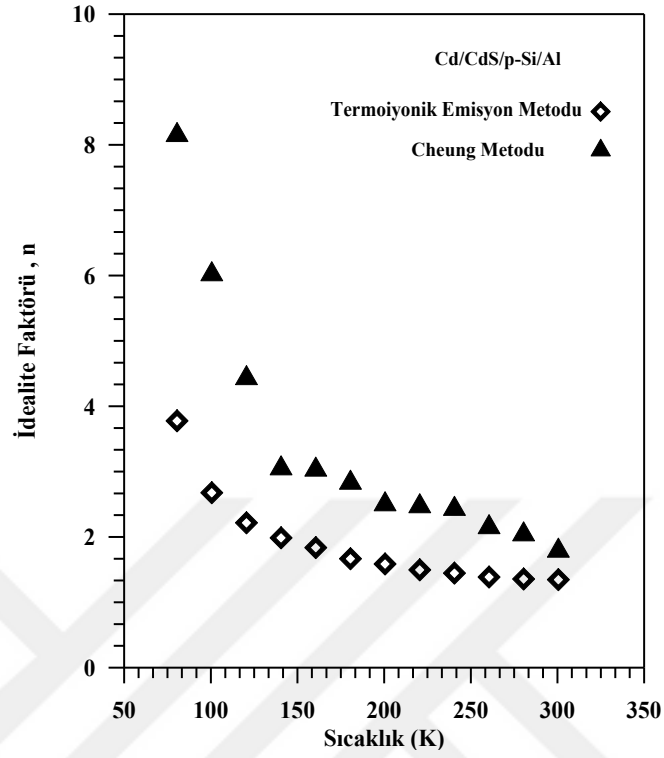


Şekil 4.11. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının numune sıcaklığına bağlı $H(I)$ - I grafikleri

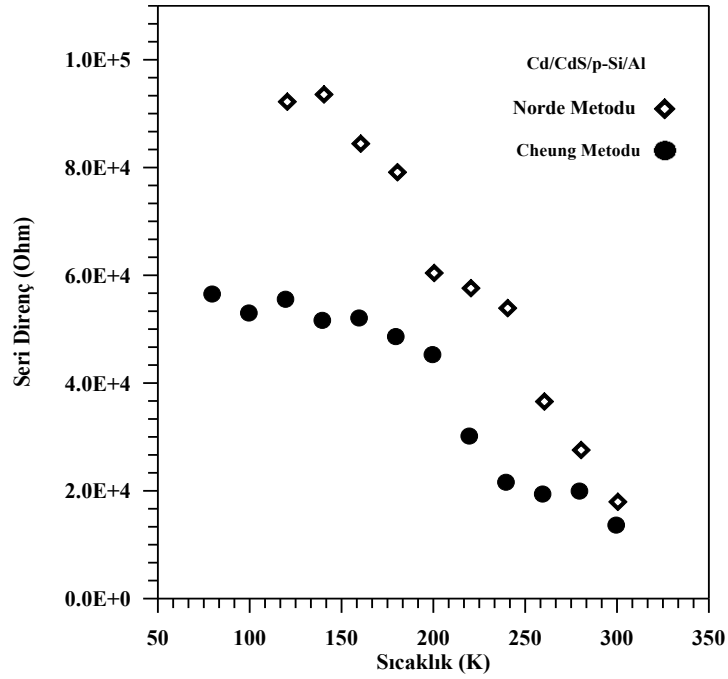
Diyodun doğru beslem I - V karakteristiklerinden yararlanarak Termoionik emisyon, Cheung ve Norde metodlarından hesaplanan engel yüksekliklerinin numune sıcaklığına bağlı değişimleri Şekil 4.12’de, idealite faktörünün numune sıcaklığına bağlı değişimleri Şekil 4.13’de ve seri direnç değerlerinin numune sıcaklığına bağlı değişimleri de Şekil 4.14’de verilmiştir. (4.12), (4.13) ve (4.14) şekilleri dikkatle incelendiğinde, üç farklı metodla hesaplanan n , Φ_b ve R_s parametrelerinin numune sıcaklığına bağlı olarak aynı tarzda değişim gösterdikleri gözlenmiştir.



Şekil 4.12. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının termoionik emisyon, Cheung ve Norde metodları yardımıyla hesaplanan engel yüksekliği değerlerinin numune sıcaklığı ile değişimleri



Şekil 4.13. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının termioyonik emisyon ve Cheung metodları yardımıyla hesaplanan idealite faktörü değerlerinin numune sıcaklığı ile değişimleri



Şekil 4.14. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının Norde ve Cheung metodları yardımıyla hesaplanan seri direnç değerlerinin sıcaklıkla değişimleri

4.4. Arayüzey Hal Yoğunluğunun Hesaplanması

Arayüzey hal yoğunluğu, diyot karakteristiği üzerinde rol oynayan önemli bir parametredir (Tseng and Wu,1987, Cova and Singh,1990, Gomila and Rubi,1997). Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının arayüzey hal yoğunluğu, numune sıcaklığına bağlı olarak alınan I - V karakteristiklerinden hesaplanmıştır. Bir yarıiletkenle arayüzey hal enerjisi E_{ss} , valans bandı tavanına göre;

$$E_{ss} - E_v = q\Phi_b - qV \quad (4.6)$$

bağıntısı ile verilmektedir (Türüt and Sağlam 1992).

Arayüzey hallerinin yarıiletkenle dengede olduğu durum için idealite faktörü

$$n = 1 + \frac{\delta}{\varepsilon_i} \left(\frac{\varepsilon_s}{W} + qN_{ss} \right) \quad (4.7)$$

bağıntısı ile verilmiştir. Bu ifade arayüzey hal yoğunluğu N_{ss} 'ye göre düzenlenirse

$$N_{ss} = \frac{1}{q} \left[(n - 1) \frac{\varepsilon_i}{\delta} - \frac{\varepsilon_s}{W} \right] \quad (4.8)$$

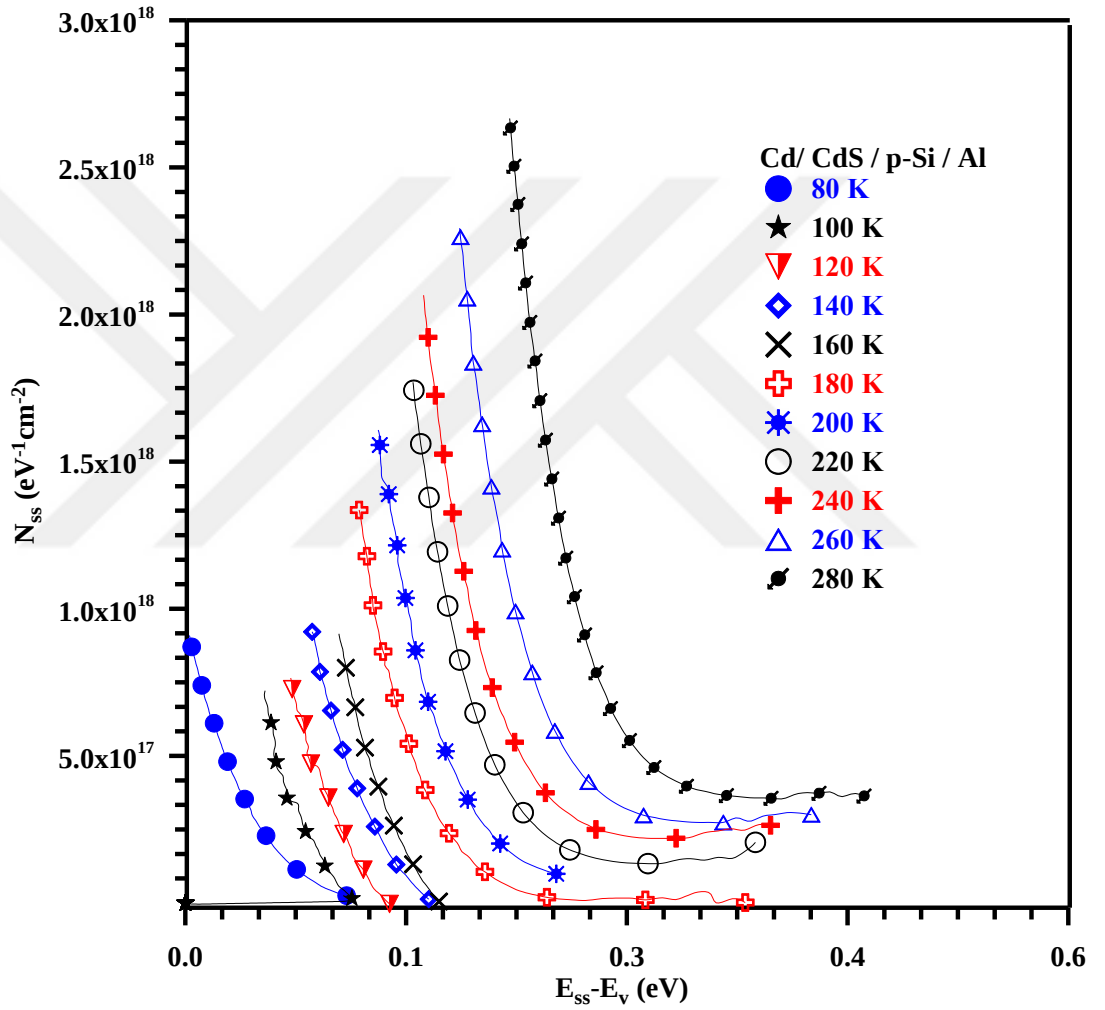
bağıntısı elde edilir. Burada W , tükenim tabakasının genişliğidir ve

$$W = \left[\left(2 \frac{\varepsilon_s}{qN_d} \right) V_d \right]^{1/2} \quad (4.9)$$

bağıntısı ile verilmektedir. δ , arayüzey tabakasının kalınlığıdır.

Yukarıda ifade edilen bağıntılar kullanılarak hesaplanan arayüzey hal yoğunluğunun, arayüzey hal enerjisine karşı değişimi Şekil 4.15'de gösterilmiştir. Grafiğe bakıldığında

arayüzey hal yoğunluğunun arayüzey hal enerjisiyle hemen hemen eksponansiyel değiştiği ve artan numune sıcaklığına bağlı olarak arayüzey hal yoğunluğunun bant ortasına doğru kaydığı görülmektedir. Bu da literatür ile uyumlu bir sonuçtur (Türüt *et al.* 1992).



Şekil 4.15. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının arayüzey hal yoğunluğunun arayüzey hal enerjisine karşı değişimleri

Çizelge 4.1. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının numune sıcaklığına bağlı olarak termoiyonik emisyon, Norde ve Cheung metodları yardımıyla hesaplanan parametreleri

Sıcaklık (K)	I-V			dV/d(lnI)-I		H(I)-I		F(V)-V		
	n	Φ_b (eV)	I_0 (A)	n	R_s (Ω)	Φ_b (eV)	R_s (Ω)	R_s Ort. (Ω)	R_s (Ω)	Φ_b (eV)
80	3.79	0.290	8.8×10^{-16}	8.21	45678	0.296	67012	56345	173348	0.399
100	2.69	0.383	1.24×10^{-16}	6.08	51156	0.391	54528	52842	144707	0.457
120	2.23	0.458	2.09×10^{-16}	4.49	48972	0.471	61804	55388	92349	0.532
140	2.00	0.515	1.37×10^{-15}	3.11	47546	0.529	55410	51478	93677	0.588
160	1.85	0.557	1.78×10^{-14}	3.09	40129	0.553	63709	51919	84551	0.555
180	1.68	0.612	5.87×10^{-14}	2.89	44266	0.612	52632	48449	79261	0.630
200	1.60	0.651	4.00×10^{-13}	2.56	43863	0.657	46342	45102	60545	0.649
220	1.51	0.697	1.34×10^{-12}	2.53	25258	0.705	34755	30007	57746	0.682
240	1.46	0.725	8.56×10^{-12}	2.49	18386	0.737	24469	21427	54034	0.715
260	1.40	0.765	2.50×10^{-11}	2.21	17545	0.779	20919	19232	36705	0.762
280	1.37	0.795	9.70×10^{-11}	2.10	17519	0.805	22061	19790	27700	0.794
300	1.36	0.820	3.76×10^{-10}	1.85	10461	0.880	16475	13468	18100	0.820

4.5. Cd/CdS/p-Si/Al Yapının Oda Sıcaklığında Yapılan C-V Ölçümlerinden Diyot Parametrelerinin Hesaplanması

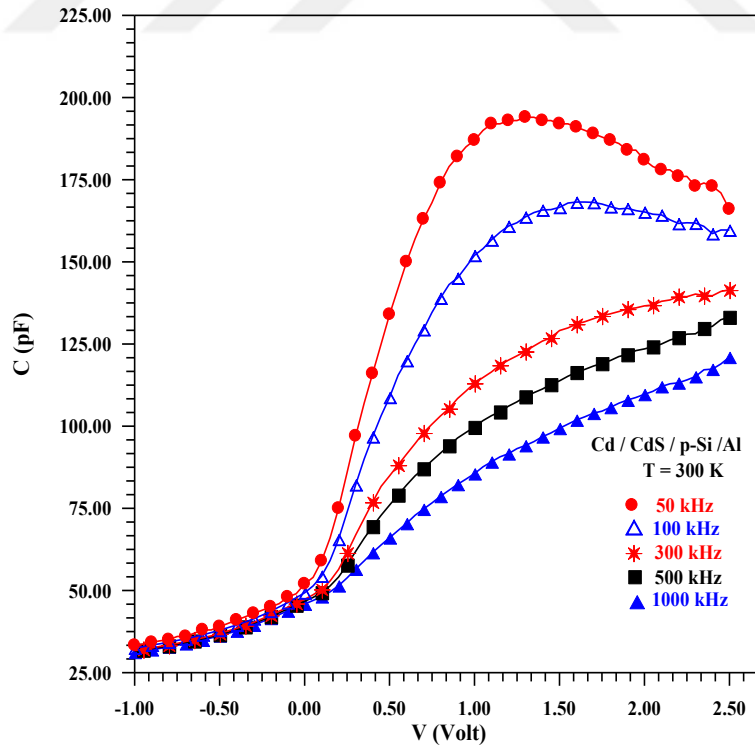
Metal-yarıiletken doğrultucu kontaklarda uzay yükü bölgesinin kapasitesi, metal-yarıiletken arayüzeyinin meydana gelmesi ile ilgili önemli bilgiler vermektedir. Kapasitenin ters beslem durumunda gerilime bağlı değişimi kullanılarak, yarıiletkendeki taşıyıcı konsantrasyonu, engel yüksekliği, Fermi enerji seviyesi ve difüzyon potansiyeli gibi parametreler elde edilebilir (Wilmsen 1985).

Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapısının C-V ölçümleri oda sıcaklığında 50 kHz, 100 kHz, 300 kHz, 500 kHz ve 1 MHz frekans değerlerinde, -1 V ve +1 V aralığında yapılmıştır. Metal-yarıiletken doğrultucu kantağın kapasitesi,

$$C = \left[\frac{\epsilon_s \epsilon_0 N_a A^2}{2(V_d + V)} \right]^{1/2} \quad (4.10)$$

eşitliği ile verilmektedir (Rhoderick and Williams, 1988). Bu eşitlikte ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti (p-Si için $\epsilon_s=11.7$), q elektronun yükü, ϵ_0 boş uzayın dielektrik sabiti ($\epsilon_0=8,85 \times 10^{-14}$ F/m), k Boltzmann sabiti, V_d difüzyon potansiyeli, N_a iyonize olmuş akseptör konsantrasyonu ve T ise Kelvin cinsinden sıcaklıktır.

Şekil 4.15’de Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının oda sıcaklığında 50 kHz, 100 kHz, 300 kHz, 500 kHz ve 1 MHz frekans değerlerinde alınan düz ve ters beslem C-V değişimleri gösterilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde düşük frekanslardan yüksek frekanslara doğru gidildikçe kapasitenin azaldığı görülmektedir ve uygulanan gerilim değeri sıfır değerine yaklaştıkça düz beslemdeki kapasite değeri de gittikçe azalmaktadır.

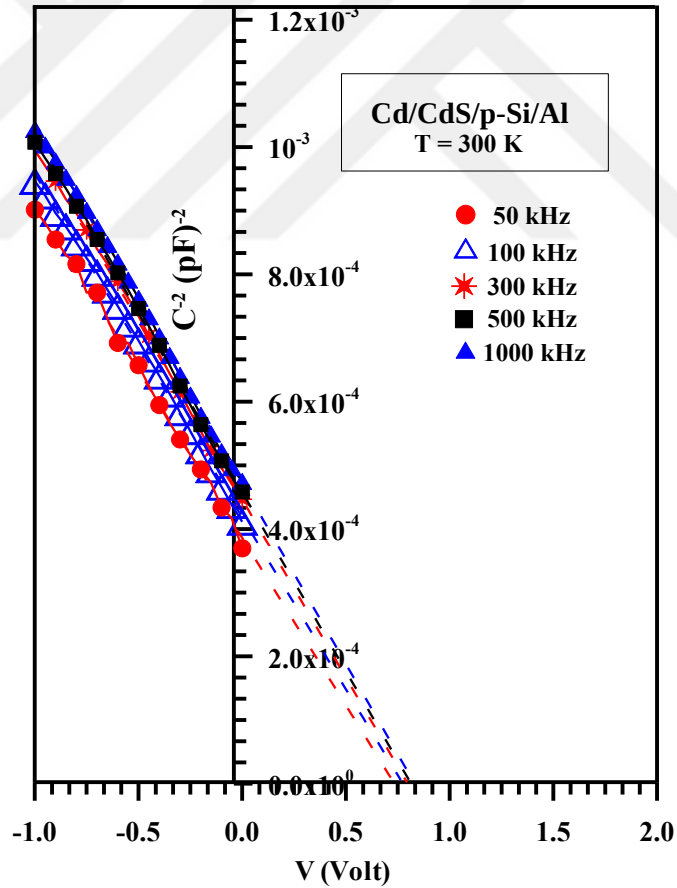


Şekil 4.16. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının oda sıcaklığında ve 50 kHz, 100 kHz, 300 kHz, 500 kHz ve 1 MHz frekans değerlerinde alınan doğru ve ters beslem C-V değişimleri

(4.10) bağıntısında eşitliğin her iki tarafının karesi alınarak C^{-2} 'ye göre düzenlenirse,

$$C^{-2} = \frac{2(V_d+V)}{\epsilon_s \epsilon_0 N_a q A^2} \quad (4.11)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade de V uygulanan gerilim değeridir. (4.11) eşitliğine göre C^{-2} 'nin V ye göre değişimi lineerdir ve bu doğrunun yatay eksenini kestiği nokta V_d difüzyon potansiyelini verir. Şekil 4.17'de Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının ters beslem C - V grafikleri kullanılarak hesaplanan $1/C^2$ 'nin V ye bağlı değişim grafikleri görülmektedir.



Şekil 4.17. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının oda sıcaklığında ters beslem durumunda ve 50 kHz, 100 kHz, 300 kHz, 500 kHz ve 1 MHz frekans değerlerinde $1/C^2$ nin V 'ye göre değişimleri

(4.11) eşitliğinin V 'ye göre türevi alınırsa,

$$\frac{d(C^{-2})}{dV} = \frac{2}{\varepsilon_s \varepsilon_0 N_a q A^2} \quad (4.12)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntıdan N_a çekilirse,

$$N_a = \frac{2}{\varepsilon_s \varepsilon_0 q A^2 \frac{d(C^{-2})}{dV}} \quad (4.13)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntı dikkate alınarak C^{-2} 'nin V 'ye göre çizilen grafiğinin eğiminden taşıyıcı yoğunluğu hesaplanabilir.

Isıl dengede bir p-tipi yarıiletkenin valans bandındaki hol yoğunluğu için,

$$p_0 = N_v \exp\left(\frac{E_F - E_v}{kT}\right) \quad (4.14)$$

eşitliği yazılabilir (Neamen, 1992). Buradan N_v valans bandındaki etkin durumların yoğunluğudur ($T=300$ K'de Si için $N_v=1.04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$). p-tipi bir yarıiletken için $N_a \gg p_i$ olacağı için $p_0 \cong N_a$ alınabilir. Burada p_i , asal hol yoğunluğudur. Bu durum göz önüne alındığında, eşitlik (4.14),

$$N_a = N_v \exp\left(\frac{E_F - E_v}{kT}\right) \quad (4.15)$$

şeklinde yazılabilir. Elde edilen ifade E_F 'ye göre düzenlenirse,

$$E_F = kT \ln\left(\frac{N_a}{N_v}\right) \quad (4.16)$$

bağıntısı elde edilir. Dolayısıyla $1/C^2$ - V grafiğinin eğiminden akseptör yoğunluğu N_a ve bu değer kullanılarak (4.16) eşitliğinden de Fermi enerji seviyesi E_F hesaplanabilir. Metal-yarıiletken kontaklar için engel yüksekliği,

$$\Phi_b = E_F + V_d \quad (4.17)$$

eşitliği ile verilir (Neamen 1992). Böylece $1/C^2$ - V grafiği yardımıyla hesaplanan E_F ve V_d değerleri (4.17) eşitliğinde yerine konulursa diyodun engel yüksekliği hesaplanabilir.

Şekil 4.17’de verilen ters beslem C^2 - V grafiklerinin yatay ekseni kestiği noktalardan V_d difüzyon potansiyelleri ve bu grafiklerin eğimlerinden de N_a akseptör atomlarının konsantrasyonu hesaplanmıştır. Elde edilen N_a değerleri eşitlik (4.16)’da kullanılarak E_F Fermi enerji seviyeleri bulunmuştur. Daha sonra deneysel olarak elde edilen V_d ve E_F değerleri eşitlik (4.17)’de yerlerine yazılarak Cd/CdS/p-Si/Al yapının engel yüksekliği değerleri elde edilmiştir. Hesaplanan tüm deneysel değerler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapının oda sıcaklığında ve farklı frekanslarda ters beslem C^2 – V grafiklerinden elde edilen parametreleri

Frekans (kHz)	V_d (eV)	$N_a \times 10^{14} (cm^{-3})$	E_F (eV)	Φ_b (eV)
50	0.734	3.688	0.265	0.999
100	0.774	3.592	0.266	1.040
300	0.798	3.468	0.267	1.065
500	0.814	3.451	0.267	1.081
1000	0.832	3.419	0.267	1.099

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışmasında $\langle 111 \rangle$ yönelimine sahip p-Si kristali kullanılmıştır. Altlık olarak kullanılan bu yarıiletken malzemenin mat tarafına vakum ortamında termal buharlaştırma yöntemiyle Al metali buharlaştırılmış, 580°C 'de N_2 gazı ortamında 3 dakika tavlansak omik kontak elde edilmiştir. Yarıiletkenin parlak yüzeyine ise kimyasal püskürtme yöntemiyle CdS ince filmi büyütülmüştür. Daha sonra ince film üzerine, 1 mm çapındaki dairesel deliklere sahip maske kullanılarak kaplama ünitesinde Cd metali buharlaştırılarak Cd/CdS/p-Si/Al yapı elde edilmiştir. Elde edilen bu yapının sıcaklığa bağlı I - V karakteristikleri ve oda sıcaklığında da C - V karakteristikleri incelenerek çeşitli karakteristik parametreleri hesaplanmıştır.

Kimyasal püskürtme yöntemiyle ince film üretimi konusunda literatürde yapılan çalışmalar incelenerek ve uygun çözelti molariteleri, taban ile püskürtme başlığı arasındaki uzaklık, püskürtme hızı, püskürtme süresi, taban malzeme sıcaklığı vb. gibi önemli parametreler deneme-yanılma yoluyla elde edilmiştir. Kimyasal püskürtme tekniği, üretiminde kompleks cihazlar gerektirmeyen, diğer ince film üretme tekniklerine göre kısa süre içerisinde geniş yüzeyli filmler elde edilmesine olanak sağlayan basit, maliyeti az ve vakumsuz bir tekniktir (Baykul and Balcioglu 2000; Lee *et al.* 2001; Ramachandran *et al.* 2005; Chow and Oladeji 2005).

Film büyütme işleminde film homojenliği ve yüzey pürüzlülüğünün az olması için taban sıcaklığı önemli bir parametredir. Taban sıcaklığı, filmlerin yüzeye tutunmalarını ve kalınlıklarını etkiler. Düşük taban sıcaklığında kalın ve amorf yapıda filmler elde edilmiştir. Yüksek taban sıcaklığında ise büyüme çok hızlı olduğundan altlık üzerinde kristal şeklinde değil de tortu şeklinde birikimler gözlenmiştir. Üretilen filmlerin özellikleri üretim sıcaklığı değiştirilerek kontrol edilebilir (Perednis and Gauckler 2005). Bu çalışmada büyütme işlemi için uygun sıcaklık 400°C olarak belirlenmiştir.

Bu yöntemle büyütme yapılırken püskürtme başlığı ile altlık arasındaki mesafe kaliteli film üretiminde önemli rol oynamaktadır. Şayet bu mesafe çok yakın olursa, çözelti taban malzeme üzerinde homojen olarak yayılamaz üst üste birikimler veya taban üzerine zayıf tutunmalar görülür. Bu da film kalitesini bozar. Çok uzak olursa bu defa da çözelti taban malzeme üzerine gönderilen yoğunlukta ulaşamaz. Aradaki mesafenin çok olmasından dolayı çözeltinin bir kısmı taban malzeme yüzeyine ulaşmadan buharlaşır (Perednis and Gauckler 2005). Bizim çalışmamızda uygun film üretimi için aradaki mesafe çeşitli denemeler sonucunda 40 cm olarak belirlenmiştir.

Püskürtme süresi fazla olduğunda da istenilen özelliklerde kaliteli ince film eldesi zor olacaktır. Süre uzun olunca filmler istenilen incelikte üretilemez, filmlerin kalınlıklarının artması kristalleşmesini olumsuz olarak etkiler. Bu çalışmada uygun püskürtme süresi yapılan denemeler sonucunda 20 dakika olarak seçilmiştir.

Kimyasal püskürtme yöntemiyle direkt cam ve p-Si altlıklar üzerine büyütülen CdS ince filmlerinin soğurma, XRD ve SEM ölçüleri alınmıştır. Cam altlık üzerine büyütülen CdS ince filminin soğurma ölçümlerinden filmin yasak enerji aralığı 2.29 eV olarak bulunmuştur ve bu değer literatür ile uyumludur (Shabana *et al.* 2016). p-Si yarıiletken altlık üzerine büyütülen CdS filmin SEM görüntüleri alınmıştır. Bu görüntüler incelendiğinde, filmin bütün yarıiletken yüzeyini kapladığı ve hemen hemen homojen olduğu belirlenmiştir. Arayüzey tabakası olarak kullanılan filmlerde, arayüzeyin kalitesi açısından, filmin homojen olması son derece önemlidir. SEM görüntüleri büyütülen filmin diyot yapımında uygun olduğunu göstermiştir.

Kimyasal püskürtme yöntemi ile p-Si yarıiletken ve cam taban malzeme üzerinde elde edilen CdS ince filmlerin X-Işını difraksiyonu desenleri Şekil 4.3 ve 4.4’de verilmiş ve Şekil 4.3’de (100), (002), (101), (102), (110), (103) ve (112) düzlemlerinden yansıma elde edilmiştir. Bu sonuçlardan yola çıkılarak elde edilen CdS ince filminin polikristal hegzagonal yapıda olduğu tespit edilmiştir. Cam altlık üzerine büyütülen CdS filmi için Scherrer formülü kullanılarak (2.53), (2.54) ve (2.55) denklemlerinden tanecik büyüklüğü (D) 25,7434 nm, dislokasyon yoğunluğu (δ) $15,08916 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-2}$ ve

microstrain (ϵ) 0,8408 olarak hesaplanmıştır. p-Si altlık üzerine büyütülen CdS filmi için tanecik büyüklüğü (D) 27,4844 nm, dislokasyon yoğunluğu (δ) $13,2381 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-2}$ ve mikrostrain (ϵ) 0,5096 olarak hesaplanmıştır.

Büyütülen CdS filmin EDAX spektrumları kullanılarak elemental analizleri yapılmıştır. Bu analiz sonucunda Cd ve S elementlerine ait ağırlık ve atomik yüzdeleri belirlenmiştir.

p-Si yarıiletkeni üzerinde CdS ince filmi üretildikten sonra, ayrıntılı bir şekilde bölüm 3.4 de anlatılan işlem süreçleri sırasıyla takip edilerek film üzerine Cd metali buharlaştırılmış ve Cd/CdS/p-Si/Al sandviç yapısı elde edilmiştir. Elde edilen bu yapının 80-300 K sıcaklık değerleri arasında 20 K adımlarla I-V karakteristikleri alınmıştır. Bu ölçümler kullanılarak üretilen sandviç yapının idealite faktörü, doyma akımı ve engel yüksekliği gibi karakteristik parametreleri hesaplanmıştır. Numune sıcaklığına bağlı olarak hesaplanan bu parametrelerin değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Numune sıcaklığına bağlı olarak alınan I-V karakteristiklerinden, diyodun doğru beslem voltajının sıcaklığa bağlı değişimleri, bazı doğru beslem akımları için incelenmiştir. Seçilen sabit akım değerlerinde artan sıcaklıkla doğru beslem voltajının azaldığı görülmüştür. Yani yüksek sıcaklıklarda aynı akım değerlerine daha düşük doğru beslem voltajları ile oluşabileceği tespit edilmiştir.

Bir diyot için idealite faktörüne bakılarak o diyodun ideallığe ne kadar yaklaştığı konusunda bilgi sahibi olunabilir. İdeal bir diyotta akım termoiyonik emisyon teorisine uygun olarak gerçekleşir (Norde 1979). Cd/CdS/p-Si/Al yapının oda sıcaklığında alınan I-V ölçümlerinden idealite faktörü 1.36, engel yüksekliği 0.820 eV ve doyma akımı 3.76×10^{-10} A olarak bulunmuştur. Ayrıca bu yapının karakteristik parametrelerinin hesaplanmasında Norde ve Cheung metodlarından da yararlanılmıştır. Norde metodunda 2.43-2.44 eşitlikleri kullanılarak oda sıcaklığında seri direnç 18100 Ω ve engel yüksekliği 0.820 eV olarak hesaplanmıştır. Cheung metodunda 2.49-2.51

eşitlikleri dikkate alınarak idealite faktörü 1.85, seri direnç 13468Ω ve engel yüksekliği 0.880 eV olarak bulunmuştur. Elde edilen değerler incelendiğinde bu üç metodun birbiriyle uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Aynı işlemler 80-300 K sıcaklık değerleri arasında 20 K adımlarla tekrarlanarak her bir yöntem kullanılarak hesaplanan değerler Çizelge 4.1’de sunulmuştur. Tabloda ki değerler incelendiğinde artan numune sıcaklığı ile idealite faktörünün azaldığı, engel yüksekliğinin arttığı ve sızıntı akımının arttığı söylenebilir.

Şekil 4.12 ve 4.13’den de görüldüğü gibi, artan numune sıcaklığı ile engel yüksekliği artarken idealite faktörü azalmaktadır. Artan numune sıcaklığı ile idealite faktörünün azalması engel yüksekliği değerinin artması, engelin inhomojenliği modeline atfedilmiştir (Aydın *et al.* 2010). Bu modelde, metal-yarıiletken doğrultucu eklemde farklı büyüklüklerde potansiyel engellerinin varlığı kabul edilmektedir. Dolayısıyla artan numune sıcaklığı ile taşıyıcıların kinetik enerjisi arttığından, taşıyıcıların daha büyük potansiyel engellerini geçtikleri ve daha düşük sıcaklıklarda taşıyıcıların kinetik enerjileri azaldığından taşıyıcıların daha düşük potansiyel engellerini geçtikleri düşünülmektedir. Bunun sonucunda da engel yüksekliği sıcaklığa bağlı olarak değişim göstermektedir. İdealite faktörü değerinin birden büyük olması ($n=1.36$) ise metal-yarıiletken doğrultucu eklemde arayüzey hallerinin ve arayüzey tabakasının bulunmasına atfedilmiştir. Yani termoiyonik emisyon teorisinden sapma sözkonusudur. Çünkü yukarıda da ifade edildiği gibi, saf termoiyonik emisyon teorisi geçerli olduğunda idealite faktörü değeri bir olmaktadır. Yine Şekil 4.14’de artan numune sıcaklığına bağlı olarak diyot seri direncinin azaldığı görülmektedir. Bu durum düşük sıcaklık değerlerinde serbest yük taşıyıcılarının azalmasına atfedilebilir.

Cd/CdS/p-Si/Al yapının numune sıcaklığına bağlı olarak alınan I - V karakteristiklerinin doğru beslem kısmından arayüzey hal yoğunluğu arayüzey hal enerjisine bağlı olarak hesaplanmıştır. Çizilen $N_{ss} - (E_{ss} - E_v)$ grafiklerinden, arayüzey hal yoğunluğunun enerjiyle eksponansiyel olarak değiştiği ve artan numune sıcaklığı ile birlikte arayüzey hal yoğunluğunun bant ortasına doğru kaydığı ve sonuçların literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Cd/CdS/p-Si/Al yapının C - V karakteristikleri oda sıcaklığında 50 kHz, 100 kHz, 300 kHz, 500 kHz ve 1 MHz frekans değerlerinde, -1 V ve +1 V aralığında incelenmiştir. Bu numune için C - V ve C^{-2} - V grafikleri Şekil 4.16-4.17'de ki gibi çizilmiştir. Frekansa bağlı C - V grafiği incelendiğinde yüksek frekanslara doğru kapasitenin azaldığı görülmektedir. Ters beslem C - V karakteristikleri kullanılarak Schottky diyodun difüzyon potansiyeli, iyonize olmuş akseptör konsantrasyonu (p-tipi yarıiletken için), Fermi enerji seviyesi ve engel yüksekliği parametreleri hesaplanmıştır. İncelenen 5 frekans değeri için hesaplanan parametreler Çizelge 4.2'de sunulmuştur. Bu tabloda hesaplanan engel yüksekliği değeri Çizelge 4.1'de ki engel yüksekliği değeri ile karşılaştırıldığında aradaki farka açıklama olarak varolan arayüzey tabakası, yarıiletkende bulunan tuzak seviyeleri veya engelin homojen olmaması (inhomojenliğine) gibi sebepler sıralanabilir (Rhoderick *et al.* 1988; Özdemir *et al.* 2003). Homojen olmayan bir arayüzey, bant bükülmesindeki ve engel yüksekliğindeki değişimler akım ve kapasite için, farklı Schottky engel yüksekliğinin var olduğu sonucunu ortaya çıkarmaktadır (Brillson 1982; Sullivan 1991). Homojen olmayan engel modelinde, C - V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği, ortalama engel yüksekliğidir ve bundan dolayı da I - V 'den ölçülen değerden genellikle daha büyüktür.

KAYNAKLAR

- Afify, H.H., Nasser, S.A. and Demian, S.E., 1991. Influence of substrate temperature on the structural, optical and electrical properties of ZnO thin films prepared by spray pyrolysis, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2, 152-156.
- Al-Salman, H.S, Abdullah, M.J. 2013. Structural, optical, and electrical properties of Schottky diodes based on undoped and cobalt-doped ZnO nanorods prepared by RF-magnetron sputtering. *Materials Science and Engineering B* 178, 1048–1056.
- Aydın, M. E., Yakuphanoglu F., Öztürk G. 2010. Modification of electrical properties of the Au/1,1 dimethylferrocenecarboxylate/n-Si Schottky diode, *Synthetic Metals*, 160, 2186–2190.
- Aydoğan, Ş., 2011. Katıhal Fiziği. Nobel Yayın Dağıtım, 616 s, Ankara.
- Aydoğan, Ş., Sağlam, M. 2012. Conductance and series resistance measurements of polyaniline/p-Si and polypyrrole/InP junction devices. *Physica E* 46, 38–42.
- Barikan, G., 2012. Yüksek Lisans Tezi. Kafkas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kars.
- Barret, C. and Vapelle, A. 1976. *Solid-State Electronics*, 19, 73.
- Baykul, M.C. and Balcioglu, A., 2000, AFM and SEM studies of CdS thin films produced by an ultrasonic spray pyrolysis method, *Microelektronik Engineering*, 51-52, pp, 703-713.
- Bedir, M., Öztaş, M., Kara, H., 2013. Effect of the substrate temperature on the structural, optical and electrical properties of spray-deposited CdS:B films, *J Mater Sci: Mater Electron* 24, 499–506.
- Bohlin, K.E. 1986. “Generalized Norde Plot Including Determination of the Ideality Factor”, *J. Appl. Phys.* 60: 1223.
- Brillson, L., Brucker, C., Katnani, A., Stoffel, N., Daniels, R., Margaritondo, G. 1982. *Physics and Chemistry of Semiconductor Interfaces Conference*, Asilomar, Calif.
- Chattopadhyay, P., Karim, B., and Roy S.G 2013. *Journal of Applied Physics* 114, 243506 (2013); doi: 10.1063/1.4853015.
- Cheung S. K., Cheung, N. W. 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics, *Appl. Phys. Lett.*, 58, 382.
- Chow, L. and Oladeji Isiah O., 2005. Synthesis and processing of CdS/ZnS multilayer films for solar cell application, *Thin Solid Films*, 474, pp: 77-83.
- Cova, P. And Singh, A., 1990. *Solid State Electronics*, 33, 11.
- Gomila, G. and Rubi, J. M., 1997. *J.Appl. Phys.*, 81,2674.
- Grundmann, M. 2014. *The Physics of Semiconductors*. Springer International Publishing, 989 pages, Switzerland.
- Güzeldir, B, Yıldırım, M.A., Ateş, A., Sağlam, M. 2010. Some electrical properties Cd/CdS/n-GaAs/In, Zn/ZnS/n-GaAs/In and Cu/CuS/n-GaAs/In sandwich structures. *Azerbaijan journal of physics* ISSN, 1028-8546.

- Güzeldir, B., Sağlam, M., Ateş, A. 2011. Laterally inhomogeneous barrier analysis of identically prepared Cd/CdS/n-Si/Au-Sb structures by SILAR method. *Microelectronics Reliability* 51, 2179–2184.
- Hernandez-Como, N., Martinez-Landeros, V. , Mejia, I., Aguirre-Tostado, F.S., Nascimento, C.D., Azevedo, G.M., Krug, C., Quevedo-Lopez, M.A. 2014. Defect control in roomtemperature deposited cadmiumsulfide thin films by pulsed laser deposition. *Thin Solid Films* 550, 665–668.
- Huang, W.C., Lin, T.C., Horng ,C.T., Chen C.C., 2013. Barrier heights engineering of Al/p-Si Schottky contact by a thin organic interlayer. *Microelectronic Engineering* 107, 200–204.
- Hurma, T., 2016. Effect of cerium incorporation on the structural and optical properties of CdS film. *Optik* 127, 10670–10675.
- Ikhmayies S.J., Ahmad-Bitar, R.N 2011. The use of IeV characteristics for the investigation of selected contacts for spray-deposited CdS: In thin films. *Vacuum* 86, 324-329.
- Khallaf, H., Oladeji, I.O., Chai, G., Chow, L. 2008. Characterization of CdS thin films grown by chemical bath deposition using four different cadmium sources. *Thin Solid Films* 516, 7306–7312.
- Kittel, C., 1986. *Introduction to Solid State Physics*, John Wiley & Sons, Inc., 129, USA.
- Krishnakumar, R., Subramanian, V., Ramprakash, Y. and Akshmanan, A.S.I., 1987. Thin film preparation by spray pyrolysis for solar cells, *Mater. Chem. And Phys. Switzerland*, Vol. 16, No:5-6, pp. 385-395.
- Lee, Y., Kim, H. and Roh, Y., 2001. Deposition of ZnO thin films by the ultrasonic spray pyrolysis technique, *Jpn. J. Appl., Phys.*, Vol. 40, pp: 2423-2428.
- Ma, L., Ai, X., Wu, X., 2017. Effect of substrate and Zn doping on the structural, optical and electrical properties of CdS thin films prepared by CBD Method. *Journal of Alloys and Compounds* 691, 399-406.
- Neamen, D. A. 1992. *Semiconductors Physics and Devices*, R. R. Donnelley & Sons Company, Sydney.
- Norde, H. A. 1979. “A Modified Forward I-V Plot for Schottky Diodes with Hig Series Resistance”, *J. Appl. Phys.*,50: 5052-5053
- Ocaya, R.O. 2014. A current-voltage-temperature method for fast extraction of schottky diode static parameters. *Measurement* 49, 246–255.
- Oliva, A.I., Corona, J.E., Patiño, R., Oliva-Avilés, A.I. 2012. Chemical Bath Deposition of CdS Thin Films Doped With Zn and Cu. *Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Unidad Mérida, Departamento de Física Aplicada, Km 6 Antigua Carretera a Progreso A.P. 73-Cordemex, 97310 Mérida.*
- Özdemir, A. F., Türüt, A., Kökçe, A. 2003. The interface state energy distribution from capacitance-frequency characteristics of gold/n-type Gallium arsenide Schottky barrier diodes. *Thin Solid Films*, 425, 210-215.
- Özkan, Ş., 2007. *Doktora Tezi. Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.*
- Patil, P.S., 1999. Versatility of chemical spray pyrolysis technique, *Materials Chemistry and Physics* 59, 185-198.
- Perednis, D. And Gauckler J. L., 2005. Thin film deposition using spray pyrolysis, *Journal of Electroceramics*, 14, 103–111.

- Ramachandran, K., Raji, P. and Sanjeeviraja, C., 2005. Thermal and structural properties of spray pyrolysed CdS thin film, *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 28, No. 3, pp: 233-238.
- Rhoderick, E. H. and Williams, R.H.1988. *Metal-Semiconductor Contacts*, 2nd Ed. (Clarendon, Oxford). 1-225.
- Sağlam, M., Ateş, A., Güzeldir, B., Astam, A., Yıldırım, M.A. 2009. Effects of thermal annealing on electrical characteristics of Cd/CdS/n-Si/Au-Sb sandwich structure. *Journal of Alloys and Compounds* 484, 570–574
- Sato, K., Yasumura, Y. 1985. Study of forward I-V plot for Schottky Diodes with high series resistance, *J. Appl. Phys.*, 58(9), 3655-3657.
- Savaskan, T., 1999, Malzeme bilgisi ve muayenesi, KTU Mak. Muhendisliği, Derya Kitabevi, 285 s.
- Shabana, M., Mustafaa, M., El Sayedb, A.M., 2016. Structural, optical, and photocatalytic properties of the spray deposited nanoporous CdS thin films; influence of copper doping, annealing, and deposition parameters, 56, 329-343.
- Singh, J. 2001. *Semiconductor devices: basic principles*. Wiley Publications, 537 pages, New York
- Sullivan, J. P., Tung, R. T., Pinto, M.R. and Graham, W. R. 1991. Electron transport of inhomogeneous Schottky barrier: A numerical study, *J. Appl. Phys.* 70, (12), 7403-7423.
- Taşer, A., 2012. Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum
- Temirci, C., 2000. Atatürk Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Tseng, H. H. And Wu, C. Y., 1987. *Solid State Electronics*, 30,383.
- Türüt, A. and Sağlam, M. 1992. The determination of the density of Si-metal interface states and excess capacitance caused by them. *Physica B*, 179, 285.
- Türüt, A., Yalçın, N., Sağlam, M., 1992. Parameter extraction from non-ideal C-V characteristics of a Schottky diode with and without interfacial layer. *Solid-State Electron*, 35, 835-838.
- Urgessa, Z.N., Dobson, S.R, Talla, K., Murape, D.M, Venter, A., Botha, J.R. 2014. Optical and electrical characteristics of ZnO/Si heterojunction. *Physica B* 439, 149–152.
- Vigil, O., Vaillant, L., Cruz, F., Santana, G., Morales-Acevedo, A. and Contreras-Puente, G., 2000, Spray pyrolysis deposition of cadmium-zinc oxide thin films,thin solid films, 261-362.
- Wilmsen C. W. 1985. *Physics and Chemistry of III-V Compound Semiconductor Interfaces*, Edited by Wilmsen C. W. Plenum Pres, New York.
- Yakuphanoglu, F., Çağlar, M., , Çağlar, Y., Ilcan, S. 2010. Electrical characterization of nanocluster n-CdO/p-Si heterojunction diode. *Journal of Alloys and Compounds* 506,188–193.
- Yıldırım, F., 2012. Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Yüksel, Ö. F., Tuğluoğlu, N., Gülveren, B., Şafak, H., Kuş, M 2013. Electrical properties of Au/perylene-monoimide/p-Si Schottky diode. *Journal of Alloys and Compounds* 577, 30–36.
- Zeng,J.J, Lin, Y. J., 2014. Effects of sulfide treatment on electronic transport of graphene/n-type Si Schottky diodes. *Materials Chemistry and Physics* xxx,1-5.

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Kars'ın Kağızman ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kağızman'da tamamladı. 2006 yılında Yüzüncüyıl Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği bölümünü kazandı. 2007 yılında Atatürk Üniversitesi Kazım Karabekir Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği bölümüne yatay geçiş yaptı. 2011 yılında bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Katıhal Fiziği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans yapmaya başladı.

