



**SILAR METODUYLA ELDE EDİLEN
Cu/CuS/n-GaAs/In YAPININ ELEKTRİKSEL
KARAKTERİSTİKLERİNİN NUMUNE
SICAKLIĞINA BAĞLI OLARAK
İNCELENMESİ**

Ebru KAYA DÖLEKLİ

**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

**SILAR METODUYLA ELDE EDİLEN Cu/CuS/n-GaAs/In YAPININ
ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNİN NUMUNE
SICAKLIĞINA BAĞLI OLARAK İNCELENMESİ**

Ebru KAYA DÖLEKLİ

FİZİK ANABİLİM DALI
Katıhal Fiziği Bilim Dalı

ERZURUM
2017

Her Hakkı Saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü



TEZ ONAY FORMU

**SILAR METODUYLA ELDE EDİLEN Cu/CuS/n-GaAs/In YAPININ
ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNİN NUMUNE SICAKLIĞINA
BAĞLI OLARAK İNCELENMESİ**

Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM danışmanlığında, **Ebru KAYA DÖLEKLİ** tarafından hazırlanan bu çalışma, 30/06/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **FİZİK** Anabilim Dalı **KATİHAL FİZİĞİ** Bilim Dalı'nda **Yüksek Lisans Tezi** olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM

İmza :

Üye : Doç. Dr. Betül GÜZELDİR

İmza :

Üye : Doç. Dr. Güven TURGUT

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun **13.07/2017** tarih ve **..28.../.27.....** 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

SILAR METODUYLA ELDE EDİLEN Cu/CuS/n-GaAs/In YAPININ ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNİN NUMUNE SICAKLIĞINA BAĞLI OLARAK İNCELENMESİ

Ebru KAYA DÖLEKLİ

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

Danışman: Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM

Yapılan yüksek lisans tez çalışmasında n-GaAs ve cam taban malzemeler üzerine CuS ince filmleri Sıralı İyonik Tabaka Çökmesi ve Reaksiyonu (SILAR) yöntemiyle büyütüldü. Cam taban malzeme üzerine büyütülen CuS ince filmlerine ait yapısal ve optik özellikler XRD, SEM, optik soğurma analizleri ile incelendi. Optik soğurma ölçümleri kullanılarak CuS ince filmine ait yasak enerji aralığı 2.05 eV olarak hesaplandı. Yapılan XRD analizleri incelendiğinde filmin polikristal yapıda olduğu görüldü. n-GaAs yarıiletkeninin mat yüzeyine In metali ile omik kontak yapıldı, parlak yüzeyine CuS ince filmi büyütüldü ve CuS ince filmi üzerine 1 mm çaplı dairesel maskeler kullanılarak Cu metali buharlaştırıldı ve Cu/CuS/n-GaAs/In yapı elde edildi. Daha sonra elde edilen bu yapının, 100 K- 200 K- 300 K sıcaklık değerlerinde düz beslem akım-voltaj (I-V) grafiklerinden Termoionik Emisyon, Norde, Cheung metodları kullanılarak idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç gibi diyot parametreleri hesaplandı. Oda sıcaklığında (300 K) frekansa bağlı olarak alınan kapasite-voltaj (C-V) ölçümlerinden ve C^{-2} -V grafiklerinden difüzyon potansiyeli, donor konsantrasyonu, Fermi seviyesi ve engel yüksekliği değerleri hesaplandı. 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı olarak 100 K ve 200 K değerlerinde aynı hesaplamalar tekrarlandı. Ters beslemde uygulama gerilimi arttıkça, kapasitenin hızlı bir şekilde azaldığı görüldü. Ayrıca Cu/CuS/n-GaAs/In diodunun doğrultma oranı ve arayüzey hal yoğunluğu değerleri numune sıcaklığına göre I-V karakteristiklerinden hesaplandı.

2017, 70 sayfa

Anahtar Kelimeler: CuS, SILAR, Schottky diyot, Elektriksel karakterizasyon, İnce film

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF Cu/CuS/n-GaAs/In STRUCTURE OBTAINED BY SILAR METHOD DEPENDING ON SAMPLE TEMPERATURE

Ebru KAYA DÖLEKLİ

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

Supervisor: Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM

In the master thesis study, CuS thin films were grown on n-GaAs and glass substrates with SILAR technique. Optical and structural properties of the CuS thin film, grown on n-GaAs and glass substrates were investigated with XRD, SEM and UV-Visible absorption techniques. Band gap of CuS thin film was calculated as 2,05 eV using optical absorption measurements. When the XRD analyzes were examined, it was seen that the CuS film was in polycrystalline structure. CuS thin film was grown on the surface of the n-GaAs semiconductor and Cu/CuS/n-GaAs/In structure was obtained after Cu metal was evaporated under the 10^{-5} torr pressure. Then this structure is obtained, diode parameters such as ideality factor, barrier height, and series resistance were calculated by using Thermionic Emission, Norde and Cheung Method from forward bias I-V (current-voltage) graphs at 100 K- 200 K- 300 K temperature values. In room temperature barrier height, Fermi level, donor concentration and diffusion potential values were calculated from the C-V (Capacitance- Voltage) and C^{-2} -V graphics depending on frequency. The same calculations were made for the values of 100 K and 200 K the temperature at the frequency of 500 kHz. While the application voltage was increased in reverse bias, it was observed that the capacitance rapidly decreased. The rectification ratio was calculated by proportion current value in the case of forward bias towards current value in the case of reverse bias. As a result of these calculations, it was observed that the best rectification ratio was at a temperature of 100 K. Interface states (N_{ss}) for Cu/CuS/n-GaAs/In structure have been calculated at 100 K- 200 K- 300 K sample temperatures.

2017, 70 pages

Keywords: CuS, SILAR, Schottky diode, Electrical characterization, Thin film

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünde yapılmıştır. Yüksek lisans tez konumu belirlemede bana yardımcı olan, tezi hazırladığım süre boyunca her türlü desteğini, engin bilgisini ve yardımını benden esirgemeyen tez danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM'a en içten dileklerimle teşekkürlerimi sunarım.

Tez süresince görüş, öneri ve bilgilerinden yararlandığım Sayın Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarım sırasında çalıştığım numunelerin hazırlanması ve ölçümlerinin yapılmasında bana büyük katkıları olan, bilgi ve desteğini esirgemeyen saygıdeğer hocalarım Sayın Doç. Dr. Betül GÜZELDİR'e, Sayın Öğr. Gör. Oğuzhan ÖZAKIN'a, Sayın Ahmet TAŞER'e Sayın Fatma YILDIRIM'a ayrıca çok değerli laboratuvardaki çalışma arkadaşlarım Şeydanur AKTAŞ'a ve 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 göstermiş oldukları destek ve teşviklerinden dolayı çok değerli eşime ve aileme teşekkür ederim.

Ebru KAYA DÖLEKLİ

Haziran, 2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	12
2.1. Giriş	12
2.2. Yarıiletkenler.....	12
2.3. Temel Yarıiletken Materyal Grupları.....	14
2.3.1. Elemental (IV-IV) yarıiletkenler	14
2.3.2. III-V grubu bileşik yarıiletkenler	15
2.3.3. II-VI grubu bileşik yarıiletkenler	18
2.4. Schottky Diyotlar ve Omik Kontaklar.....	18
2.4.1. Metal- yarıiletken kontak tipleri.....	18
2.4.2. Shottky diyotlarda akım akışı.....	20
2.4.3. Schottky diyonun kapasitansı	22
2.4.4. Omik kontaklarda akım	23
2.5. Engel Yüksekliği Ölçüm Teknikleri.....	24
2.6. Norde Metodu.....	28
2.7. Engel Yüksekliğinin Sıcaklığa Bağlılığı	32
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	35
3.1. n-GaAs Kristalinin Kimyasal Olarak Temizlenmesi.....	35
3.2. n-GaAs Kristaline Omik Kontak Yapılması	35
3.3. CuS İnce Filminin SILAR Metoduyla Yarıiletken Üzerinde Elde Edilmesi	37
3.4. Cu/CuS/n-GaAs/In Yapının Elektriksel Karakterizasyonu	39
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	41
4.1. Giriş	41

4.2. CuS ince filmlerin Soğurma, XRD ve SEM Analizleri.....	41
4.3. Cu/CuS/n-GaAs/In Yapısının Elektriksel Karakteristiklerinin Numune Sıcaklığına Bağlı Olarak Analizi.....	45
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	62
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	71



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	Diyodun Etkin Alanı
A*	Richardson Sabiti
AES	Auger Elektron Spektroskopisi
ALE	Atomik Tabaka Epitaksi
BH	Bariyer Yüksekliği
c	Işık Hızı
CBD	Kimyasal Banyo Depozisyon
C-V	Kapasite-Voltaj
CVD	Kimyasal Buhar Depozisyon
e	Elektronun Yüğü
E _a	Aktivasyon Enerjisi
E _C	Yarıiletkenin İletkenlik Bandının Taban Enerji Seviyesi
EDAX	Enerji Dağılımlı X-Işını Spektrometresi
E _f	Fermi Enerji Seviyesi
E _{Fm}	Metalin Fermi Enerjisi
E _{Fs}	Yarıiletkenin Fermi Enerjisi
E _g	Yasak Enerji Aralığı
E _V	Yarıiletkenin Valans Bandının Tavan Enerji Seviyesi
F(V)	Norde Fonksiyonu
FES	Fotoemiyon Spektroskopisi
h	Plank Sabiti
I ₀	Doyma Akımı
IAT	Ara yüzey Alaşım Tekniğı
I-V	Akım – Voltaj
J	Akım Yoğunluğu
k	Boltzmann Sabiti
LEED	Düşük Enerjili Elektron Kırınımı
LPE	Sıvı Faz Epitaksi
MBE	Moleküler Demet Epitaksi

MIS	Metal-Yalıtkan-Yarıiletken
MS	Metal- Yarıiletken
n	İdealite Faktörü
N_d	İyonize Olmuş Donor Konsantrasyonu
n_i	Asal Taşıyıcı Konsantrasyonu
N_{ss}	Arayüzey Hal Yoğunluğu
R_s	Seri Direnç
SBH	Schottky Engel Yüksekliği
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SILAR	Sıralı İyonik Tabaka Çökmesi ve Reaksiyonu
T	Sıcaklık
TE	Termoionik Emisyon
TED	Termoionik Emisyon Difüzyon
TEM	Transmisyon Elektron Mikroskopisi
UV	Mor Ötesi Işıklar
V_{bi}	Built-in Potansiyeli
W	Uzay Yüğü Bölgesinin Genişliği
XRD	X-Işını Difraksiyonu
ϵ_0	Boşluğun Dielektrik Sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin Dielektrik Sabiti
Φ_b	Engel Yüksekliği
Φ_e	Etkin Engel Yüksekliği
Φ_m	Metalin İş Fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin İş Fonksiyonu
χ	Elektron İlgisi
λ	Dalga Boyu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kristal yarıiletkenlerdeki atomların bağ düzenleri	15
Şekil 2.2. Enerji seviyesi diyagramları	19
Şekil 2.3. Bir Schottky diyodun enerji diyagramı.....	21
Şekil 2.4. İdeal bir metal-yarıiletken omik kontakın akım-voltaj ilişkisi	24
Şekil 2.5. Metal-Yarıiletken kontakın homojen olmayan engel modeline göre şematik enerji bant diyagramı.....	32
Şekil 3.1. Tavlama fırını	36
Şekil 3.2. Metal buharlaştırma işlemlerinin yapıldığı kaplama ünitesi	37
Şekil 3.3. n-GaAs yarıiletken ve cam altlık üzerine SILAR tekniği ile CuS ince filminin büyütülme şeması	38
Şekil 3.4. I-V ve C-V ölçümlerinin alındığı sistemler.	40
Şekil 4.1. Cam altlık üzerine büyütülen CuS ince filminin soğurma spektrumu.....	42
Şekil 4.2. n-GaAs altlık üzerinde büyütülmüş CuS ince filmin XRD deseni.	44
Şekil 4.3. n-GaAs yarıiletkeninin üzerine SILAR yöntemi ile büyütülen CuS ince filminin SEM görüntüsü	45
Şekil 4.4. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının sıcaklığa bağlı I-V karakteristikleri.....	47
Şekil 4.5. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının sıcaklığa bağlı $dV/d(\ln I)$ -I grafığı.	49
Şekil 4.6. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının sıcaklığa bağlı $H(I)$ -I grafığı	49
Şekil 4.7. Numune sıcaklığına bağlı olarak $F(V)$ 'nin V 'ye karşı değişimleri.	51
Şekil 4.8. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının oda sıcaklığında 50 kHz, 100 kHz, 200kHz, 300 kHz, 500 kHz ve 1 MHz frekans değerlerinde ölçülen doğru ve ters beslem C-V grafikleri	53
Şekil 4.9. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının oda sıcaklığında 50 kHz, 100 kHz, 200kHz, 300 kHz, 500 kHz ve 1 MHz frekans değerlerinde ölçülen ters beslem C^{-2} -V değişimleri	54
Şekil 4.10. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının $f=500$ kHz'de numune sıcaklığına bağlı olarak alınan C-V grafikleri	57

Şekil 4.11. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının $f=500$ kHz’de numune sıcaklığına bağlı olarak alınan C^{-2} -V grafikleri.....	58
Şekil 4.12. Cu/CuS/n-GaAs/In numunesine ait doğru beslem I-V karakteristiklerinden elde edilen sıcaklığa bağlı N_{ss} değişimleri	60
Şekil 4.13. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının 100 K, 200 K ve 300 K sıcaklık değerlerinde uygulanan gerilime bağlı olarak doğrultma oranları değişimleri	61



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Yarıiletkenler için yaygın olarak kullanılan elementlerin dünya üzerinde oluşan kesri	14
Çizelge 2.2. Yarıiletken optik kaynaklar ve temsili dalga boyları.....	17
Çizelge 2.3. $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$ yarıiletkenindeki dalga boyunu ayarlamak için x'in çeşitliliği	17
Çizelge 4.1. Cu/CuS/n-GaAs/In numunesinin sıcaklığa bağlı I-V değişimlerinden farklı metodlar kullanılarak elde edilen parametreleri.	52
Çizelge 4.2. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan frekansa bağlı ($T=300\text{K}$) parametrelerin deneysel değerleri	56
Çizelge 4.3. 500 kHz frekansta sıcaklığa bağlı olarak alınan C^{-2} -V grafiklerinden hesaplanan parametreler	58

1. GİRİŞ

Günümüzde yarıiletken teknolojisi 20. Yüzyıldan itibaren önemli ölçüde gelişmeler göstermekte ve günümüz devre elemanlarında Metal-Yarıiletken (MS); Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) diyotlar yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bakır, demir ve kurşun sülfat ince tellerin geniş tabanlı metaller ile kontak haline getirildiğinde elektriksel iletkenliklerinin asimetrik olduğu ilk olarak 1874 yılında Braun tarafından ifade edilmiştir. Daha sonra bu konu üzerindeki araştırmalar sistematik olarak (1877, 1878 ve 1883) devam etmiştir. Schuster 1874’de oksitlenmiş bakır teller üzerindeki nokta kontaklar ile benzer gözlemler yapmıştır (Boer 1926).

Radyo dalgalarının algılanmasına olan ihtiyaç doğrultmaya olan ilgiyi artırmıştır ve bu 20. Yüzyılın başlarında “kedi bıyığı olarak adlandırılan” nokta kontak doğrultucuların dikkat çekmesine neden olmuştur (Boer 1926). Bu doğrultucular oldukça düşük güç ile sınırlıdır. Birkaç nokta kontağın paralel bağlanarak güç taşıma kapasitesini yükseltme çalışmaları, her birinin farklı akım-voltaj karakteristiklerine sahip olması nedeniyle başarısız olmuştur.

İlk geniş alanlı(tabakalı) doğrultucular Grondahl tarafından, kısmen oksitlenmiş gümüş tabaka ve ikinci elektrot olarak seçtiği oksit ile kaplanmış kurşun folyo kullanılarak geliştirilmiştir (1933). Başlangıçta ki zayıf doğrultma oranı en üstte grafit ya da gümüş elektrotun kullanılmasıyla hızlı bir şekilde artmıştır ve birkaç yıl içerisinde bu oran 6000:1 kadar yükselmiştir (Boer 1926).

Selenyum ile uyumlu elektrotlar kullanılarak tabakalı doğrultucular keşfedilmiştir. Ayrıca Merritt’in 1925’de selenyumlu doğrultucuların gelişiminde rolü olduğu belgelenmiştir. Bu doğrultucular kadmiyum içeren bir alaşım ile nikel kaplı bir çelik üzerine selenyum biriktirilerek elde edildi ve böylece CdSe ince tabaka yapısı elde

edilmiş oldu. Diğer tabakalı doğrultucular bakırın sülfür, selenit ve tellürit formlarında yapılmıştır (Boer 1926).

Doğrultucuların ilk türlerinde metal yarıiletken sınırında Schottky engeli olarak bilinen bir engelin oluştuğuna inanılırdı. Bu engelin belirli metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki fark Φ_{MS} ile ifade edildiği gözlemlenmiştir (Schottky 1938, 1939; Davydov 1939, 1941).

Diğer yarıiletkenlerde bu ilişki görülmemiştir. Çünkü burada engel metal türünden çok fazla etkilenmeden belirli bir seviyeye sabitlenmiştir. Bu durum Schottky engel teorisinin ilk yıllarında bir sorun olarak ortaya çıkmıştır. Sonraki yıllarda metal ve yarıiletken arasındaki ara yüzeylerden ve yüzey hallerinden dolayı Fermi seviyesinin sabitlendiği anlayışı ortaya çıkmıştır.

Doğrultucu ve omik olmak üzere iki tür kontak söz konusudur. Doğrultucu kontaklar bir yönde akım geçirirken, omik kontaklar her iki yönde akım geçiren düşük dirençli kontaklardır. Omik ya da doğrultucu kontak üretmek için gerekli olan teknoloji kontak malzemesine ve büyütme tekniğine bağlı olarak yavaş yavaş gelişmiştir (Temirci vd. 2010).

Schottky ve Mott'un öncülük eden çalışmalarından sonra (Mott 1938; Schottky ve Spence 1939; Schottky 1940, 1942) bu tür kontakları üretmek kolay bir iş gibi görünüyordu. Ancak bu durumun aksine iş fonksiyonlarındaki bilinen farklılıklardan kaynaklanan problemler gözlemlenmiştir.

Bugün bile bazı yarıiletkenlerde kararlı ve tekrarlanabilir omik ya da doğrultucu kontaklar elde etmek önemli bir iştir. Son zamanlarda, deneysel ekipmanların gelişmesi istemsiz kirliliklerin önlenmesine, yüzeye homojen kontaklar kaplanmasına ve istenilen boyutta yüzeye sahip kristallerin büyütülmesine imkan sağlamıştır.

Metal yarıiletken engellerin fiziği ile ilgili daha fazla bilgiyi Rhoderick (1978 ve 1982)'in makalelerinde bulmak mümkündür (Rhoderick ve Williams 1988), Henisch (1984) ve Milnes ve Feucht (1972). Ayrıca Sharma'nın çalışmalarına da bakılabilir (1984). Schottky aygıtların uygulamalarının bir çalışması Rideout tarafından da yapılmıştır (1978).

Padovani (1971), 1962'den bu yana kaydedilen ilerlemeyi gözden geçirerek Schottky engellerin I-V karakteristiklerini incelemiştir. İdeal Schottky engellerine ilişkin teorileri ve önerilen bir metal-yarıiletken kontağın I-V karakteristiğini diyot teorisiyle vermiştir. Pratikte bu tür engel yüksekliğine ulaşmanın zor olduğunu ve engel yüksekliğinin uniform olmaması, yük yoğunluğu veya metal-yarıiletken arasında bir arayüz tabakasının olması, bu zorlukların belirgin olarak I-V karakteristiğini değiştirdiğini göstermiştir.

Metzner vd. (1997), ilk epitaksiyel n-Si/p-CuInS₂ heteroeklem yapıların karakterizasyonunu sunmuşlardır. Molecular Beam Epitaxy (MBE) yöntemi ile bakırca zengin CuInS₂ tabakaları n-tipi Si (1 1 1) altlık üzerine sülfür biriktirerek üretmişlerdir. Düşük enerjili elektron kırınımı (LEED), Auger Elektron Spektroskopisi (AES) ve Transmisyon Elektron Mikroskopisi (TEM) dahil olmak üzere çeşitli yöntemler kullanarak kusurların yapısal karakterizasyonlarını incelemişlerdir.

Lindroos vd. (2000), SILAR metoduyla, Bakır Sülfür ince filmlerdeki büyümeyi normal basınç ve oda sıcaklığında incelemişlerdir. CuS filmlerin kimyasal analizini XRD, SEM ve UV spektroskopisi ile karakterize etmişlerdir. CuS büyüme oranının bakırın konsantrasyonu ile orantılı olduğunu ve filmlerin polikristal ve tercih edilen bir yönelimi olduğunu göstermişlerdir. Oksitlenmiş yüzeyleri, CuS'ün zayıf bağlanmasını artırmak için, İTO ve cam alt-tabakalar üzerinde bir tampon tabakası olarak kullanmışlardır ve CuS ince filmleri CdS ile karşılaştırmışlardır.

Coşkun vd. (2003), bir Bridgman-Stockbarger metodu ile büyütülen p-GaTe tabakalı yarıiletken malzeme üzerinde Sn Schottky kontakların 80-300 K sıcaklık aralığında düz

beslem I-V özelliklerini ölçmüşlerdir. Termoiyonik emisyon (TE) mekanizmasına dayalı analizlerinde düz beslem engel yüksekliğinde anormal bir azalma ve düşük sıcaklıklarda idealite faktöründe bir artma olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Bu davranış nedeniyle esas engel yüksekliğinin arayüzey homojensizliklerin bir Gauss dağılımı varsayımına dayalı olduğunu yorumlamışlardır. Φ_b 'ye karşı $1/T$ Gauss dağılımı grafiğini çizmişlerdir ve sırasıyla Schottky diyot için ortalama engel yüksekliği ve standart sapma değerlerini $\Phi_b (T=0) = 0,89$ eV ve $\sigma_0 = 0,0094$ V olarak elde etmişlerdir. $\ln(I_s/T^2) - (q^2\sigma^2/2k^2T^2)$ 'ye karşı $1/T$ grafiğinden sırasıyla, $\Phi_b (T=0)$ ve A^{**} değerlerini 0,91 eV ve $6,15 \text{ A K}^{-2}\text{cm}^{-2}$ olarak bulmuşlardır. p-GaTe üzerinde yapılan Schottky kontakların I-V özelliklerinin sıcaklığa bağımlılığını başarılı bir şekilde yorumlamışlardır.

Chand ve Bala (2007), bir ara yüzey yalıtkan tabaka ile Schottky diyotların akım-gerilim karakteristiklerini sayısal simülasyon yöntemi ile analiz etmişlerdir. Metal-yalıtkan-yarıiletken Schottky diyot I-V verilerinden bir arayüzey tabaka parametresiyle Termoiyonik Emisyon Difüzyon (TED) denklemini kullanarak simüle etmişlerdir. Hesaplanan akım-gerilim verilerinin arayüzey tabakada akım geçişinin belirgin etkisini görmek için ideal bir TED denklemine uygun olduğunu belirtmişlerdir. Simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlardan, metal-yarıiletken Schottky kontakın büyük engel yükseklikli (BH) ideal bir diyot gibi davranmasının sebebinin arayüzeyde yer alan bir yüzey tabakasının varlığı ile açıklanamayacağı vurgusunu yapmışlardır. Sıcaklığın azalması ile engel yüksekliğinin, doğrusal olarak azaldığını göstermişlerdir.

Tataroğlu ve Altındal (2009), Au/SiO₂/n-Si (MIS) Schottky diyotların I-V özelliklerinin sıcaklığa bağımlılığını 300-400 K sıcaklık aralığında ölçmüşlerdir. Termoiyonik Emisyon (TE) teorisine göre düz ve ters beslem I-V karakteristiklerini MIS Schottky diyodun bariyer parametrelerini hesaplamak için analiz etmişlerdir. Termoiyonik Emisyon teorisini gözönünde bulundurarak hesaplanan düz beslem engel yüksekliği (Φ_b) ve idealite faktörü (n) değerlerinin sıcaklığa bağlı kuvvetli bir değişim gösterdiğini tespit etmişlerdir. Artan sıcaklık ile n değerinin azaldığı ve Φ_b değerinin arttığını görmüşlerdir. Φ_b ve n değerlerini sırasıyla 300 K'de 0,63 eV ve 2,90; 400 K'de 0,80 eV

ve 1,79 olarak hesaplamışlardır. Arayüzey hal yoğunluğu (N_{ss}) enerji dağılımının sıcaklığa bağımlılığını, etkin engel yüksekliğini (Φ_e) ve idealite faktörünü (n) dikkate alarak düz beslem I-V ölçümlerinden elde etmişlerdir. Buna ek olarak seri direnç değerlerini Cheung metodunu kullanarak belirlemişlerdir. Ayrıca I-V ölçümlerinden hesaplanan N_{ss} ve R_s değerlerinde MIS yapıların elektriksel özelliklerini etkileyen önemli parametreler olduklarını doğrulamışlardır.

Yıldırım vd. (2009), CuS, $Cu_{0.6}Zn_{0.4}S$ ve ZnS ince filmleri oda sıcaklığında SILAR metoduyla cam altlık üzerine büyütmüşlerdir. Tavlama sıcaklığının kristal yapı üzerindeki etkisi ve ışığın optik band aralığı ve elektriksel özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. SEM ve XRD tekniklerini filmlerin yapısal özelliklerinin incelenmesi için kullanmışlardır. SEM ve XRD sonuçları, cam yüzeylerde polikristal özellik sergileyen filmlerin olduğunu göstermiştir. Absorpsiyon özellikleri kullanılarak CuS, $Cu_{0.6}Zn_{0.4}S$ ve ZnS ince filmlerin enerji band aralıklarını sırasıyla; oda sıcaklığında 2,03, 2,14 ve 3,92 eV olarak bulmuşlardır. İki nokta prob yöntemini filmlerin elektriksel özelliklerinin incelenmesi için kullanmışlardır. Işık yoğunluğunun artırılmasıyla akımın arttığını gözlemlemişlerdir. Filmlerin üzerine yoğunluğu 500 Wcm^2 olan ışık düşürüldüğünde, filmlerde akım değerinde daha fazla artış olduğunu saptamışlardır. 400°C 'de tavlanan CuS ve $Cu_{0.6}Zn_{0.4}S$ filmin akım değerlerinin daha az olduğunu göstermişlerdir.

Güllü vd. (2010), p-Si yarıiletken üzerine damlatma yöntemi ile organik bir film kaplayarak Metal (Al)/Organik Ara Tabaka(Kongo kırmızısı=CR)/İnorganik yarıiletken (p-Si) (MIS) Schottky yapısını oluşturmuşlar ve Al/CR/p-Si MIS yapısının iyi bir doğrultma davranışı sergilediğini gözlemlemişlerdir. Al/CR/p-Si MIS yapısının için düz beslem I-V karakteristikleri kullanılarak idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği değerlerini (Φ_b) sırasıyla; 1,68 ve 0,77 eV olarak elde etmişlerdir. Bu çalışmada Al/CR/p-Si MIS yapısı için 0,77 eV olarak hesaplanan engel yüksekliği değerinin, klasik Al/p-Si Schottky diyotların yaklaşık 0,50 eV olan engel yüksekliği değerinden önemli ölçüde büyük olduğunu göstermişlerdir. Al/p-Si diyodun yüzey potansiyel engel modifikasyonunu, CR organik materyal ince bir ara tabaka kullanarak elde etmişler ve

bu modifikasyonun CR organik ara tabakası ile Si uzay yükü bölgesinin etkileşmesi sonucu ortaya çıktığını belirtmişlerdir. MIS diyodun arayüzey hal yoğunluğunun $1,24 \times 10^{13}$ ile $2,44 \times 10^{12} \text{ eV}^{-2} \text{ cm}^{-2}$ arasında değiştiğini tespit etmişlerdir.

Ateş vd. (2010) , p-Si altlık üzerinde CuS ince film kullanılarak Cu/CuS/p-Si/Al yapı oluşturmuşlardır. Bu CuS ince filmleri SILAR yöntemi kullanarak büyütmişlerdir. Oda sıcaklığında Cu/CuS/p-Si/Al yapısının elektriksel karakterizasyonu I-V ölçümleri kullanılarak yapılmıştır. I-V karakteristiklerinden Cu/CuS/p-Si/Al yapısının seri direnç, idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerini hesaplamışlardır. Termoyonik emisyon teorisi yardımıyla idealite faktörünü $n=1,63$ ve engel yüksekliğini $\Phi_b=0,69 \text{ eV}$ olarak elde etmişlerdir. cheung fonksiyonları yardımıyla seri direnç değerlerini sırasıyla $R_s=340,33 \ \Omega$ $R_s=346,24 \ \Omega$ olarak bulmuşlardır. Aynı şekilde $C^{-2}-V$ karakteristiklerinden engel yüksekliğini $0,523 \text{ eV}$ ile $0,601 \text{ eV}$ arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca diyodun düz beslem I-V karakteristiklerinden mörayüzey hal yoğunluğunu (N_{ss}) hesaplamışlar ve N_{ss} değerlerinin uygulanan düz beslem gerilimiyle hemen hemen exponansiyel olarak değiştiğini bulmuşlardır.

Kundakçı (2011), SILAR tekniğini, oda sıcaklığında $\text{CuInS}_2/\text{In}_2\text{S}_3$ çok tabakalı ince film yapısının biriktirilmesi için kullanmıştır. Biriken filmi, 30 dakika azot atmosferi altında $100, 200, 300, 400, 500^\circ\text{C}$ 'de tavlama ve filmin yapısal, optiksel ve elektriksel özelliklerini araştırmıştır. Filmleri XRD ve UV soğurma spektroskopisi ve optik yapı çalışmaları için kullanmıştır. I-V ölçümlerini filmin fotoelektrik duyarlılığını araştırmak için karanlık bir ortamda ve $15, 30$ ve 50 mW/cm^2 ışık yoğunluğu altında yapmıştır. Aynı zamanda, filmin elektrik direncinin $300-470 \text{ K}$ sıcaklık aralığında kararlı olduğunu ve tavlama sıcaklığının büyük ölçüde $\text{CuInS}_2/\text{In}_2\text{S}_3$ filmlerin yapısal, optik ve elektriksel özelliklerini etkilediğini bulmuştur.

Tecimer vd. (2012), CuInSe_2 filmini molibden kaplı cam ve cam altlık üzerine termal buharlaştırma yöntemi ile sentezlemişlerdir. $\text{Al/CuInSe}_2/\text{Mo}$ Schottky diyot elde etmek için, Al metali CuInSe_2 filmin ön yüzeyine buharlaştırılmış ve yapının elektiriksel özelliklerini analiz etmişlerdir. XRD çalışmalarından CuInSe_2 filmin (112) tercihli

yöneliminde olduğunu ve latis parametrelerini sırasıyla a ve c için 0,577 ve 1,61nm olarak elde etmişlerdir. Mo arka kontak tabakasının (110) düzleminde tercihli bir yönelime sahip olduğu tespit edilmiştir. Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi ile donanımlı SEM ölçümleriyle, Cu açısından zengin bölgelerle, düzensiz ve pürüzlü yüzey morfolojisi ortaya konulmuştur. Optik çalışmalar sonucunda 1,06, 1,17 ve 1,39 eV olarak belirlenmiş üç farklı yasak enerji aralığının varlığı belirlenmiştir. Hal etkisi ölçümlerinden CuInSe₂ filmlerin taşıyıcı yoğunluğunu $4 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ olarak bulmuşlardır. CuInSe₂ filmlerin elektiriksel özellikleri Al/P-CuInSe₂/Mo yapısının imalatında kullanılmış ve onların düz beslem I-V karakteristikleri 25 K adımlarla 100-300 K sıcaklık değerleri arasında elde edilmiştir. Termoyonik emisyon teorisine dayalı düz beslem I-V karakteristiklerinin analizlerinden, sıcaklığın artmasıyla birlikte idealite faktörü ve seri direncin azaldığını, engel yüksekliğinin ise arttığını göstermişlerdir. Engel yüksekliğinin homojensizliğinin düzeltilmesinden sonra, engel yüksekliğini ve Richardson sabiti değerlerini sırasıyla; 0,72 eV ve $34,71 \text{ A}^\circ/\text{cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ olarak bulmuşlardır.

Özakın vd. (2012), ZnS ince film normal basınç ve oda sıcaklığında SILAR metoduyla cam altlık üzerine biriktirmişlerdir. Kırılma indisi ve enerji band aralığının arasındaki ilişkiyi ve ZnS ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri üzerinde film kalınlığının etkisini araştırmışlardır. Enerji band aralığının artan film kalınlığı ile 3,87 ile 3,58 eV arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Kırılma indisini ve yüksek frekanslı dielektrik sabitini, film kalınlığının bir fonksiyonu olarak enerji band aralığındaki değerleri kullanarak hesaplamışlardır. Ayrıca; ZnS ince filmini Zn/ZnS/n-GaAs sandviç yapısını elde etmek için oda sıcaklığında n-GaAs alt tabakası üzerinde doğrudan büyütmüşlerdir. Oluşan sandviç yapının oda sıcaklığındaki I-V eğrilerinden açık bir şekilde doğrultuma davranışı sergilediğini göstermişlerdir. Oda sıcaklığında sırasıyla n ve Φ_b değerlerini 1,894 ve 0,63 eV olarak hesaplamışlardır.

Chawanda vd. (2012), Au/n-Ge (100) Schottky kontakların elektiriksel özelliklerini, I-V ölçümlerini kullanarak sıcaklığın bir fonksiyonu olarak 140-300 K sıcaklık aralığında sistematik şekilde incelemişlerdir. Diyotların I-V karakteristiklerinin sıcaklığa kuvvetli

bir bağımlılığının olduğunu ve artan sıcaklık ile idealite faktörü azalırken, Schottky engel yüksekliğinin arttığını göstermişlerdir. I-V özelliklerini metal yarıiletken arayüzeyindeki homojensizlikler nedeniyle TE teorisini ve engel yüksekliklerinin gauss dağılımının varsayımını kullanarak analiz etmişlerdir. Richardson sabiti ve ortalama engel yüksekliğini, değiştirilmiş Richardson grafiğinden sırayla $1,37 \text{ A}^\circ/\text{cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ ve $0,639 \text{ eV}$ olarak elde etmişlerdir. Hesaplanan Richardson sabiti $50 \text{ A}^\circ/\text{cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ 'den çok küçüktür. Bu durumun arayüzeydeki homojensizlikler (safsızlıklar) nedeniyle olabileceğini belirtmişlerdir.

Guzeldir vd. (2012), CdSe, ZnSe ve CuSe ince filmleri oda sıcaklığında SILAR metoduyla n-tipi Si üzerine büyütülmüşlerdir. Bu filmleri XRD, SEM ve EDAX ile karakterize etmişlerdir. SEM ve XRD çalışmaları ince filmlerin polikristal faz sergilediğini göstermiştir. EDAX spektrumlarıyla beklenen ince filmlerin olduğunu göstermişlerdir. Çoğunlukla ince filmlerin nanometre dağılımlarının eşit dağılımlı olduğunu açıkça göstermişlerdir. Ek olarak Cd/CdSe/n-Si/Au-Sb, Zn/ZnSe/nSi/Au-Sb ve Cu/CuSe) n-Si/Au-Sb yapılarını oda sıcaklığında hazırlamışlardır. Termoiyonik emisyon metoduyla elde edilen I-V ölçümlerinden idealite faktörü, engel yüksekliği, ve doyma akımı, parametrelerini karakterize etmişlerdir. Optik ve elektriksel karakterizasyonlarına göre; ileride güneş pilleri çalışmasında, entegre devrelerde ve diğer elektronik cihazlarda bu filmlerin kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Altuntas H. ve Ozelik H. (2013), Au/ SiO₂ /n-GaAs metal–oksit yarıiletken (MOS) tipi yapının I-V karakteristiklerini 300 K ile 400 K arasında 25 K'lik adımlarla değişen sıcaklıklarda ölçmüşlerdir. Schottky engel diyodun (SBD) I-V karakteristiklerinden termoiyonik emisyon mekanizmasını varsayarak sıfır beslem engel yüksekliği ve idealite faktörünün sıcaklığa şiddetli bir şekilde bağlı olduğunu göstermişlerdir. Sıcaklığın artmasıyla birlikte engel yüksekliğinin arttığını ve idealite faktörünün azaldığını göstermişlerdir. Φ_b ve n değerlerini sırasıyla 300 K de $0,81 \text{ eV}$ ve $1,33$; 400 K'de $0,93 \text{ eV}$ ve $1,12$ olarak hesaplamışlardır. Buna ek olarak; sıcaklığın bir fonksiyonu olarak arayüzey hal dağılım profili, Schottky engel diyotların seri direnç ve engel

yüksekliğinin ön gerilime bağlı olduğunu dikkate alarak düz beslem I-V ölçümlerinden çıkarmışlardır. Seri direnç değerini Cheung metodunu kullanarak hesaplamışlardır.

Özaydın vd. (2013), bir bakır (II) organik kompleksinin konveksiyonel Au/ n-Si MS kontakların elektriksel özelliklerini kontrol edilebilir olduğunu göstermişlerdir. Bu Cu(II) kompleksi/n-Si heteroeklem diyotların elektronik ve fotovoltaiik özelliklerini incelemişlerdir. Diyodun idealite faktörünü ve engel yüksekliğini sırasıyla, 2,22 ve 0,736 eV olarak bulmuşlardır. Bu diyodun İdeal olmayan akım gerilimi davranışı sergilediğini göstermişlerdir. Bu davranışı, seri direnç ve bir ara yüzey tabakasının mevcudiyetinin etkisi ile sonuçlandırmışlardır. Seri direnç ve engel yüksekliğini Norde yöntemini kullanarak sırasıyla, 6.7 k Ω ve 0.77 eV olarak belirlemişlerdir. Cihazın 8 mW/cm² ışık altında maksimum açık devre gerilimi 0.24 V ve 1.7 μ A bir kısa devre akımı ile, fotovoltaiik davranış sergilediğini göstermişlerdir.

Çevik (2013), yüksek lisans tez çalışmasında *PbS* yarıiletken ince filmleri SILAR yöntemini kullanarak cam alttabanlar üzerine oda sıcaklığında elde etmiştir. Elde edilen filmlerin kalınlıklarının tartım yöntemini (WDM) kullanarak 397-822 nm arasında olduğunu hesaplamıştır. Ayrıca aldığı SEM görüntülerinde *PbS* filmlerin küresel parçacıklı olduğunu ve direk bant geçişine sahip olduğunu göstermiştir. Sırasıyla yasak enerji aralığının ve idealite faktörünün 1,48-2,84 eV; 2,70-9,12 arasında değiştiğini belirlemiştir.

Chaki vd. (2014), CuS ince filmleri oda sıcaklığında kimyasal banyo ve daldırma (CBD) teknikleriyle sentezlemişlerdir. Sentezlenen her iki ince filmin X-ışını enerji dağılımlarıyla sitokiyometrik olduklarını teyit etmişlerdir. CBD ve dip coating yöntemiyle büyütülen ince filmlerin XRD ölçümleri filmlerin hegzogenel yapıya sahip olduklarını göstermişlerdir. Latis parametrelerini $a=b=3,79 \text{ \AA}$ ve $c=16,34 \text{ \AA}$, ve Scherer formülünü kullanarak kristal boyutlarını da sırasıyla 11 nm ve 13 nm olarak bulmuşlardır. İnce film yüzeylerde birikimin optik mikroskopisi her iki kaplama metoduyla altlık yüzeylerin çok iyi kaplandığını göstermişlerdir. Filmlerin SEM görüntüleri, dip-coating ile büyütülen filmlerde tane büyüklüğünün nanometre

boyutunda olduğunu gösterirken CBD ince filmlerde tane büyüklüğünün birkaç μm 'den nm 'ye kadar olduğunu göstermiştir. Optik spektrum analizinden CBD ile büyütülen ince filmlerde direk band-gapı 2,2 eV ve indirek bad-gapı 1,8 eV olarak bulmuşlardır. Daldırmalı kaplama yöntemiyle büyütülen ince filmlerde ise direk band-gapı 2,5 eV ve indirek bad-gapı ise 1,9 eV olarak bulmuşlardır. Her iki yöntemle büyütülen filmler için sıcaklıkla DC elektiriksel öz dirençleri belirlenmiş, bunların sonucunda öz direnç değerlerinin sıcaklıkla azaldığını görmüşlerdir. Her iki yöntemle sentezlenen CuS ince filmlerden oda sıcaklığında Hall etkisi ve termoelektrik ölçümlerle bu ince filmlerin p-tipi iletken olduğunu göstermişlerdir.

Çaldıran vd. (2014), Au/Anthraquinone/p-Si/Al kontakların akım-gerilim ölçümlerini 80-280 K sıcaklık aralığında gerçekleştirmişlerdir. Bu film Antrakininon p-Si uzay yükü bölgesini etkileyerek Au/p-Si/Al engel yüksekliğinin 0,77 eV'dan 0,85 eV'a değiştiğini gözlemlemişlerdir. Düşük sıcaklıklarda Au/Anthraquinone/p-Si/Al kontakın akım-gerilim ölçümlerinden engel yüksekliğinde azalma ve idealite faktöründe artış olduğunu göstermişlerdir. Richardson grafiklerinde doğrusal olmayan bir davranış görmüşlerdir. Richardson grafiğinin ordinatı kesişiminden ve eğiminden sırasıyla; aktivasyon enerjisini ve Richardson sabitini 0,08 eV ve $3,19 \times 10^{-18} \text{ A/cm}^2\text{K}^{-2}$ olarak tespit etmişlerdir. Cheung fonksiyonları ile elde edilen seri direnç değerlerinin kuvvetli bir şekilde sıcaklığa bağlı olduğunu göstermişlerdir.

Bu çalışmada, n-tipi GaAs inorganik yarıiletkenin mat yüzeyine indiyum buharlaştırılarak omik kontak yapılmıştır. Diğer yüzeyine ise SILAR tekniği ile CuS ince filmi büyütülmüştür. CuS film üzerine 10^{-5} torr basınçta Cu buharlaştırılarak Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısı elde edilmiştir. Bu yapının elektriksel özellikleri 100, 200 ve 300 K sıcaklık değerlerinde I-V ve C-V ölçümleriyle araştırılmıştır.

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma 5 bölümden oluşmaktadır. İlk olarak konunun amacı ile önemini belirten literatür çalışmaları sonucu oluşturulan giriş bölümünden başlayıp, Kuramsal Temeller anlatıldıktan sonra Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapılarının üretilmesi için gerekli olan malzemeler, hazırlanması ve deney

sistemi ile ölçülerin alınmasında kullanılan cihazlar hakkında bilgiler içeren Materyal ve Yöntemle devam edilmiştir. Ardından CuS ince filmlerinin optiksel ve yapısal özellikleri ile numune sıcaklığına bağlı I-V ve C-V karakteristiklerini içeren Araştırma Bulguları ve son olarak ise sonuçların yorumlanmasını içeren Tartışma ve Sonuç bölümleri yer almaktadır.



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Giriş

Transistörler ve diyotlar, radyo ve televizyonlardan bilgisayarlara kadar değişen sistemlerde kullanılan entegre devreler de dahil olmak üzere tüm modern elektronik cihaz ve sistemlerin temelini oluşturmaktadırlar. Bu devre elemanları yarıiletken olarak adlandırılan malzemelerden yapılmış katıhal elektroniği aygıtlarındandır. Bu aygıtlar için genellikle yaygın olarak kullanılan yarıiletken bu zamana kadar silisyum iken, bazı çok yüksek hızlı uygulamalar için çoğunlukla bileşik yarıiletken olan galyum arsenit de kullanılmıştır.

2.2. Yarıiletkenler

Yarıiletkenler, yalıtkanlar ve iletkenler arasında bir elektrikselsel iletkenliğe sahip olan malzemelerdir. $10^{-6}\Omega\text{-cm}$ altında elektrikselsel öz dirence sahip metallerin hepsi iyi bir iletkendir. Yalıtkanlar ise yaklaşık $10^6 \Omega\text{-cm}$ ile $10^{12} \Omega\text{-cm}$ aralığında elektrikselsel öz dirence sahiptirler. Yarıiletkenlerin öz dirençleri genellikle $10^{-4} \Omega\text{-cm}$ 'den $10^4 \Omega\text{-cm}$ 'e kadar değişmektedir. Yarıiletkenin öz direnci, malzemenin elektronik özelliklerini değiştirmek için kasıtlı olarak eklenen (dopant) kirlilik olarak adlandırılan safsızlıklardan ciddi bir şekilde etkilemektedir. Öncelikle yarıiletkenin saf ya da asal (intrinsic) durumunu göz önüne alacağız. Malzemede var olan termal enerjinin sonucu olarak elektronlar kovalent bağları koparıp katıda hareket edebilen serbest elektron olurlar ve elektrikselsel iletkenliğe katkıda bulunurlar. Geride kalan kovalent bağlar, hole (boşluk) adı verilen bir elektron boşluğuna sahiptirler. Komşu atomun kovalent bağındaki elektronlar bitişindeki elektron boşluğu olan bir atomun bağına kolaylıkla hareket edebilirler. Bu süreç devam ettikçe boşluğun materyal boyunca hareket ettiğini söyleyebiliriz. Bu boşluklar elektron yükünün büyüklüğüne eşit, bir pozitif yüke sahiptirler ve aynı zamanda elektrikselsel iletkenliğe katkıda bulunurlar. Böylece yarıiletkenlerde elektrikselsel iletkenliğe katkıda bulunan 2 tip hareketli elektrikselsel yük

taşıyıcıları vardır; bunlar serbest elektronlar ve boşluklardır. Elektronlar ve boşluklar eşit sayıda oluşturulduğundan ve eşit sayılarda birleştiklerinden konsantrasyonları eşittir.

Katkılı (extrinsic) yarıiletkenlerde safsızlık atomları, bilinçli olarak elektriksel karakteristikleri değiştirmek için eklenir. Silisyum göz önüne alındığında, herbir silisyum atomu kendi dört valans elektronunu en yakın dört komşusuyla kovalent bağlarla paylaşır. Eğer 5 valans elektronuna sahip fosfor gibi safsızlık atomu, silisyum atomu ile yer değiştiririrse, beş valans eletrondan dördü kovalent bağlar yapar. Ekstra beşinci elektron kovalent bağ yapmaz ve zayıf tutulur. Oda sıcaklığında bu ekstra elektronların neredeyse tamamı kendi ana atomlarından koparak serbest elektron haline gelirler. Bu beş değerlikli katkı atomları böylece yarıiletkende serbest bir elektron oluştururlar ve donör olarak adlandırılırlar. Bu oluşturulan elektronlar; elektron ve boşluk dengesini bozarlar ve böylece boşluklardan daha fazla elektron olur. Bu durum n-tipi yarıiletken olarak adlandırılır ve bu tip yarıiletkenlerde elektronlar çoğunluk taşıyıcılar ve boşluklar azınlık taşıyıcılardır. n-tipi yarıiletkende serbest eletron konsantrasyonu genellikle boşluk konsantrasyonundan oldukça fazladır.

Eğer, 3 valans elektronuna sahip bor gibi safsızlık atomu, silisyum atomu ile yer değiştiririrse, safsızlık atomunun dört valans elektronundan üçü kovalent bağ yapabilir, kovalent bağlardan birinde bir elektron eksik olacaktır. Ancak komşu silisyumdan, silisyuma bağlı bir elektron bu elektron boşluğu içine atlayabilir böylelikle silisyum-silisyum kovalent bağında bir boşluk oluşur. Bu üç değerlikli dopantlar serbest elektronları kabul eden boşluklar oluştururlar ve akseptör (alıcı) olarak adlandırılırlar. Bu ek boşluklar; elektron ve boşluk dengesini bozarlar böylece elektronlardan daha fazla boşluk oluşur. Buna p- tipi yarıiletken denir. Bunlarda, boşluklar çoğunluk taşıyıcılar iken elektronlar ise azınlık taşıyıcılardır. p-tipi yarıiletkende boşluk konsantrasyonu daha fazladır.

2.3. Temel Yarıiletken Materyal Grupları

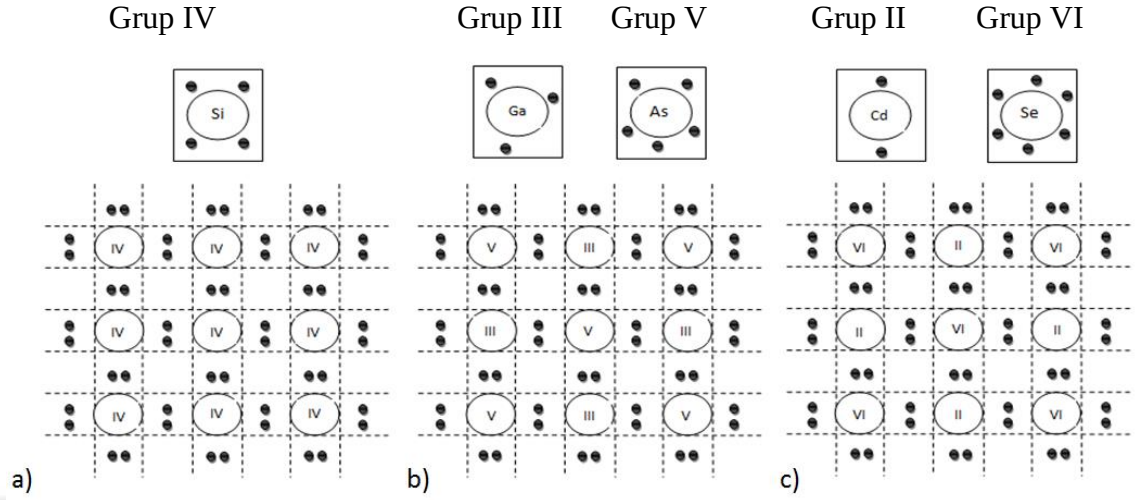
Çoğu yarıiletken malzemeler, atomlarının valans bandına en yakın dört komşu atomunun herbirinin bir elektronunu paylaşarak, sekiz elektrona tamamlamasıyla oluşan atomik bağlar aracılığıyla kristal yapı oluşturulur. Bu malzemeler, valans bandında dört elektrona sahip temel atomlarla birlikte tek bir atom türlerinin oluşturduğu yarıiletkenleri içerir (valans bandını tamamlamak için kovalent bağ yapmış dört komşu atomu tarafından takviye edilmiştir). Bu elementel yarıiletkenlerde, periyodik tablonun IV. grup atomlarının kullanılmasının sebebi budur. Diğer yarıiletken malzemeler iki farklı atomdan oluşur ve bir grup N'den ($N < 4$) diğer grup M'den ($M > 4$) $N + M = 8$ olacak şekilde 8 elektron ile valans bandları doldurulmuştur. Yarıiletken malzemelerin ana kategorileri aşağıdaki bölümlerde özetlenmiştir.

2.3.1. Elemental (IV-IV) yarıiletkenler

Elemental yarıiletkenler, germanyum (Ge), silisyum (Si), karbon (C) ve kalay (Sn) gibi periyodik tablonun IV. grubundaki tek atomlu elementlerden oluşan kristallerdir. Silisyum elektronik yarıiletken malzemelerde çoğunlukla kullanılan ve aynı zamanda Dünya'da en yaygın bulunan elementtir. Çizelge 2.1'de bileşik yarıiletkenlerde kullanılan bazı elementlerin dünya üzerinde oluşan kesri özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Yarıiletkenler için yaygın olarak kullanılan elementlerin dünya üzerinde oluşan kesri

Element	Kesri
Si	0,28
Ga	$1,5 \times 10^{-5}$
As	$1,8 \times 10^{-6}$
Ge	5×10^{-6}
Cd	2×10^{-7}
In	1×10^{-7}



Şekil 2.1. Kristal yarıiletkendeki atomların bağ düzenleri

(a) Elemental yarıiletken (silisyum) (b) III–V grubu bileşik yarıiletken (GaAs), (c) II–VI grubu bileşik yarıiletken (CdSe)

Şekil 2.1 (a) kristalin içindeki her bir IV. grup atomun dört komşu IV grup atomlarıyla bağ yaparak son yörüngelerini sekiz elektrona tamamladığı kovalent bağ yapısını (iki atom son yörüngelerindeki değerlik elektronlarını paylaşır) göstermektedir.

Sadece IV grubu atomik türden oluşturulan yarıiletken kristallere ek olarak, tamamının IV gruptan olduğu iki veya daha fazla atom içeren yarıiletken kristaller de oluşturulabilir. Örneğin Silisyum Karbit (SiC) yüksek sıcaklık uygulamaları için araştırılmıştır. $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ yarıiletkenleri, silisyum sistemleri içinde band aralığı mühendisliğini başarmak için halen daha üzerinde çalışılan malzemedir. Bu durumda; kristalin x kadarlık bir kesri ($0 < x < 1$) silisyum iken $(1-x)$ kadarlık kesrinede germanyum atomları yerleşmiştir. Periyodik tablonun aynı sütununda yer alan iki atomik elementten oluşan yarıiletken ile tek bir atomik elementin yerini alabilme özelliğinin diğer gruplardaki yarıiletkenlerde görülmesi durumu sonraki bölümde tarif edilmiştir.

2.3.2. III-V grubu bileşik yarıiletkenler

Özellikle optoelektronik uygulamalar için III-V grubu yarıiletkenler göze çarpmaktadır. Buna ek olarak dikkate değer bir diğer önemi ise III-V grubu yarıiletkenlerin kablosuz

iletişim gibi elektronik uygulamalarda silisyum yarıiletkenlerden daha hızlı çalışma potansiyeline sahip olmasıdır. Bileşik yarıiletkenler periyodik tablonun farklı gruplarıyla atomik elementlerden oluşan bir kristal örgüye sahiptirler. III-V grubu yarıiletkenler III. gruptan atomik element A ve V. gruptan atomik element B esasına dayanır. Her bir III grubu atomu 4 tane V grubu atomuna bağlanır ve her bir V grubu atomu 4 tane III grubu atomuna bağlanarak şekil 2.1 (b)'de ki genel düzeni oluştururlar. Valans bandının doldurulması için elektronlar ortaklaşa kullanılarak bağlar oluşturulur. Kristalin V grubu atomlarından III grubu atomlarına valans yükünün kayması, kristale iyonik bağ özelliği kazandırmasına rağmen, bağlar çoğunlukla kovalenttir. GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs ve InSb III-V grubu bileşik yarıiletkenlere örnek olarak gösterilebilirler.

GaAs hem optoelektronik hemde yüksek hızlı elektronik cihazlar için kullanılan III-V grubu bileşik yarıiletkenlerin en bilindik örneğidir. Optoelektroniklerde, bir takım yeni aygıtlar oluşturmak ve optik dalga boylarını belirlemek için III–V grubu yarıiletkenlerin üçlü ve dörtlü bileşiklerinin avantajlarından faydalanılmıştır. Üç atomlu yarıiletkenler řu genel formdadırlar: $(A_x, A_{1-x})B$ (örgüde bir tane III grubu atomu yerine 2 tane III grubu atom kullanılarak) veya $A(B_x, B_{1-x})$ (örgüde bir tane V grubu atomu yerine 2 tane V grubu atom kullanılarak). Dört atomlu yarıiletkenler 2 tane III grubu atomik element ve 2 tane V grubu atomik element kullanarak řu genel formda oluşurlar: $(A_x, A'_{1-x})(B_y, B'_{1-y})$. Bu yapılar da $0 \leq x \leq 1$ dir. Böyle üç atomlu ve dört atomlu yarıiletken çeşitlerinde karışım faktörleri (x ve y), V grubu atomik elementin bir tipi ve III grubu atomik elementin bir tipi ile basit birleşik kristallerin bant arasına uzanacak şekilde ayarlanmasına izin vermesi için önemlidir.

Dalga boyunun ayarlanması, $\lambda = hc / E_g$ eşitliğinden faydalanılarak enerjinin ışığın dalga boyu λ ile ilişkili olmasından dolayı, malzemenin belirli optik dalgaboyları için uygun hale gelmesine izin verir. Burada E_g yasak enerji aralığı, h: Planck sabiti ve c: ışık hızıdır.

Çizelge 2.2. Yarıiletken optik kaynaklar ve temsili dalga boyları

Kullanılan Materyal Tabakalar	Dalgaboyu, nm
ZS	454
AlGaInP/GaAs	580
AlGaAs/GaAs	680
GaInAsP/InP	1580
InGaAsSb/GaSb	2200
AlGaSb/InAsSb/GaSb	3900
PbSnTe/PbTe	6000

Çizelge 2.2’de optoelektronik uygulamalarda kullanılabilecek ve farklı çalışmalar için birçok kombinasyona örnek teşkil edecek, yarıiletken lazer örnekleri ve bu yarıiletkenlerin herbiri için temsili optik dalgaboyları verilmiştir.

Çizelge 2.3. $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$ yarıiletkenindeki dalga boyunu ayarlamak için x ’in çeşitliliği

Üçlü Bileşik	Renk
$\text{GaAs}_{0,14}\text{P}_{0,86}$	Sarı
$\text{GaAs}_{0,35}\text{P}_{0,65}$	Turuncu
$\text{GaAs}_{0,6}\text{P}_{0,4}$	Kırmızı

Diğer taraftan Çizelge 2.3 üç atomlu yarıiletkenlerde karışımın ayarlanması ile dalgaboyundaki değişimi göstermektedir (burada görünür spektrumdaki renklere tekabül eder).

Tek elementli elementel yarıiletkenlerin aksine (her bir atomun örgüdeki yerleşim yeri önemli değildir), III-V grubu yarıiletkenler, kristal büyütme süresince çok iyi

stokiyometri kontrolü (yani iki atomik türün oranı) gerektirmektedir. Örneğin her Ga atomu Ga bölgesinde (As bölgesinde değil) durmalıdır ve tam tersi de geçerlidir. Bu veya diğer nedenlerden ötürü yüksek kaliteli III-V grubu yarıiletkenleri büyütmek Si gibi bir elementel yarıiletkeni büyütmekten daha zordur.

2.3.3. II-VI grubu bileşik yarıiletkenler

Bu yarıiletkenler Şekil 2.1 (c)'de gösterildiği gibi her biri diğer türün en yakın 4 komşu atomuna bağlanan, biri grup II'den bir atomik element diğeri ise grup VI'dan bir atomik elementin bir araya gelmesinden oluşurlar. VI grubu atomlarından II grubu atomlara geçen yük miktarının artması, aradaki bağın III-V grubu yarıiletkenlerinkine oranla daha iyonik olmasına sebep olur. II-VI grubu yarıiletkenler III-V grubu yarıiletkenlerindeki gibi iki atomlu ve üç atomlu formlarda oluşturulabilirler. II-VI grubu yarıiletkenleri III-V grubu yarıiletkenlerinden daha az yaygın olmalarına rağmen bazı önemli uygulamalar için vazgeçilmez yarıiletkenlerdir.

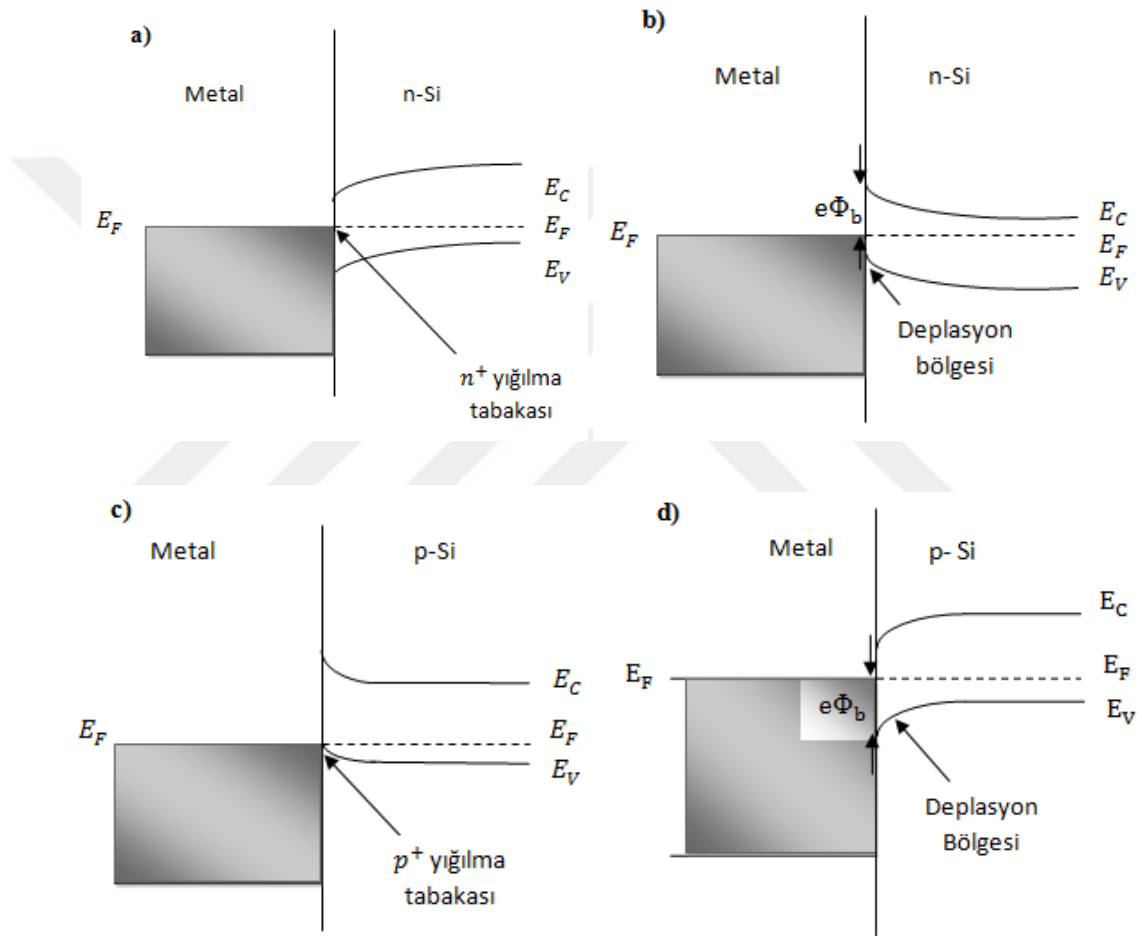
II-VI grubu yarıiletkenlere ZnS, ZnSe ve ZnTe (çinko örgü yapısı formunda) CdS ve CdSe (hem çinko hem wurtzite örgü yapısı formunda) ve CdTe (wurtzite örgü formunda) örnek olarak verilebilir.

2.4. Schottky Diyotlar ve Omik Kontaklar

2.4.1. Metal- yarıiletken kontak tipleri

Benzer olmayan herhangi iki materyal kontak haline getirildiğinde hareketli yüklerde değişim olacaktır. Böylelikle her metal katkılı ya da katkısız yarıiletkenin herhangi bir parçasına göre Fermi seviyeleri eşitleninceye kadar ya yarıiletkene elektron verme ya da yarıiletkenden elektron alma gibi iki kategoriden birinin içine girer. Metalin içine olan akışın çeşitliliği, yarıiletkendeki katkılama konsatrasyonuna ve yarıiletkenin katkılanma tipine göre değişir.

Bir metal ile n-tipi yarıiletkenin temas haline getirilmesi ile ya yığılma bölgesi (aşağıdaki (a) durumu) ya da tükenim bölgesi (aşağıdaki (b) durumu) gibi yarıiletken yüzeyinde iki sonuç ortaya çıkar. Şekil 2.2 (a ve b)'de muhtemel iki durumun enerji seviyelerinin diyagramları gösterilmiştir. Bunların her ikisinde uygulama voltajı olmadığı durum için çizilmiştir.



Şekil 2.2. Enerji seviyesi diyagramları

(a) metalin n- tipi yarıiletken tarafına göre pozitif yüklenmesi (b) negatif yüklü metal bir kontak (c) ve (d) p tipi yarıiletken için aynı durumları göstermektedir

Çoğu kullanışlı metal, n-tipi silisyuma temas ettirildiğinde bir tükenim tabakası oluşturur. Yani enerji seviyesi diyagramı Şekil 2.2 (b)'de gösterildiği gibi olur. Böyle bir temasta akım-voltaj ilişkisi doğrultma şeklindedir ve genellikle Schottky diyot olarak adlandırılırlar. Enerji farkı $e\Phi_b$ genellikle 0.5 eV ve 1.0 eV arasındadır. Bir diğer

enerji seviyesi diyagramı Şekil 2.2 (a)'da ki gibi lineer elektriksel davranış gösterir. Böyle kontaklar omik olarak adlandırılırlar.

p-tipi silisyumlarla kontak haline getirilen bazı metaller, benzer bir şekilde holler için yığılım veya tükenim bölgeleri oluştururlar. Ayrıca genelde yaygın metallerle yüzeyin yakınlarında hollerin tükenimiyle ilgili doğrultucu bir kontak oluştururlar. Bu kontakların uygun enerji seviyesi diyagramları Şekil 2.2 (c) ve Şekil 2.2 (d)'deki gibi olur. Burada *n-tipi* durum için yoğunlaşılacak, akım-voltaj davranışı açıklanacak ve ilk olarak Schottky diyot dikkate alınacaktır.

2.4.2. Schottky diyotlarda akım akışı

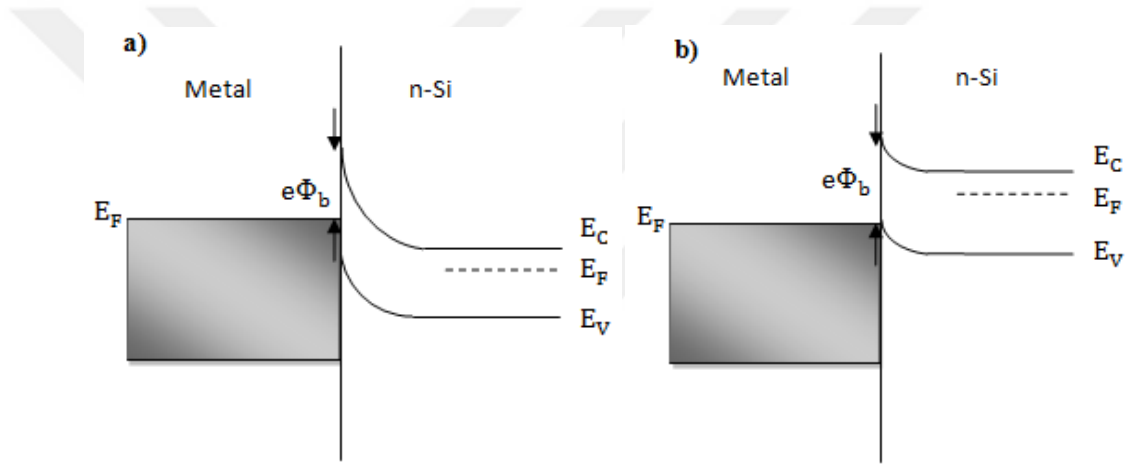
Potansiyel uygulanmadığında, serbest elektronlar eklemden karşılıklı iki yönde Şekil 2.2 (b)'de gösterildiği gibi termal olarak rastgele hareket ederler. Metalden yarıiletkenle geçen elektronlar tarafından taşınan I_R akımı ile yarıiletkenden metale geçen I_F akımı birbirlerini tam olarak dengelerler, yani uygulama voltajının olmadığı durumda net akım $I = I_F - I_R = 0$ olur. Yalnızca en az $(E_F + e\Phi_b)$ kadar enerjisi olan, yani sadece iletkenlik bandı (E_c) enerji seviyesi üzerine çıkabilecek olan elektronların sınırı geçebileceği unutulmamalıdır. Enerji ifadesindeki $e\Phi_b$ değeri düşük enerjili elektronlar için bir engel gibi davranır. Buna Schottky Engeli denir.

Bir potansiyel uygulandığında deplasyon bölgesi en yüksek dirence sahip olduğundan dolayı tıpkı p-n eklemlerde olduğu gibi sadece deplasyon bölgesi boyunca ekstra bir potansiyel fark görülür. Böylelikle uygulama gerilimi Şekil 2.3 (a veya b)'de görüldüğü gibi engelin, iletkenlik bandı sınırı E_c 'nin üstünde veya altında olmasına sebep olur. Bu nedenle bulk yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar tarafından görülen engel yüksekliği uygulanan besleme değişir. Diğer taraftan metalin Fermi seviyesindeki bir elektronun gördüğü $e\Phi_b$ engel yüksekliği değişmez.

Şimdi ters ve düz beslem voltaj durumlarını dikkate alalım. İlk olarak yarıiletkenle göre metale $-V$ potansiyeli uygulayarak ters beslem durumunu göz önüne alalım (Şekil

2.3.a). Metal tarafındaki enerji seviyesi eV cinsinden yarıiletkenlere göre daha yüksektir. Yarıiletkenden metale geçecek olan elektronlar için engel yüksekliği $e(\Phi_b + |V|)$ olacak şekilde arttığı için, bu yönde elektron akışı olmayacaktır.

Bilindiği gibi iletkenlik bandı E_c 'nin üstüne serbest elektronların çıkabilmesi için termal enerjiye ihtiyaçları vardır. Bu yüzden I_F akımı $\exp(-eV/kT)$ ile orantılı olarak azalır ve uygulama voltajının yalnızca birkaç yüz milivoltu ile sıfır uygulama voltajındaki değerinin çok altında bir değere kolaylıkla düşer.



Şekil 2.3. Bir Schottky diyodun enerji diyagramı

(a) ters beslem durumu ve (b) düz beslem durumu

Metalden yarıiletkene akan elektronlar yukarıda verilen sebeple esasen değişmeyen bir engel yüksekliği, $e\Phi_b$ ile karşılaşırlar. Böylece I_R akımı uygulama voltajı ile değişmez ve net akım $I_F - I_R \approx -I_R$ olur. Fakat I_R oldukça küçük bir akımdır çünkü bu akım yalnızca yeterli termal enerji ile ($e\Phi_b$ 'den büyük) engel yüksekliğini geçebilen elektronlardan oluşmaktadır. Elektronların sayısı $\exp(-eV/kT)$ faktörüne bağlıdır ve $\Phi_b = 0,8$ V olduğu zaman bu faktör genellikle 10^{-14} değerine sahiptir. Net akım akışı $I_F - I_R \approx -I_R$ bu yüzden çok küçüktür. Bu değer genelde engel yüksekliği $e\Phi_b$ 'ye bağlıdır ve uygulama voltajından bağımsızdır. Bundan dolayı I_R diyodun ters saturasyon akımı olarak adlandırılır.

Şimdi yarıiletkenle göre metale pozitif voltaj $+V$ uygulama durumunu dikkate alalım. Elde edilen enerji seviyeleri Şekil 2.3 (b)'de gösterilmiştir. Yarıiletkenden metal içine elektronların akması için engel yüksekliği $(\Phi_b - V)$ kadar azalmıştır. Yeterli termal enerji ile metal içindeki engeli geçebilen taşıyıcıların sayısı;

$$\text{Exp}[-e(\Phi_b - V)/kT] = \exp(-e\Phi_b/kT)\exp(eV/kT) \propto \exp(eV/kT) \quad (2.1)$$

ile orantılıdır.

Bundan dolayı akım $I_F \propto \exp(eV/kT)$ büyük ölçüde artar ve diyot boyunca net akım

$$I = I_F - I_R \propto [\exp(eV/kT) - 1] \quad (2.2)$$

olur.

Bu durumda diyot akımı kolayca iletir ve buna p-n eklem diyotta olduğu gibi düz beslem akımı denir. Akım yoğunluğunu temsil eden düz beslem voltaj düşmesi, engel yüksekliği $e\Phi_b$ 'ye bağlıdır. Örneğin n-tipi silisyum ile kontak halindeki alüminyum bir diyot genelde düz beslem voltajında yaklaşık 0,25 V'luk bir düşüşe sahiptir, silisyumdaki katkı konsantrasyonu azaldıkça bu değer daha da azalır.

2.4.3. Schottky diyodun kapasitansı

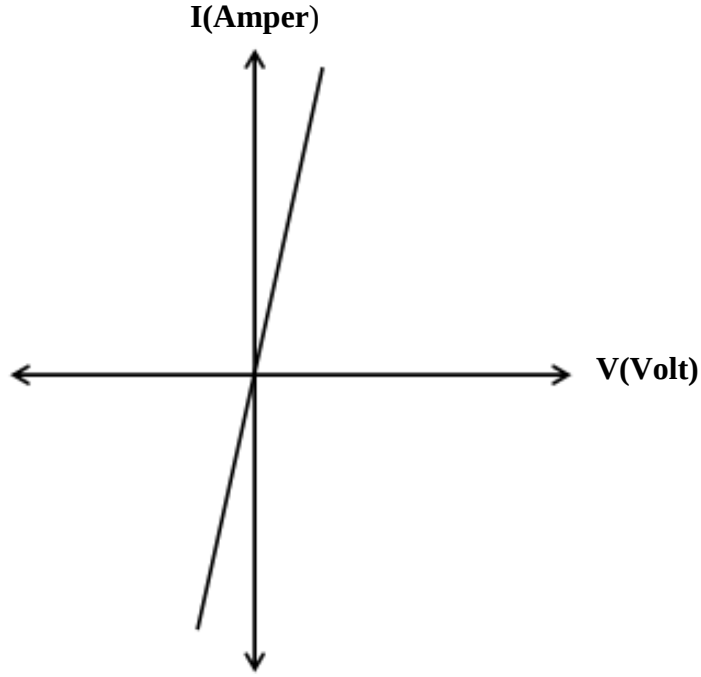
Düz beslem altında metale geçen elektronlar kolaylıkla akabilirler ve hareketli yük birikimi olmaz. Anahtarlama hızı, normal olarak dengedeki değerine göre deplasyon tabaka genişliğindeki değişim hızıyla kontrol edilir. Bu, deplasyon tabakası ile ilişkili olan kapasiteye (eklem kapasitesi) ve seri dirence bağlıdır. Eklem kapasitesi deplasyon tabakasının genişliğiyle küçültülebildiğinden dolayı Schottky diyotlar eklem diyotlardan çok daha hızlı anahtarlama sahiptir. Son olarak elektronların deplasyon bölgesinden geçişiyle belirlenen bir başka limite erişilmiş olunur. Silisyum içindeki elektronlar

yaklaşık 10^5 m/s hızdan daha hızlı hareket edemeyeceğinden dolayı (saturasyon hızı) 1µm kalınlığındaki bir deplasyon bölgesinden minimum geçiş zamanı yaklaşık 10 pikosaniyedir. Deplasyon tabakası genişliğinin artması ile kapasite azalır fakat geçiş zamanı artar ve sonuç olarak anahtarlama hızını sınırlar.

Schottky diyotlar p-n eklem diyotlardan daha hızlı anahtarlanabilmelerine rağmen daha geniş kullanım alanına sahip olmamaları bir merak konusudur. Bunun nedeni bir kovalent bağlı yarıiletken ve bir metal gibi farklı doğal iki materyal arasında mükemmel bir kontak elde edebilmenin uygulamadaki zorluklarına dayanır. Schottky diyotlar bu nedenle çok pahalıdırlar ve ayrıca p-n diyotlardan daha düşük ters kırılma voltajına sahiptirler.

2.4.4. Omik kontaklarda akım

Metal ile yarıiletken arasında iyi bir omik kontak oluşturmak, yüksek performanslı yarıiletken devre elemanlarının fabrikasyonunda oldukça önemli bir işlemdir. Bir yarıiletken devre elemanından elektrik akımını ve gücü verimli bir şekilde çekmek için iyi omik kontaklar gerekir. Genel olarak, bir omik kontak doğru ve ters beslem şartları altında akım-voltaj ilişkisi lineer ve simetrik olan doğrultucu olmayan bir kontak olarak görülür. Fakat gerçekte eğer metal-yarıiletken arayüzey üzerinde düşen voltaj, gövde yarıiletken üzerinde düşen voltajla karşılaştırıldığında küçük ise, bu kontak omik olarak düşünülür. Bir omik kontakta akım lineerdir ve kontak direnci oldukça küçüktür. Yani omik kontakın akım-voltaj ilişkisi Şekil 2.4'deki gibi olmalıdır.



Şekil 2.4. İdeal bir metal-yarıiletken omik kontağın akım-voltaj ilişkisi

Pratikte metallerin büyük bir kısmı yarıiletkenlerle kontak yapmak için kullanılsada bu ideal durum kolaylıkla elde edilemez. Ancak omik kontak sıklıkla farklı yollarla elde edilir. Örneğin; çok ağır katkılanmış silisyum 10 nm'den az kalınlıkta alüminyum ile kontak haline getirildiğinde elektronların tünelleyelediği bir Schottky engeli oluşur. Bu durum elektronların dalga özellikleri ile açıklanabilir. Böylece silisyuma alüminyum metali ile omik kontak yapmak için, yeterince ince bir Schottky engeli oluşturmak için, silikonun bir yüzünde ilave dopantlar ekilerek n^+ veya p^+ bölgeleri oluşturulur. *p-tipi* yarıiletkenle kontak halindeki metaller, yarıiletken içinde elektronların rolünü üstlenen holler düşünülerek yukarıda tartışılan biçimde düşünülebilir. Omik kontaklar her iki yönde akım geçiren düşük dirençli kontaklardır.

2.5. Engel Yüksekliği Ölçüm Teknikleri

Bir Schottky eklem çalışmasına ilişkin en kritik parametre Schottky engel yüksekliği (SBH)'dir. Burada yaygın olarak kullanılan teknikler özetlenmiştir.

I-V Karakteristikleri

Termoiyonik emisyon teorisine göre bir Schottky diyodun akım–voltaj ilişkisi,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

bağlantısıyla verilir. Burada I_0 doyma akımı; e elektronik yük, V uygulanan voltaj, k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık ve n idealite faktörüdür. n bir diyodun ideale ne kadar yakın olduğunu gösteren bir parametredir. Doyma akımı,

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \quad (2.4)$$

bağıntısıyla verilir. Burada A diyodun etkin alanı, A^* Richardson sabiti ve Φ_b engel yüksekliğidir. Eğer (2.4) bağıntısı Φ_b 'ye göre düzenlenirse,

$$\Phi_b = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (2.5)$$

bağıntısı elde edilir ve bu bağıntıdan engel yüksekliği hesaplanabilir.

Düz beslem voltajında I-V karakteristiklerinden elde edilen $\ln I$ -V grafiği lineerdir. Doğrusal değişimin $\ln I$ eksenini kestiği değer doyma akımı I_0 'ı verir ve Richardson sabitinin bilinmesiyle SBH hesaplanabilir. Bu basit bir yöntem olmasına rağmen üç dezavantajı vardır:

1. İletim mekanizması kabul edilmelidir.
2. Richardson sabiti bilinmelidir.
3. Akım yolunun etkin alanından kaynaklanan belirsizlikler bilinmelidir.

C-V Karakteristikleri

Engel yüksekliği aynı zamanda deplasyon bölgesindeki uzay yükünden kaynaklanan kapasitans ölçümleriyle de belirlenebilir. Kapasitans ters beslem voltajı ile ilişkilidir. Eklem kapasitesi,

$$C = \left[\frac{\epsilon_s \epsilon_0 e N_d}{2(V_d + V)} \right]^{1/2} \quad (2.6)$$

bağıntısıyla verilir (Dhruv ve Patel 2016). Burada ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, N_d n-tipi yarıiletkenin donör konsantrasyonu ve V_d difüzyon potansiyelidir. Eğer bu bağıntı kapasitenin karesinin tersine göre düzenlenirse,

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{e N_d \epsilon_s \epsilon_0} (V_d + V) \quad (2.7)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntıya göre $\frac{1}{C^2} - V$ grafiği lineer olmalıdır ve voltaj eksenini kestiği nokta V_d difüzyon potansiyelini vermelidir. Yine bu doğrunun eğiminden yarıiletkenin donör konsantrasyonu N_d hesaplanabilir. Schottky diodun engel yüksekliği

$$\Phi_b = E_F + V_d \quad (2.8)$$

bağıntısıyla verilir.

C-V yönteminin dezavantajları:

1. (2.7) denklemindeki deplasyon yaklaşımı varsayımı
2. Derin seviye tuzakları ve arayüzey durumları gibi istenmeyen kirliliklerin ölçüm frekanslarına dahil edilmesi.

Fotoemisyon spektroskopisi (FES)

Fotoemisyon yoluyla ince metal filmler altındaki yarıiletkenlerde iç seviyelerindeki kaymalar, SBH ölçümleri için ayrıca bir prob olarak da kullanılabilir. FES, yarıiletken yüzeyinde biriken metal tabakaların fonksiyonu olarak bant bükülmelerini incelemek için eşsiz bir olanak sunmaktadır. Monokromatik X-ışınları iç elektronları metal içerisine geçebilecek kadar yeterince yüksek enerji durumlara uyarabilirler. FES'den elde edilen SBH yorumlanması ile ilgili dezavantajlar; bölgesel elektron-boşluk çiftleri yoğun ışık radyasyonu üretebilir, izole edilmiş metal kümeler ve banttaki bükülmeler önemli değişikliklere neden olabilir ve ayrıca bu hassas yüzey tekniği, yüzey potansiyellerinin etkilerini içerebilir şeklinde sıralanabilir.

İç Fotoemisyon

İç fotoemisyon tekniğinde metal içerisindeki elektronları ışıkla uyarmak için, ayarlanabilir monokromatik ışık kullanılır. Eğer uyarılmış elektronlar SBH'ı aşmak için yeterli kinetik enerjiye sahip iseler, elektronlar yarıiletkenin içerisine difüze olurlar ve deplasyon bölgesi içindeki çok güçlü elektrik alandan dolayı net bir fotoakım oluştururlar. Klasik yarıiletkenler de arayüzeydeki elektrik alan 10^4 - 10^5 Vcm⁻¹ mertebesinde ve fotoemisyonla elde edilen taşıyıcıların fazla olmasından dolayı herhangi bir dış voltaj uygulanmadan akım oluşturabilir. SBH, fotoverim Y ve normalize edilmiş ışıkla uyarılan elektron yoğunluğu ile $h\nu$ foton enerjisi arasında bir bağlantı olduğunu söyleyen Fowler ilişkisi kullanılarak hesaplanır.

$$Y \propto (h\nu - \Phi_{SB})^2 \quad (2.9)$$

(2.9) denkleminde $\sqrt{Y}$ 'ye karşı $h\nu$ grafiği lineer bir bağımlılık gösterir ve apsisten tahmin edilen değer SBH'dır.

2.6. Norde Metodu

Schottky diyotların engel yüksekliği (Φ_b), idealite faktörü (n) ve seri direnç (R_s) gibi önemli parametreleri deneysel I-V ve C-V grafikleri kullanılarak hesaplanabilir. Bu parametrelerin tayin edilmesi için yeni yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan biri de Norde tarafından $n=1$ durumu için seri direnç ve engel yüksekliğini tanımlayan, $F(V)$ fonksiyonudur. Bu yöntem seri direnç ve engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişmediği durumlarda uygulanmaktadır ve bunun için bir sıcaklık değerinde I-V grafiğinin olması yeterlidir.

Sato ve Yasamura, Norde tarafından sunulan yöntemi geliştirerek idealite faktörünün 1'den büyük olduğu durumlarda da ($1 < n < 2$) n , R_s ve Φ_b değerlerinin hesaplanabileceğini göstermişlerdir. Bu yöntem de R_s ve Φ_b 'nin sıcaklığın değiştiği durumlarda da uygulanabileceğinden en az iki farklı sıcaklıktaki I-V eğrisine ihtiyaç vardır. Benzer yöntem Mc Lean tarafından da belirtilmiştir (Sato ve Yasamura 1985).

Termoionik emisyon teorisine göre Schottky diyotların düz beslem altındaki akım-gerilim ilişkisi;

$$I = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV_0}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.10)$$

şeklindedir. Burada ilk çarpan I_0 doyma akımı, V_0 ise engel tabakası boyunca gerilim düşmesidir. Pratik olarak Schottky diyotları düz beslem akım-gerilim karakteristiklerinde ideal durumlardan bazı sapmalar gösterebilir ($n > 1$ gibi). Bundan dolayı eşitlik 2.10'daki akım ifadesi;

$$I = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV_0}{nkT}\right) \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{eV_0}{kT}\right) \right] \quad (2.11)$$

şeklini alır. Burada $\left[\exp\left(-\frac{eV_0}{kT}\right) \right] \ll 1$ durumu göz önüne alınırsa ve Schottky diyoduna uygulanan V geriliminin bir kısmının seri direnç üzerine $V_0 = V - IR_s$ şeklinde düşeceği düşünülürse 2.11 ifadesi;

$$I = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT}\right) \right] \quad (2.12)$$

şeklinde yeniden düzenlenebilir. Burada V dışardan uygulanan gerilimi, R_s de seri direnci göstermektedir.

Termoiyonik emisyon teorisi sadece diyodun düz beslem I-V karakteristiğinin lineer bölgesinde kullanılır. Yüksek seri direnç nedeniyle lineer bölge $kT/e \ll V \ll IR_s$ aralığıyla sınırlanır ve daralma gösterir. Bu durumda $\ln(I)$ - V grafiğinin değerlendirilmesi daha karışık bir hal alır ve bu bölgede doyma akımı I_0 ve engel yüksekliği (Φ_b) değeri güvenilir olarak hesaplanamaz. R_s , Φ_b ve n değerlerini hesaplamak için daha güvenilir metodlar mevcuttur. İlk olarak Norde tarafından sunulan fonksiyon aşağıdadır.

$$F(V) = \frac{V}{2} - \left(\frac{kT}{e}\right) \ln\left(\frac{I(V)}{AA^* T^2}\right) \quad (2.13)$$

Bu $F(V)$ fonksiyonu yardımıyla $n = 1$ için, R_s ve Φ_b 'nin hesaplanmasına çalışılmıştır.

Bu yöntemde R_s , Φ_b 'nin sıcaklıkla değişmediği durumlarda geçerli olduğundan tek bir I-V eğrisine ihtiyaç vardır. Eşitlik 2.10'un her iki tarafının $\ln$ 'i alınıp eşitlik 2.11'de yerine yazıldığında,

$$F(V) = \left(\frac{n-2}{2n}\right) V + \left(\frac{IR_s}{n}\right) + \Phi_b \quad (2.14)$$

elde edilir. Burada $R_s=0$ ideal durumu için $F(V)$ - V grafiğinin eğimi $(n-2/2n)$ olan bir doğrudur ve $F(V)$ eksenini $V=0$ 'da kestiği nokta Φ_b 'yi verir. Bu arada seri direnç sıfırdan farklı ise $F(V)$ fonksiyonu bir minimumda geçer ve

$$F(V) = \frac{V}{2} - \left(\frac{kT}{e}\right) \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2 R_s}\right) \quad (2.15)$$

şeklinde verilebilir. Eşitlik 2.15'in V 'ye göre türevi alınıp düzenlenirse,

$$\frac{\partial F(V)}{\partial V} = \frac{1}{2} \left[\frac{n-2}{2} + \frac{\beta I R_s}{n + \beta I R_s} \right] = \frac{n-2 + \beta I R_s}{2(n + \beta I R_s)} \quad (2.16)$$

olur. $(1/\beta = kT/e)$ ve $\partial F(V)/\partial V = 0$ şartında $F(V)$ bir minimumdan geçer. Minimumdan geçen akım I_{oi} , gerilim değeri ise V_{oi} 'dir. Burada

$$\frac{n-2 + \beta I_{oi} R_{si}}{2(n + \beta I_{oi} R_{si})} = 0 \quad (2.17a)$$

$$n - 2 + \beta I_{oi} R_{si} = 0 \quad (2.17b)$$

yazılır. Burada R_{si} ve Φ_b için sırasıyla

$$R_{si} = \frac{(2-n) kT}{I_{oi} e} \quad (2.18)$$

$$\Phi_b = F(V_{oi}, \gamma) + \left(\frac{2-n}{n}\right) V_{oi} - \left(\frac{2-n}{n}\right) \frac{1}{\beta_i} = F(V_{oi}) + \left(\frac{2-n}{2n}\right) \left(\frac{V_{oi}}{2} - \frac{kT_i}{e}\right) \quad (2.19)$$

eşitlikleri çıkarılır. Burada R_{si} , β_i , V_{oi} ve I_{oi} ($i = 1, 2, \dots, n$) farklı sıcaklıklara karşılık gelen değerlerdir. K. E. Bohlin ise Schottky engel diyodunun I-V ölçümünden elde edilen R_s , Φ_b ve n değerlerinin belirlenmesini mümkün kılan iki farklı fonksiyon tanımlamıştır (Bohlin 1986). Norde fonksiyonun ilk terimi olan $V/2$ yerine V/γ terimi

kullanmıştır. Buradaki γ idealite faktöründen büyük ($\gamma > n$) bir sabittir. Bu durumda Norde fonksiyonu

$$F(V, \gamma) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \left[\ln \left(\frac{I(V)}{AA^* T^2} \right) \right] \quad (2.20)$$

şeklinde yazılır. Yine eşitlik 2.10'da her iki tarafın ln'i alınırsa

$$F(V, \gamma) = \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n} \right) V + \Phi_b + \frac{IR_s}{n} \quad (2.21)$$

eşitliği elde edilir. İdeal diyotta seri direncin sıfır olduğu düşünülürse $F(V, \gamma)$ 'nin V 'ye bağlı grafiği, eğimi $(n-\gamma)/\gamma$ olan bir doğru olur ama seri direnç varsa bu fonksiyon,

$$F(V, \gamma) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \left[\ln \left(\frac{I(V)}{R_s AA^* T^2} \right) \right] \quad (2.22)$$

biçiminde olur. Yüksek voltaj değerleri için bu fonksiyon; eğimi $1/\gamma$ olan bir doğruya yaklaşır. γ değeri n 'den büyük olduğu sürece fonksiyon kesikli olarak bir minimumdan geçer. $F(V, \gamma)$ fonksiyonun V 'ye göre türevini alıp minimum noktada sıfıra eşitlediğimizde,

$$I_0 = \frac{\gamma - n}{\beta R_s} \quad (2.23)$$

eşitliği elde edilir. Burada ki I_0 ve V_0 değeri minimum noktadaki akım ve gerilim değerleridir. Sonuç olarak engel yüksekliği ve seri direnç ifadeleri

$$\Phi_b = F(V_0, \gamma) + \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{\gamma} \right) V_0 - \left(\frac{\gamma - n}{\beta n} \right) \quad (2.24)$$

$$R_s = \left(\frac{\gamma - n}{\beta I_0} \right) \quad (2.25)$$

Şekil 2.5’de görüldüğü gibi bazı bölgelerde engel yüksekliği ortalama engel yüksekliği değerinden $\Delta\Phi$ kadar bir sapma göstermektedir.

Song ve arkadaşları ve aynı zamanda Werner ve Güttler, görünür engel yüksekliği değeri için bir teori kullandılar (Cimilli vd. 2009). Bu teoride (σ_s) standart sapma ve (Φ_b) ortalama değeri ($\overline{\Phi_b}$) engel yüksekliğinin bir Gaussian dağılıma sahip olduğunu kabul etmişlerdir ve aşağıdaki gibi ifade etmişlerdir.

$$P(\Phi) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\Phi_b - \overline{\Phi_b})^2}{2\sigma_s^2} \right] \quad (2.26)$$

Buradan, ortalama engel yüksekliği ve engel yüksekliğinin standart sapmasının karesi σ_s^2 , uygulama potansiyeline lineer bağılılıkları kabul edilerek aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$\overline{\Phi_b} = \overline{\Phi_{b0}} + \rho_2 V \quad (2.27)$$

$$\sigma_s^2 = \sigma_{s0}^2 + \rho_3 V \quad (2.28)$$

Düz beslem potansiyeline bağlı toplam akım, aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$I(V) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\Phi_b, V) P(\Phi_b) d\Phi \quad (2.29)$$

Burada ρ_2 ve ρ_3 voltaj katsayılarıdır. İntegral almak suretiyle aşağıdaki ifade elde edilir.

$$I(V) = AA^* T^2 \exp \left[-\frac{e}{kT} \left(\overline{\Phi_b} - \frac{e\sigma_s^2}{2kT} \right) \right] \exp \left(\frac{eV}{n_{ap} kT} \right) \left[1 - \exp \left(\frac{eV}{kT} \right) \right] \quad (2.30)$$

Ayrıca ters beslem akımı,

$$I_s = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_{ap}}{kT}\right) \quad (2.31)$$

ile verilir ve Φ_{ap} , n_{ap} sırasıyla görünür engel yüksekliği ve görünür idealite faktörü olup,

$$\Phi_{ap} = \bar{\Phi}_{b0} - \frac{e\sigma_{s0}^2}{2kT} \quad (2.32)$$

$$\frac{1}{n_{ap}(T)} - 1 = -\rho_1(T) = -\rho_2 + \frac{e\rho_3}{2kT} \quad (2.33)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Eşitlik (2.31) ve (2.32) birleştirilerek,

$$\ln\left(\frac{I_s}{T^2}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{e\sigma_{s0}}{kT}\right)^2 = \ln(AA^*) - \frac{e\bar{\Phi}_{b0}}{kT} \quad (2.34)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (2.34)'de görüldüğü gibi sıfır beslem engel yüksekliğinin sıcaklıkla azalmasına engel yüksekliğinin Gaussian dağılımının neden olduğu görülmektedir. Engel yüksekliğinin standart sapmasının (σ) engel inhomojenliğinin bir ölçüsü olduğu ortaya çıkmaktadır (Cimilli vd. 2009).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. n-GaAs Kristalinin Kimyasal Olarak Temizlenmesi

n-GaAs yarıiletkeni üzerine omik ve Schottky kontaklar yapılmadan önce aşağıdaki kimyasal temizleme işlemleri uygulanmıştır.

- 1) Trikloretillen ile 5 dakika ultrasonik banyoda temizlendi
- 2) Aseton ile 5 dakika ultrasonik banyoda temizlendi
- 3) Metanol ile 5 dakika ultrasonik banyoda temizlendi
- 4) Deiyonize suyla yıkandı
- 5) (5:1:1) oranında hazırlanmış H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O çözeltisinde 1 dakika bekletildi
- 6) Tekrar Deiyonize suyla yıkandı
- 7) Azot gazı (N_2) ile iyice kurutuldu

Böylece n- GaAs yarıiletkeni kimyasal olarak temizlenmiş oldu.

3.2. n-GaAs Kristaline Omik Kontak Yapılması

n-GaAs kristalinin kimyasal olarak temizlenme işleminden sonra vakum ortamında omik kontak yapım işlemine geçildi. Bunun için önce %99,99 saflıktaki indiyum metali %10'luk seyreltilmiş HF içerisinde 30 sn bekletilip ardından deiyonize su ile yıkayıp azot gazı ile kurutulduktan sonra vakum odası içerisindeki molibden ısıtıcıya yerleştirildi. Molibden ısıtıcı için de aynı işlemler gerçekleştirildi. Molibden ısıtıcı üzerine yerleştirilen kristalin yüzeyinin ısıtıcının sıcaklığından etkilenerek oksitlenmemesi için, kristal vakum odası içerisinde mat tarafı aşağıya bakacak şekilde uygun yükseklikte tutuldu. Buharlaştırma esnasında yarıiletkenin parlak yüzeyinin indiyum atomlarından etkilenmemesi için üzerine cam lamel yerleştirildi. Gerekli önlemler alındıktan sonra chamber vakuma alındı ve ortam basıncı 10^{-5} torr değerine ulaşınca kadar beklendi. Bu işlem devam ederken tavlama işleminde kullanılacak

quartz kayık, aseton ve metanolde ultrasonik olarak temizlendi ve ardından deiyonize sudan geçirildi. Tavlama fırını, yarıiletken malzeme için gerekli olan 380 °C sıcaklığa ayarlandı ve dengeye ulaşması için beklendi. Vakum ortamı gerekli basınç değerine ulaşınca ısıtıcı üzerinden akım geçirilerek kaplama işlemi gerçekleştirildi. Kaplama işleminin tamamlanmasının ardından In/n- GaAs eklemi önceden ısıtılan tavlama fırınına uygun şekilde yerleştirilerek 3 dakika tavlandı. Numunemize tavlama işlemi uygulanırken ortama azot gazı verilerek oksitlenmenin önüne geçildi. Bu işlemler sonunda omik kontak elde edilmiş oldu. Elde edilen omik kontaklı n-GaAs yarıiletkeni çalışmamıza uygun büyüklüklerde elmas kesici ile parçalara ayrıldı. Ardından bu parçaların omik yüzeylerinin SILAR yöntemi ile yapılacak büyütme işleminde CuS ile kaplanması ihtimaline karşı kontak yüzeyleri wax ile kaplandı. Şekil 3.1’de tavlama fırını ve Şekil 3.2’de metal buharlaştırma işlemlerinin yapıldığı kaplama ünitesi gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Tavlama fırını



Şekil 3.2. Metal buharlaştırma işlemlerinin yapıldığı kaplama ünitesi

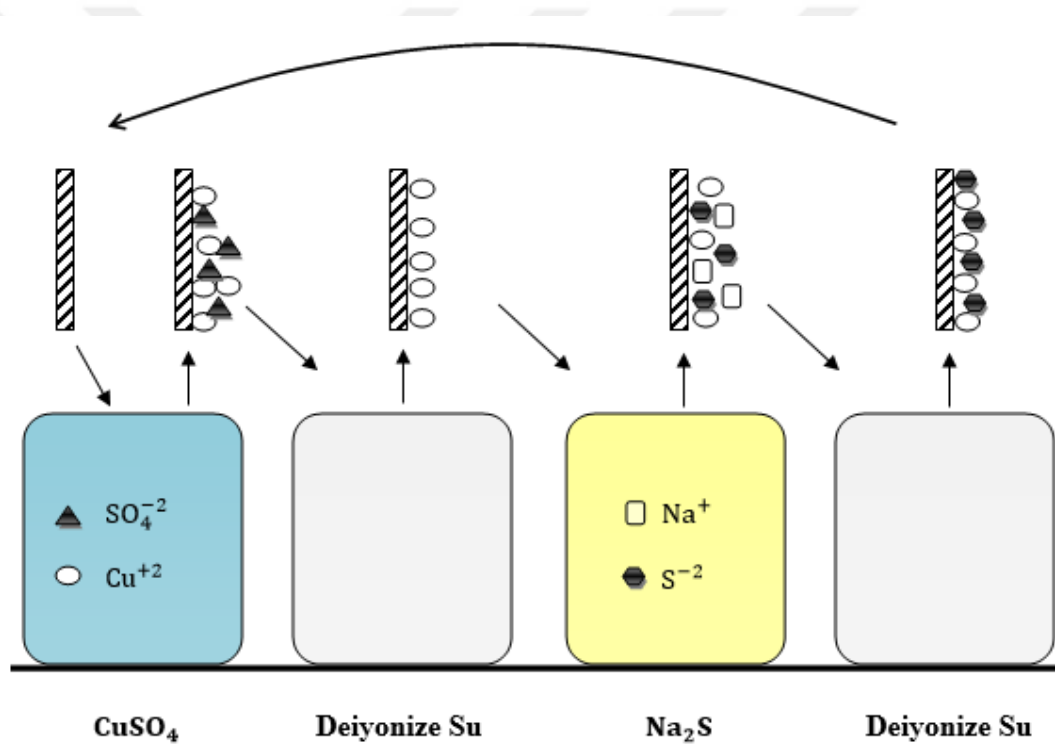
3.3. CuS İnce Filminin SILAR Metoduyla Yarıiletken Üzerinde Elde Edilmesi

Bu çalışmada SILAR yöntemi ile CuS (Bakır Sülfür) ince filmleri, yüzeysel, yapısal ve optik ölçümlerde kullanılmak üzere cam ve elektriksel ölçümler içinde yarıiletken altlıklar üzerine büyütülmüştür. Büyütme işleminde bakır iyonlarını elde edebilmek için 50 ml 0,2M CuSO₄ (Bakır Sülfat) çözeltisi ve sülfür iyonlarını elde edebilmek için de 50 ml 0,05M Na₂S (Sodyum Sülfür) çözeltisi kullanılmıştır.

Cam ve yarıiletken altlıklar özel proseslerden geçirilerek temizleme işlemleri yapıldı. Film büyütme işlemlerine geçmeden önce cam ve yarıiletken altlıklar üzerindeki muhtemel oksitleri uzaklaştırmak için, altlıklar %10'luk seyreltilmiş HF çözeltisinden geçirilmiştir ve deiyonize su ile iyice durulanarak azot gazı ile kurutulmuştur.

Cam ve yarıiletken altlıklar üzerine büyütülecek ince filmler için kullanılacak çözeltiler uygun molarite ve miktarlarda hazırlanarak SILAR işlemine başlandı. İlk adımda altlığımız CuSO₄ çözeltisine daldırılarak yüzey üzerinde bakır (Cu⁺²) ve az miktarda

sülfat (SO_4^{-2}) iyonlarının yüzeyde toplanması sağlandı. Daha sonra deiyonize su içerisinde altlık çalkalanarak zayıf bağlı Cu^{+2} ve SO_4^{-2} iyonlarının yüzeyden ayrılması sağlandı. Ardından altlık Na_2S çözeltisine daldırılarak altlık üzerinde biriken Cu^{+2} iyonlarıyla çözeltideki S^{-2} iyonlarının tepkimeye girmesi sağlandı. Son olarak altlık deiyonize su içerisinde tekrar çalkalanarak reaksiyona girmemiş zayıf bağlı iyonlar yüzeyden uzaklaştırıldı. Bu işlemler bir SILAR döngüsü olarak bilinmektedir. Tekrarlanan döngülerle altlık yüzeyinde homojen olarak kaplanmış ve istenilen kalınlıkta CuS ince filmi elde edildi. Bu işlemler Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. n-GaAs yarıiletken ve cam altlık üzerine SILAR tekniği ile CuS ince filminin büyütülme şeması

20 döngü sonucunda CuS ince filmler taban malzemeler üzerinde homojen olarak elde edilmiştir. Döngü sayıları artırıldığında büyüyen filmin homojenliğinin kaybolduğu ve taban malzeme yüzeyinden bölgesel ayrılmaların oluştuğu gözlemlenmiştir. Film büyütme parametreleri denemelerle elde edilmiştir. CuSO_4 ve Na_2S çözeltilerine daldırma süresi 20 sn, deiyonize suda çalkalama süresi de 40 sn olarak belirlenmiştir.

3.4. Cu/CuS/n-GaAs/In Yapının Elektriksel Karakterizasyonu

Omik kontakın elde edilmesi ve CuS ince filminin n-GaAs yarıiletken malzeme üzerine büyütülmesinden sonra Schottky kontak alanlarının belirlenmesi için CuS ince filmi üzerine Cu buharlaştırılması işlemine geçildi. Bunun için önce yüksek saflıktaki Cu metali %10'luk seyreltilmiş HF çözeltisinden daha sonra deiyonize sudan geçirilerek azot gazı ile hızlı bir şekilde kurutularak temizlendi. Kontak çapı 1 mm olan dairesel maske üzerine CuS ince filmi gelecek şekilde numune yerleştirildi. Temizlenen bakır metali de ısıtıcı üzerine yerleştirilerek kaplama ünitesi vakuma alındı. Ortam basıncı 10^{-5} torr değerine ulaşıncaya kadar beklendi. İstenilen basınç değerine ulaşıldığında ısıtıcıya akım verilerek Cu metalinin buharlaştırma işlemi yapıldı. Yapılan işlemler sonucunda Cu/CuS/n-GaAs/In yapısı elde edilmiş oldu.

Elde edilen Cu/CuS/n-GaAs/In yapının 100 K, 200 K ve 300 K sıcaklıklarda “KEİTHLEY 487 Picoammeter/ Voltage Source” cihazı kullanılarak I-V, “HEWLET PACKART 4192 A, (50 Hz-13 MHz) LF IMPEDENCE ANALYZER” cihazı kullanılarak da C-V ölçüleri alındı. Bu ölçümler sonucunda elde edilen datalar kullanılarak yapının idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnci gibi karakteristik parametreleri numune sıcaklığına bağlı olarak hesaplandı. Kullandığımız ölçüm sistemi Şekil 3.4’de görülmektedir.



Şekil 3.4. I-V ve C-V ölçümlerinin alındığı sistemler.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Giriş

Bu kısımda CuS ince filminin yapısal, yüzeysel ve optiksel özellikleri ve Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapının I-V ve C-V ölçümlerinden elde edilen karakteristik diyot parametreleri ve bu parametrelere ait grafikler yer almaktadır.

Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapının I-V karakteristikleri 100 K, 200 K, 300 K sıcaklık değerlerinde (-1)V – (+2)V aralığında “Keithly 487 Picoammeter/ Voltage Source” cihazı ile ölçüldü. Daha sonra bu yapının “Hewlet Packart 4192 A, (50 kHz-13 MHz) LF İmpedence Analyzer” cihazı ile (-2)V – (+2)V aralığında, oda sıcaklığında 50 kHz 100 kHz, 200kHz, 300 kHz, 500 kHz ve 1 MHz frekans değerlerinde ve sıcaklığa bağlı olarak (100 K ve 200 K de) 500 kHz frekans değerinde C-V ölçümleri alındı.

4.2. CuS ince filmlerin Soğurma, XRD ve SEM Analizleri

Cam altlık üzerine SILAR yöntemi kullanılarak büyütülen CuS ince filminin soğurma ölçümlerinden filmin yasak enerji aralığı hesaplandı. Daha sonra n-GaAs yarıiletken altlık üzerine büyütülen CuS ince filminin XRD ölçümleri ve SEM görüntüleri kullanılarak filmlerin yüzeysel ve yapısal özellikleri incelendi.

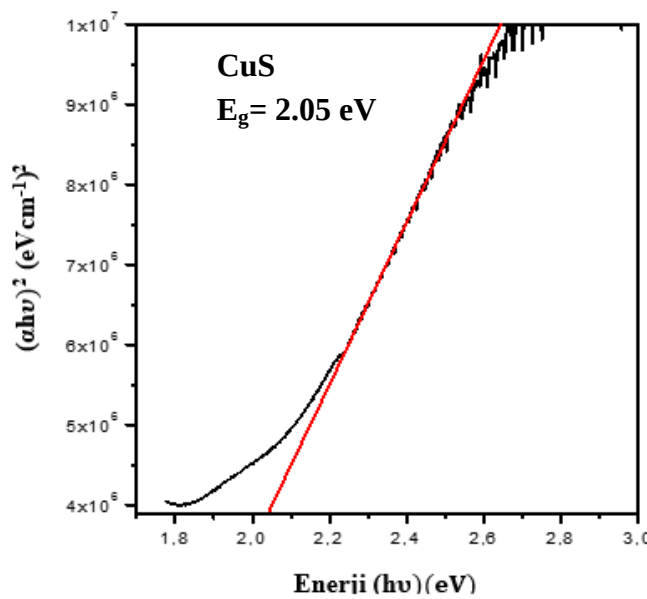
Optik soğurma teorisi; direkt geçişli yarıiletkenler için, soğurma katsayısı ile foton enerjisi arasındaki ilişkiyi

$$\alpha = \frac{A}{hv} (hv - E_g)^n \quad (4.1)$$

şeklinde vermektedir (Sağlam ve Güzeldir 2016). Bu bağıntıda A bir sabit, E_g optik yasak enerji aralığı ve n sırasıyla müsadeli direkt, müsadeli indirekt, yasaklanmış direkt

ve yasaklanmış indirekt geçişler için $\frac{1}{2}$, 2, $\frac{3}{2}$ ve 3 değerlerini alan bir parametredir. Bu bağıntıdan yararlanarak CuS ince filminin yasak enerji aralığı hesaplanabilir.

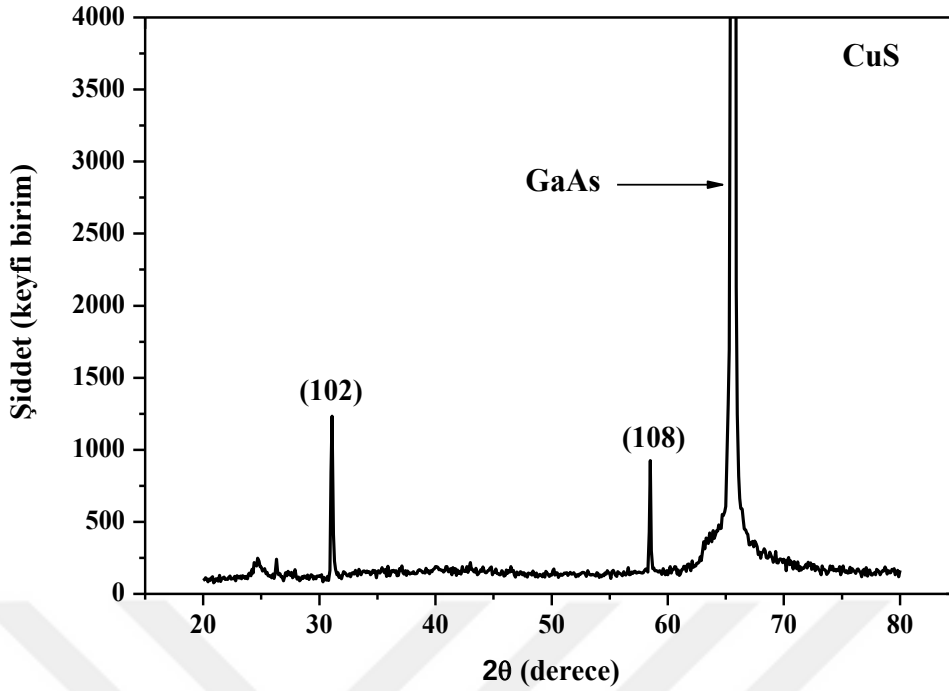
Bir görünür/morötesi ışık demeti kararlı şartlar altında bir numune ve bir referans numune üzerine eř zamanlı olarak düşürülür. Numunenin diğer yüzeyine iletilen ışık bir spektrometre yardımıyla bir fotodedektör ile kaydedilir ve bunun referans numuneye göre şiddeti dalga boyunun fonksiyonu olarak çizilir (Güzeldir 2011). CuS ince filminin yasak enerji aralığını belirlemek için $\pm 0,3$ nm hassasiyete sahip ve çalışma aralığı 190-1100 nm olan Perkin Elmer UV/VS Lambda 2S spektrometresi ile optik soğurma ölçümleri alındı. Denklem (4.1)’den yararlanarak, $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafiği çizildi ve grafiğin doğrusal kısmına yapılan doğrusal fitin enerji eksenini keştiği noktadan faydalanılarak CuS ince filminin yasak enerji aralığı değeri 2,05 eV olarak belirlendi. Çizilen $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafiği şekil 4.1’de gösterilmiştir. Literatürde CuS ince filmi için rapor edilen yasak enerji aralığı değerleri 1,2–3,9 eV aralığında değişmektedir (Sanganmesha 2013). Ayrıca Castillo ve arkadaşları yapmış oldukları araştırma sonucu CuS ince filmi için yasak enerji aralığı değerlerini 1.65-2.6 eV olarak bulmuşlardır (Castillo vd. 2017). Dolayısıyla elde edilen değer literatürle uyumludur. CuS ince filmi için elde edilen farklı yasak enerji aralığı değerleri stokiyometriye bağlı olarak değerlendirilebilir.



şekil 4.1. Cam altlık üzerine büyütülen CuS ince filminin soğurma spektrumu

XRD metodu kristal yapı tayininde kullanılan güçlü ve zararsız bir metoddur. Bu method yapı, faz, tercihli kristal yönelimi ve kristal kusurları ile ilgili önemli bilgiler verir. λ dalga boylu bir monokromatik X-ışını demeti θ açısıyla d örgü sabitli bir kristal üzerine düştüğü zaman, X-ışını kırınım pikleri, özel açılarda örgü düzlemlerinin her bir takımından saçılan monokromatik demetin yapıcı girişimiyle oluşurlar. Yapıcı girişim şartı Bragg kanunuyla verilmektedir. Bragg kanununa göre bu şart polikristal malzemelerde farklı d aralıklarıyla sağlanır (açı değiştirilerek). Meydana gelen difraksiyon piklerinin yoğunluklarının açısız pozisyonlara göre grafikleri çizildiğinde malzemenin yapısal karakteristikleri ortaya çıkmış olur.

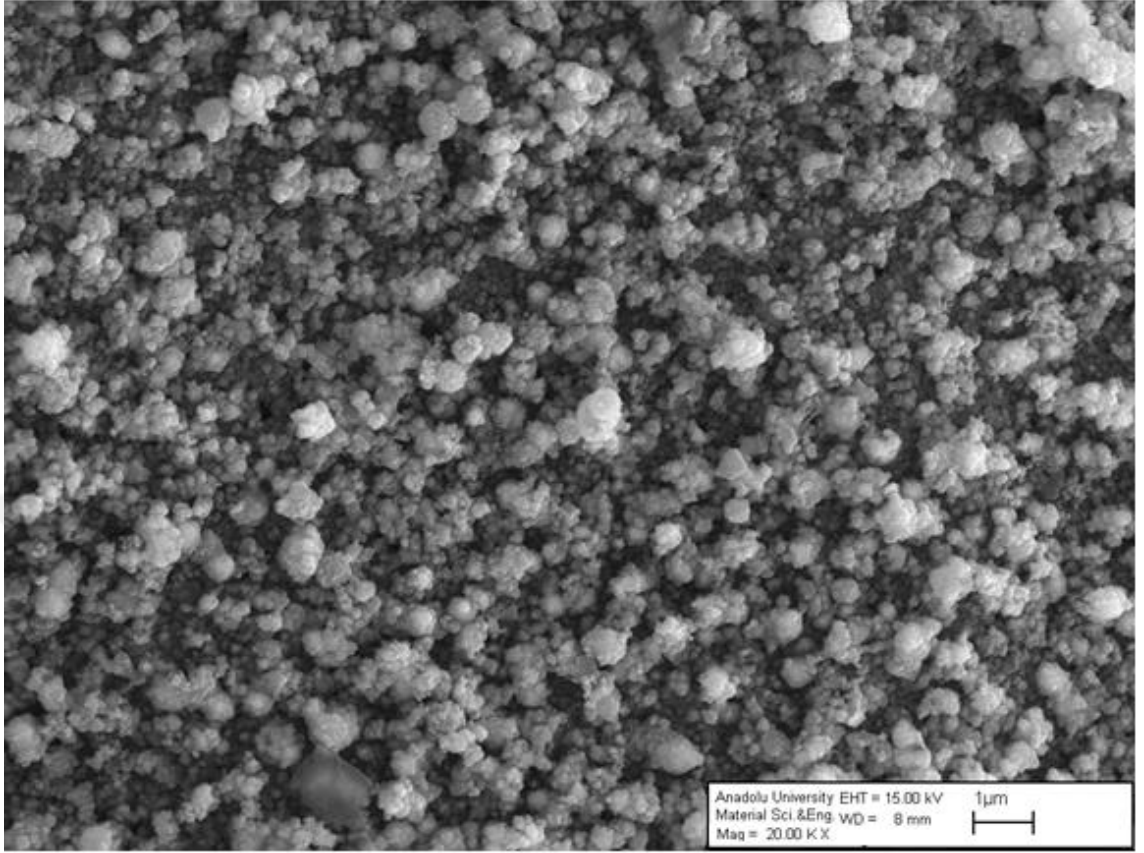
Rigaku MiniFlex XRD sistemi ile SILAR yöntemi kullanılarak n-GaAs altlık üzerine büyütülen CuS ince filminin XRD ölçümleri 1.54 Å dalga boylu Cu-K α kaynak yardımıyla ve 0.1 derecelik açılarla 20-80 derece arasında 45 kV çalışma voltajı ve 40 mA çalışma akımında alınmıştır. Bu ölçümler sonucu oluşan XRD desenleri Şekil 4.2’de verilmiştir. Bu grafikten filmin polikristal yapıda olduğunu gösteren iyi tanımlanmış keskin kırınım pikleri görülmektedir. Grafikte n-GaAs’a ait olan (100) düzlemi açıkça görülmektedir ve bu düzleme ait olan pikin yoğunluğu diğer piklere göre oldukça baskındır. CuS film (102) ve (108) atomik düzlemlerine karşılık gelen iki tercihli yönelimle hekzagonal yapıda oluşmuştur ve bu sonuç standart değerlerle uyumludur (JCPDS Card no.060464) (Sağlam ve Güzeldir, 2016). XRD grafiğinde CuO ve/veya Cu₂S’ye karşılık gelen difraksiyon piklerinin olmaması, büyütülen filmde herhangi bir muhtemel kirliliğin olmadığını göstermektedir. Bu da saf CuS ince filminin SILAR metoduyla kolayca büyütülebileceğini ifade etmektedir.



Şekil 4.2. n-GaAs altlık üzerinde büyütülmüş CuS ince filmin XRD deseni.

n-GaAs altlık üzerine SILAR yöntemi kullanılarak büyütülen CuS ince filmin yüzey özelliklerini incelemek amacıyla filmin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüsü alınmıştır. SEM ince filmlerin yüzey morfolojisini incelemek için iyi bir tekniktir. Bu teknik parçacık büyüklüğü, şekli ve büyütmeyle ilgili önemli bilgiler verebilir.

SEM’de görüntü oluşumu temel olarak; odaklanmış elektron demetinin incelenen örneğin yüzeyi ile yaptığı fiziksel etkileşimlerin (elastik, elastik olmayan çarpışmalar ve diğerleri) sonucunda ortaya çıkan sinyallerin toplanması ve incelenmesi prensibine dayanır. SEM görüntüleri incelenerek filmlerin kaliteleri, fabrikasyonları ve homojenlikleri konusunda bilgi elde edilebilir. CuS ince filmin SEM görüntüsü Şekil 4.3’de görülmektedir. Şekil incelendiğinde filmin homojen olarak büyüdüğü, yüzeyi tamamen kapladığı ve farklı yüksekliklerden dolayı oluşan elektron sinyallerinin sonucu olarak da görüntüde parlak ve karanlık bölgelerin olduğu göze çarpmaktadır. Taneler (grains) eşit olmayan boyut ve şekil ile oldukça küçüktürler. Bundan dolayı bu tür yüzeyler birçok optoelektronik ve fotovoltaik devre elemanlarında kullanılabilecek potansiyele sahiptirler.



Şekil 4.3. n-GaAs yarıiletkeninin üzerine SILAR yöntemi ile büyütülen CuS ince filminin SEM görüntüsü

4.3. Cu/CuS/n-GaAs/In Yapısının Elektriksel Karakteristiklerinin Numune Sıcaklığına Bağlı Olarak Analizi

Metal-arayüzey tabakası-yarıiletken (MIS) diyot yarıiletken yüzey çalışmalarında çok faydalı bir devre elemanıdır. Bütün yarıiletken devre elemanlarının kararlılığı ve güvenilirliği, yarıiletkenin yüzey şartlarıyla ilgili olduğundan dolayı, MIS diyotların yardımıyla yüzey fiziğinin anlaşılması devre elemanı fabrikasyonunda büyük öneme sahiptir. İnce film, devre elemanının idealite faktörü ve engel yüksekliği gibi karakteristik parametrelerini modifiye edebilir. Devre elemanının kararlılığı ve performansı özellikle metal ve yarıiletken arasında bulunan arayüzey tabakasının şekillenimine bağlıdır. Bu nedenle ince filmlerin kimyasal yapısı ve yüzey morfolojisi devre elemanının elektriksel karakteristiklerinde önemli bir rol oynar. Metal ve

yarıiletken arasında CuS gibi bir arayüzey tabakasının varlığı metal / yarıiletken kontağı, metal / arayüzey tabakası / yarıiletken yapıya dönüştürür. Bu tür devre elemanları optoelektronikte ve özellikle de yüksek frekans uygulamalarında büyük öneme sahiptirler. MIS diyotlar geçtiğimiz yirmi yıl içerisinde yoğun bir şekilde çalışılmıştır. MIS diyotların elektriksel davranışlarının çalışılması, yarıiletken ve arayüzey tabakası arasındaki arayüzey karakteristiklerinin yapısı gibi fiziksel özelliklerin anlaşılmasında çok önemlidir. Yarıiletken altlık üzerindeki yüzey hallerinin büyük yoğunluğundan dolayı, diyotların idealite faktörü, engel yüksekliği ve saturasyon akımları gibi karakteristik parametreleri kararlı olmazlar. Bu problem alternatif ince filmler kullanılarak aşılabılır. Bu çalışmada CuS ince filmi; Cu/n-GaAs/In diyodda arayüzey tabakası olarak kullanılmıştır.

Termoiyonik emisyon teorisine göre arayüzey tabakalı bir metal- yarıiletken eklem için akım-voltaj ilişkisi

$$I = I_0 \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{e(V-IR_s)}{kT}\right)\right] \quad (4.2)$$

bağıntısıyla verilmektedir (Rhoderick ve Williams 1988). Bu denklemdaki her bir parametre daha önceki kesimlerde belirtilmişti. Denklem (4.2) dikkate alınarak idealite faktörünün değeri

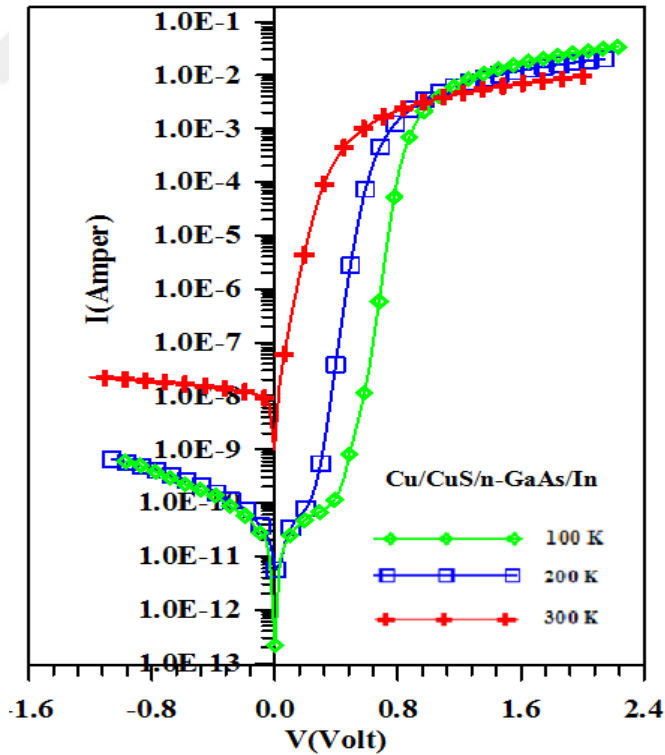
$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.3)$$

bağıntısından ve engel yüksekliği de

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

bağıntısından hesaplanabilir.

Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapının sıcaklığa bağlı I-V karakteristikleri Şekil 4.4’de verilmiştir. Bu grafiğin düz beslem kısmındaki doğrusal bölgesine yapılan doğrusal fitin eğiminden $dV/d(\ln I)$ değeri ve $V=0$ ’da düşey eksenini kestiği noktadan da I_0 doyma akımı değeri elde edilebilir. Şekil 4.4 dikkate alınarak ve (4.3) ve (4.4) denklemlerinden de yararlanarak kendi araştırma laboratuvarımızda ürettiğimiz CuS arayüzey tabakalı diyodun idealite faktörü, engel yüksekliği ve doyma akımı değerleri 100 K, 200 K ve 300 K numune sıcaklığı değerlerinde hesaplanmıştır ve bu değerler Çizelge (4.1)’de verilmiştir. Çizelge (4.1)’den de görüldüğü gibi, idealite faktörü azalan sıcaklıkla artarken, engel yüksekliği azalmaktadır. İdealite faktörünün birden büyük olması arayüzey hallerine ve arayüzey tabakasına atfedilebilir. Engel yüksekliğinin azalan sıcaklıkla azalması ise homojen olmayan doğrultucu engel modeliyle açıklanabilir. Yani düşük sıcaklıklarda düşük enerjili taşıyıcıların düşük engellerden geçmesi, engel yüksekliğinin azalmasına sebep olmuştur.



Şekil 4.4. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının sıcaklığa bağlı I-V karakteristikleri

Schottky diyodun doğru beslem I-V karakteristikleri yardımıyla diyot parametrelerinin hesaplanmasında Cheung (1986) tarafından geliştirilen model kullanılabilir. Bu modelin detayları literatürde verilmiştir (Çaldıran vd. 2014). Cheung diyottan geçen toplam akımı ifade eden denklemi dikkate alarak, bu denklemden

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (4.5)$$

ve

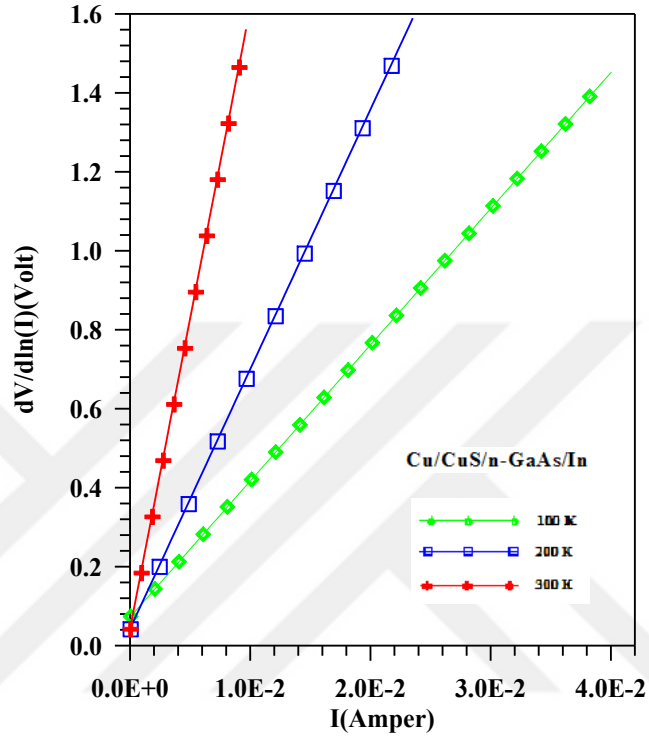
$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (4.6)$$

fonksiyonlarını türetmiştir. Denklem (4.5)'e göre $dV/d(\ln I)$ nın I 'ya göre grafiği doğrusaldır ve bu doğrunun eğiminden diyodun nötral bölge direnci olan R_s seri direnci hesaplanabilir. Yine bu doğrunun düşey eksenini kestiği noktadan da idealite faktörü bulunabilir. Aynı şekilde denklem (4.6)'ya göre $H(I)$ 'nın I 'ya göre grafiği doğrusaldır ve bu doğrunun eğiminden diyodun R_s seri direnci ve $H(I)$ eksenini kestiği noktadan da engel yüksekliği Φ_b hesaplanabilir.

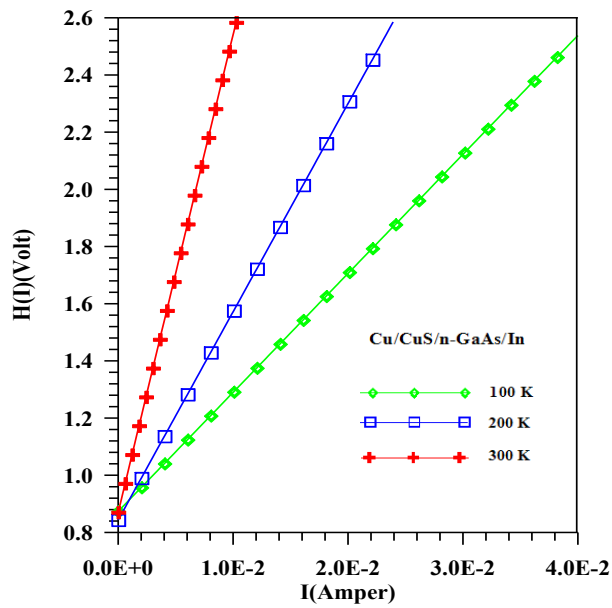
Cheung fonksiyonlarının çizimi Şekil 4.4'de verilen doğru beslem $\ln(I)$ - V grafiğinin büyük voltajlara karşılık gelen lineer olmayan kısmından yararlanarak ve (4.5) ve (4.6) denklemleri dikkate alınarak 100 K, 200 K ve 300 K numune sıcaklıklarında yapılmıştır. $dV/d(\ln I) - I$ grafiği Şekil 4.5'de, $H(I)$ - I grafiği de Şekil (4.6)'da verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Her iki grafikten elde edilen seri direnç değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Cheung metodu kullanılarak hesaplanan idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri termoiyonik emisyon metodu kullanılarak hesaplanan değerlerden daha büyük bulunmuştur. Bu farklılığın nedeni Cheung metodundaki hesaplamaların arayüzey

halleri ve arayüzey tabakasının etkili olduğu yüksek gerilim ve yüksek akım değerlerine karşılık gelen bölgelerde yapılmasındandır.



Şekil 4.5. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının sıcaklığa bağlı $dV/d(\ln I)$ -I grafiği.



Şekil 4.6. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının sıcaklığa bağlı $H(I)$ -I grafiği

Diyotların engel yükseklikleri ve seri direnç değerleri, detayları kesim (2.6)'da verilen Norde metoduyla da hesaplanabilir. Bohlin tarafından modifiye edilen Norde fonksiyonu

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (2.20)$$

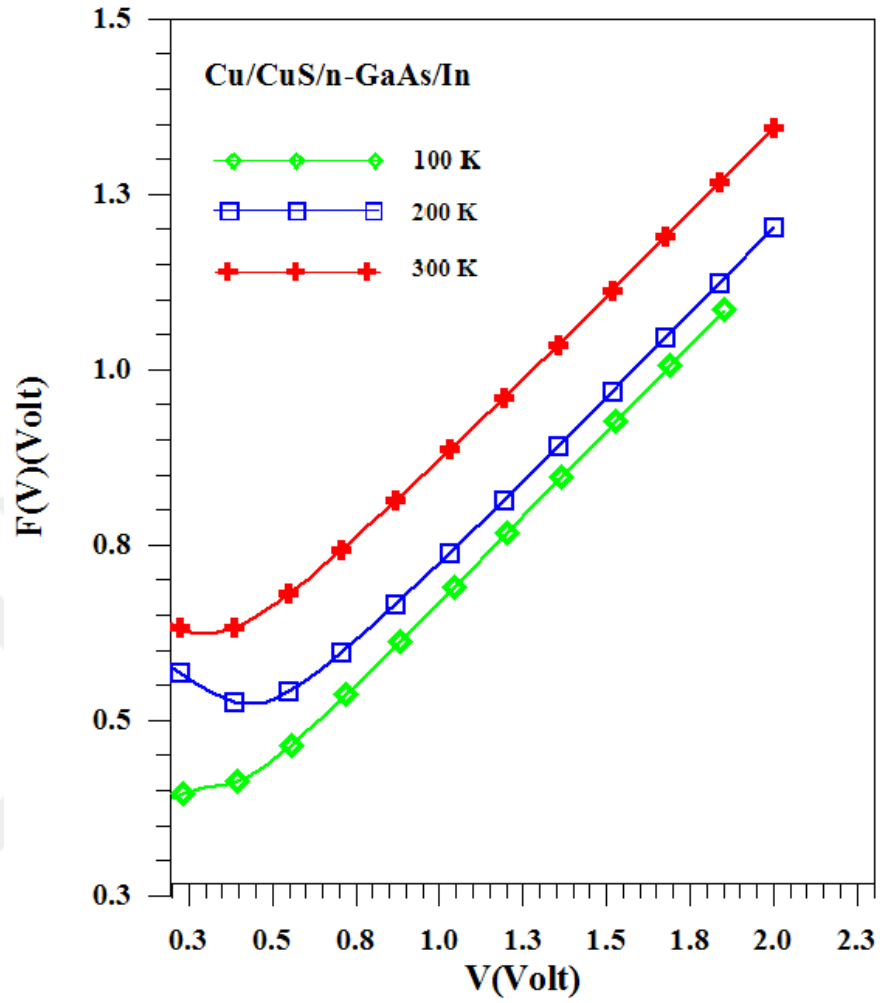
şeklinde idi. Bu modelde $F(V)$ fonksiyonunun minimum noktasına karşılık gelen minimum V_m voltajı dikkate alınarak diyodun engel yüksekliği

$$\Phi_b = F_m + \left[\frac{\gamma-n}{n} \right] \left[\frac{V_m}{\gamma} - \frac{kT}{e} \right] \quad (2.24)$$

bağıntısından ve aynı şekilde diyodun seri direnci de

$$R_s = (\gamma - n) \left(\frac{kT}{eI_m} \right) \quad (2.25)$$

bağıntısından hesaplanabilir. Burada I_m minimum voltaj V_m 'ye karşılık gelen akımdır. Cu/CuS/n-GaAs/In yapısına ait $F(V)$ - V grafiği 100 K, 200 K ve 300 K numune sıcaklıklarında Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Numune sıcaklığına bağlı olarak $F(V)$ 'nin V 'ye karşı değişimleri.

Norde metoduyla hesaplanan Φ_b ve R_s değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Hesaplanan değerler incelendiğinde sıcaklığın artmasıyla Φ_b değerinin arttığı R_s değerinin ise azaldığı görülmektedir. Cheung fonksiyonları yüksek akım ve yüksek gerilim değerlerine karşılık gelen doğru beslem bölgelerinde uygulandığı, Norde fonksiyonu ise doğru beslem bölgelerinin tamamına uygulandığı için, iki methoddan elde edilen karakteristik parametreler arasında farklılıklar söz konusudur.

Çizelge 4.1. Cu/CuS/n-GaAs/In numunesinin sıcaklığa bağlı I-V değişimlerinden farklı metodlar kullanılarak elde edilen parametreleri.

Sıcaklık (K)	Termoiyonik Emisyon Metodu			Norde Metodu		Cheung Metodu				
						dV/d(lnI)-I		H(I)-I		R _{sort} (Ω)
	n	Φ _b (eV)	I ₀ (A)	Φ _b (eV)	R _s (Ω)	R _s (Ω)	n	Φ _b (eV)	R _s (Ω)	
100	2,507	0,358	6,08x10 ⁻¹⁶	0,456	138,80	157,34	8,75	0,348	167,14	162,24
200	1,311	0,625	4,72x10 ⁻¹³	0,644	76,68	65,77	2,47	0,644	72,81	69,29
300	1,190	0,706	8,22x10 ⁻⁹	0,729	26,41	34,47	1,66	0,732	41,61	38,04

Metal-yarıiletken doğrultucu kontaklarda arayüzeyin oluşumu hakkında önemli bilgiler uzay yükü bölgesinin kapasitesi incelenerek elde edilebilir. Doğrultucu kontağın engel yüksekliği, yarıiletkendeki taşıyıcı konsantrasyonu, difüzyon potansiyeli ve Fermi enerji seviyesi gibi parametreler kapasitenin ters beslem durumundaki voltaj değişiminden tayin edilebilir (Wilmsen 1985).

Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapının oda sıcaklığındaki C-V ölçümleri (-2) V ve (+2) V aralığında farklı frekanslarda (50 kHz, 100 kHz, 200 kHz, 300 kHz, 500 kHz ve 1 MHz) alınmıştır.

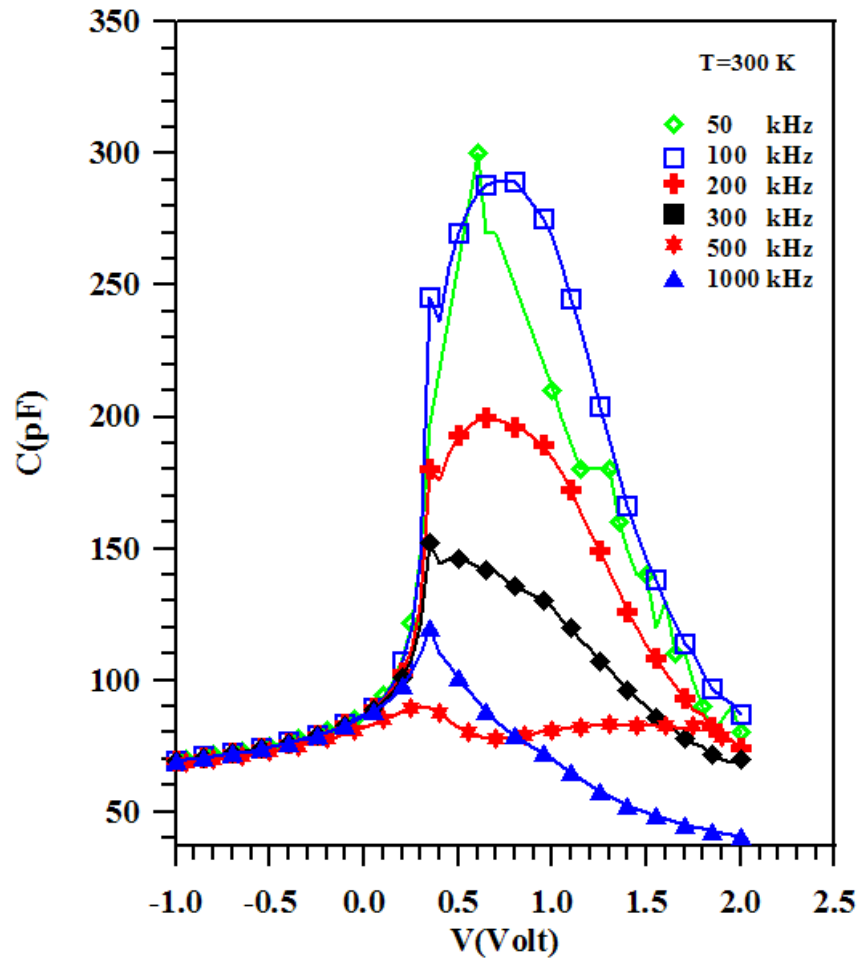
Metal-yarıiletken doğrultucu kontağın ters beslem altındaki kapasitesi,

$$C = A \left[\frac{\epsilon_s \epsilon_0 e N_d}{2(V_d + V)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

bağıntısı ile verilmektedir (Neamen 1992). Burada A Diyodun etkin alanı, V_d, difüzyon potansiyeli, V, uygulanan ters beslem voltaj, k, Boltzmann sabiti (k=8,625x10⁻⁵ eV/K),

ϵ_0 , boşluğun dielektrik sabiti ($\epsilon_0=8,85 \times 10^{-14} \text{ F/m}$), ϵ_s , yarıiletkenin dielektrik sabiti (GaAs için $\epsilon_s=13,1$), e , elektronun yükü ve N_d iyonize olmuş donör konsantrasyonudur.

Şekil 4.8 Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının oda sıcaklığında, farklı frekanslardaki düz ve ters beslem C-V grafiklerini göstermektedir. Bu grafiğin düz beslem kısmı incelendiğinde yüksek frekanslardaki kapasite küçük iken, düşük frekanslara doğru gidildikçe kapasitenin arttığı görülmektedir.



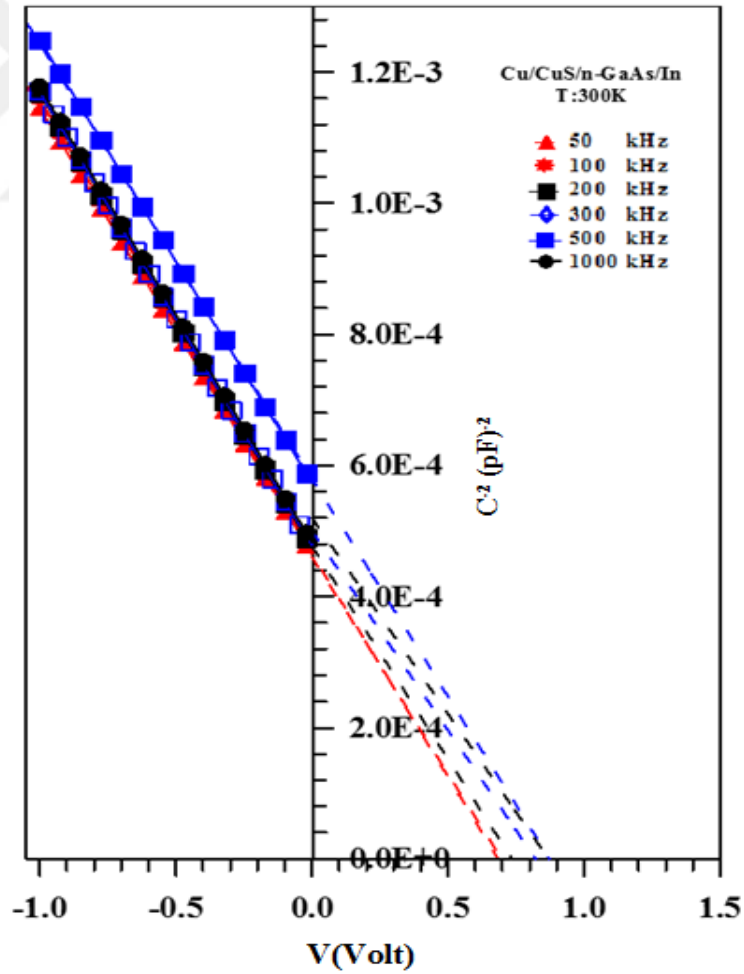
Şekil 4.8. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının oda sıcaklığında 50 kHz, 100 kHz, 200kHz, 300 kHz, 500 kHz ve 1 MHz frekans değerlerinde ölçülen doğru ve ters beslem C-V grafikleri

Kapasitenin karesinin tersi kesim 2.5’de

$$C^{-2} = \frac{2(V_d + V)}{\epsilon_s \epsilon_0 e A^2 N_d} \quad (2.7)$$

şeklinde verilmişti. Denklem (2.7)'ye göre C^{-2} -V grafiği doğrusal ve $C^{-2}=0$ için $V_d=V$ olmalıdır. Bu grafikten yararlanarak difüzyon potansiyeli elde edilebilir.

Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının oda sıcaklığında ve farklı frekanslardaki ters beslem C-V grafiklerinden faydalanılarak elde edilen C^{-2} -V değişimleri Şekil 4.9'da gösterilmektedir. Ters beslem bölgesi için uygulama gerilimi azaldıkça, C^{-2} 'ninde azaldığı değişimlerden görülmektedir. Bu grafiklerden hesaplanan V_d değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.9. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının oda sıcaklığında 50 kHz, 100 kHz, 200kHz, 300 kHz, 500 kHz ve 1 MHz frekans değerlerinde ölçülen ters beslem C^{-2} -V değişimleri

Denklem (2.7)'nin V 'ye göre türevi alınırsa,

$$\frac{d(C^{-2})}{dV} = \frac{2}{\epsilon_s \epsilon_0 e A^2 N_d} \quad (4.7)$$

elde edilir. N_d ifadesi yalnız bırakılırsa,

$$N_d = \frac{2}{\epsilon_s \epsilon_0 e A^2 \frac{d(C^{-2})}{dV}} \quad (4.8)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntıdan iyonize olmuş donör konsantrasyonu (N_d)'nin C^{-2} - V grafiğinin eğiminden hesaplanabileceğini görmekteyiz. Bu grafiğin eğiminden elde ettiğimiz taşıyıcı konsantrasyonlarının değerleri de Çizelge 4.2'de verilmiştir. Termal denge durumunda *n-tipi* bir yarıiletkeni göz önüne aldığımızda iletkenlik bandındaki elektron konsantrasyonu,

$$n_0 = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{kT}\right) \quad (4.9)$$

bağıntısı ile verilmektedir. *n-tipi* bir yarıiletken için iyonize olmuş donör konsantrasyonu asal elektron konsantrasyonundan (n_i) çok çok büyük olacağı için ($N_d \gg n_i$), $n_0 \approx N_d$ olur (Neamen 1992). GaAs için iletkenlik bandındaki hal yoğunluğu $N_c = 2,5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 'tür. Bu durumda (4.9) ifadesini düzenlersek,

$$N_d = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{kT}\right) \quad (4.10)$$

bağıntısı elde edilir. (4.10) ifadesinin tabii logaritması alınacak olursa ve iletkenlik bandının tabanı referans seviye olarak ($E_c = 0$) kabul edilirse, Fermi enerji seviyesi,

$$E_F = kT \ln\left(\frac{N_d}{N_c}\right) \quad (4.11)$$

şeklinde elde edilmiş olur. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının Fermi enerji seviyesi (E_F) denklem (4.11)'de C^{-2} -V grafiklerinin eğimlerinden elde edilen N_d değerleri yerine yazılarak hesaplanmıştır. Bu değerler Çizelge 4.2'de verilmiştir. Metal-n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji-band diyagramı göz önüne alındığında engel yüksekliği,

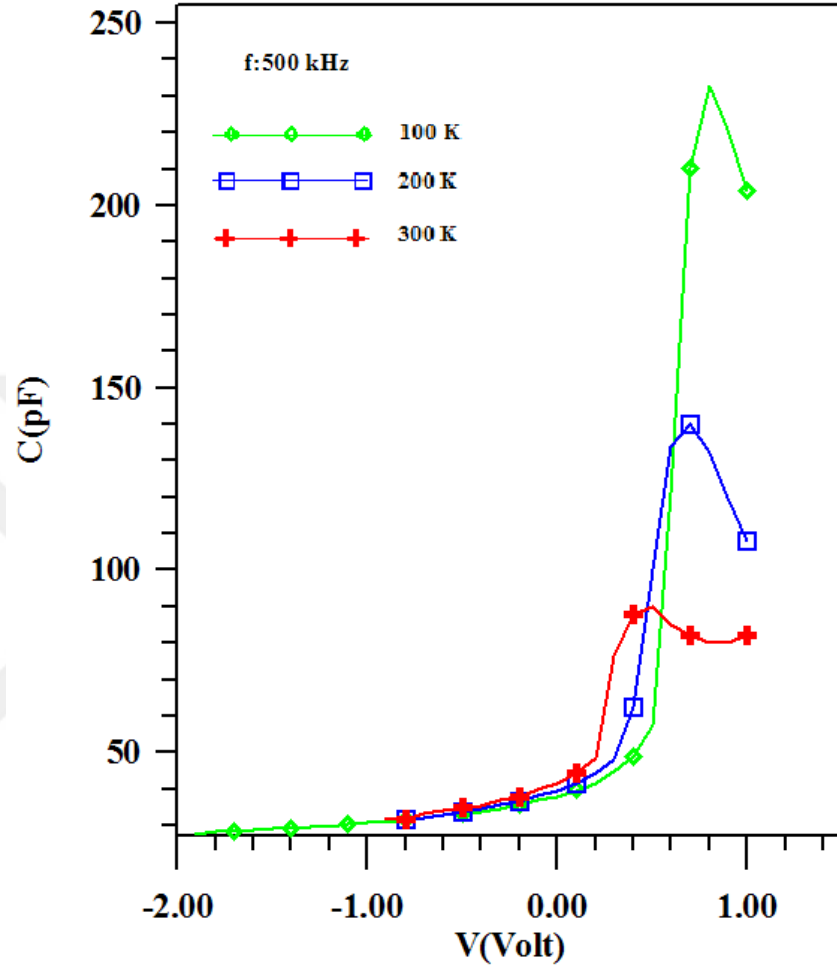
$$\Phi_b = E_F + V_d \quad (4.12)$$

bağıntısı ile verilmektedir (Neamen 1992). Bu durumda her bir frekans için bulduğumuz E_F ve V_d değerleri (4.12) denkleminde yerine yazılarak engel yükseklikleri hesaplanabilir. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısına ait farklı frekanslarda elde edilen C^{-2} -V grafiklerinden yukarıda verilen denklemler yardımıyla E_F ve Φ_b değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler Çizelge 4.2'de verilmiştir. Çizelge 4.1'de verilen engel yükseklikleri ile Çizelge 4.2'de verilen engel yüksekliklerini karşılaştırdığımız da C-V ölçümlerinden elde edilen engel yükseliği değerlerinin daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum yöntemlerin farklı olmasına atfedilebilir.

Çizelge 4.2. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden hesaplanan frekansa bağlı ($T=300K$) parametrelerin deneysel değerleri

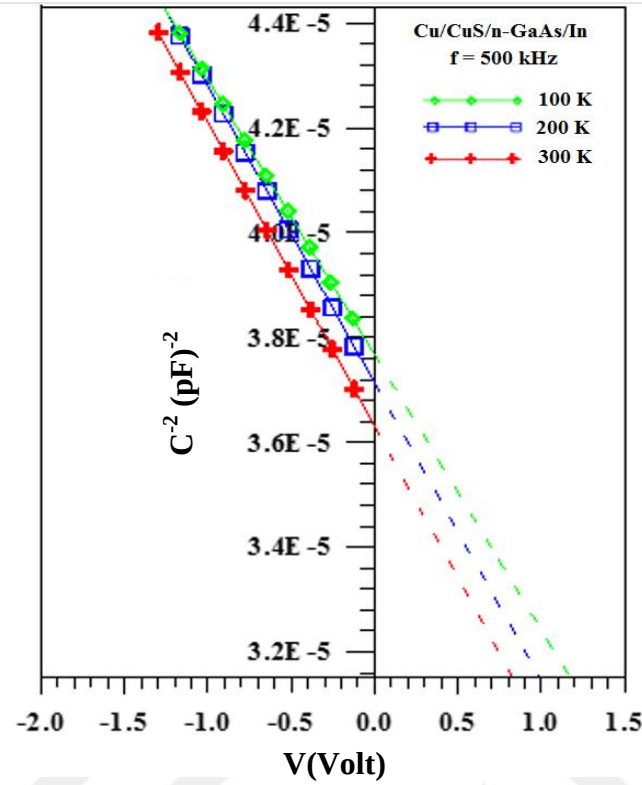
Frekans(kHz)	Vd(eV)	$N_d(cm^{-3})$	$E_F(eV)$	$\Phi_b(eV)$
50	0,650	2.546×10^{14}	0,178	0,829
100	0,683	2.541×10^{14}	0,178	0,862
200	0,685	2.523×10^{14}	0,179	0,863
300	0,822	2.874×10^{14}	0,175	0,997
500	0,850	2.592×10^{14}	0,178	1,028
1000	0,858	2.880×10^{14}	0,175	1,033

Aynı zamanda diyodun C-V ölçümleri 500 kHz frekansta 100 K ve 200 K sıcaklıklarda da alınmıştır. Şekil 4.10. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının bu C-V değişimlerini göstermektedir. Grafikten de görüldüğü gibi, ters beslemde uygulama gerilimi arttıkça, kapasite hızlı bir şekilde azalmaktadır.



Şekil 4.10. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının $f=500$ kHz’de numune sıcaklığına bağlı olarak alınan C-V grafikleri

Şekil 4.11 Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının 500 kHz frekansta ve 100 K ve 200 K numune sıcaklıklarında alınan C-V grafiklerinden faydalanılarak elde edilen C^{-2} -V değişimlerini göstermektedir. Bu grafiklerden de V_d , N_d , E_F ve Φ_b değerleri numune sıcaklığına bağlı olarak hesaplanmıştır ve Çizelge 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.11. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının $f=500$ kHz’de numune sıcaklığına bağlı olarak alınan C^{-2} -V grafikleri

Çizelge 4.3. 500 kHz frekansta sıcaklığa bağlı olarak alınan C^{-2} -V grafiklerinden hesaplanan parametreler

Sıcaklık (K)	$V_d(\text{eV})$	$N_d(\text{cm}^{-3})$	$E_F(\text{eV})$	$\Phi_b(\text{eV})$
100	1,137	$5,268 \times 10^{15}$	0,033	1,171
200	0,955	$4,433 \times 10^{15}$	0,070	1,025
300	0,850	$2,592 \times 10^{14}$	0,178	1,028

Yarıiletkenle dengede olan N_{ss} arayüzey durumlarının yoğunluk dağılım eğrileri düz beslem I-V karakteristiklerinden elde edilebilir. Etkin engel yüksekliği Φ_e ’nin yarıiletken ile arayüzey tabakası arasına yerleşmiş arayüzey durumlarının varlığına ve beslem gerilimine bağlı olduğu tahmin edilmektedir (Kim vd.2016). Etkin engel yüksekliği Φ_e ,

$$\Phi_e = \Phi_b + \left(1 - \frac{1}{n}\right) V \quad (4.13)$$

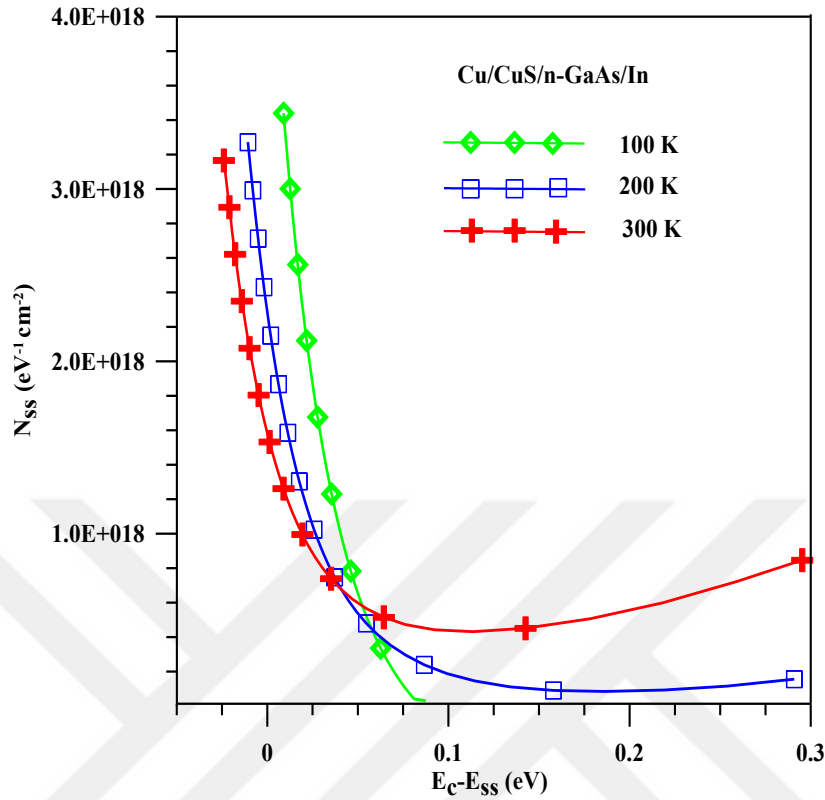
eşitliği ile verilir. n-tipi yarıiletkenlerde yarıiletkenin yüzeyinde iletkenlik bandının altında bulunan arayüzey durumlarının (N_{ss}) enerjileri (E_{ss}),

$$E_c - E_{ss} = e(\Phi_e - V) \quad (4.14)$$

eşitliği ile verilir (Türüt 1995; Sağlam 2008). Yarıiletkenle dengede olan N_{ss} arayüzey durumlarına sahip diyotlar için idealden ($n=1$) daha büyük olan idealite faktörü (n),

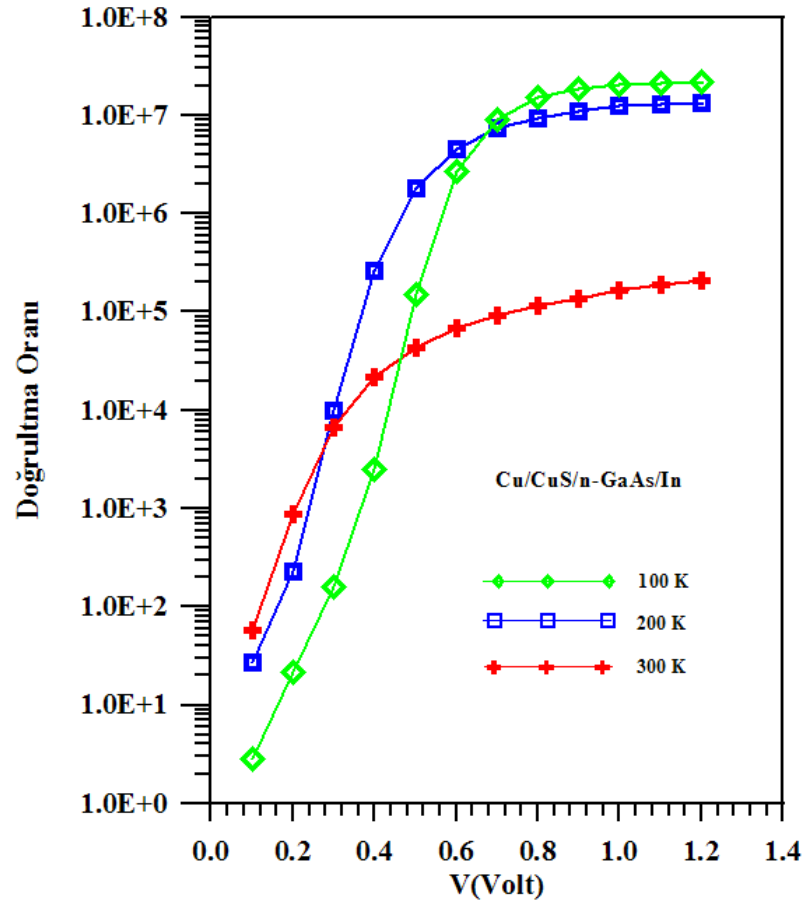
$$n = 1 + \frac{e^2 \delta N_{ss}}{\epsilon_i} \quad (4.15)$$

şeklindedir (Türüt 1995). Burada ϵ_i ve δ sırasıyla arayüzey tabakasının dielektrik sabiti ve kalınlığıdır. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapıların düz beslem I-V karakteristiklerinden numune sıcaklığına bağlı olarak elde edilen arayüzey hal yoğunluğunun arayüzey hal enerjisine karşı değişimleri Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. Cu/CuS/n-GaAs/In numunesine ait doğru beslem I-V karakteristiklerinden elde edilen sıcaklığa bağlı N_{ss} değişimleri

Verilen bir potansiyel değerinde düz beslem durumundaki akım değerinin ters beslem durumundaki akım değerine oranı Schottky diyodun doğrultma oranını vermektedir. Yaptığımız çalışmada -2V ile +2V aralığında her bir ölçüm için düz beslem akımı ters beslem akımına oranlanmıştır. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının 100 K, 200 K ve 300 K sıcaklık değerlerinde doğrultma oranlarının uygulanan gerilime karşı grafiği Şekil 4.13’de verilmiştir. Elektronik teknolojisinde bir diyodun kullanılabilir olması bakımından doğrultma oranının yüksek olması önem taşımaktadır. Bu nedenle üretilecek bir diyodun çok iyi derecede bir doğrultucu davranış göstermesi istenir. Şekil 4.13 grafiğini incelediğimizde diyodun iyi bir doğrultma oranına sahip olduğunu görmekteyiz (oda sıcaklığında yaklaşık 10^5 mertebesinde).



Şekil 4.13. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının 100 K, 200 K ve 300 K sıcaklık değerlerinde uygulanan gerilime bağlı olarak doğrultma oranları değişimleri

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Devre elemanlarının fabrikasyonu, devre elemanı teknolojisinin gelişiminde çok önemlidir. Diyotların üretiminde kullanılan materyaller devre elemanlarının performansını artırmak için sürekli olarak geliştirilmelidir. Son zamanlarda alternatif devre elemanlarının yapımı ve değişik parametrelerin ölçümü üzerine çok sayıda çalışmalar yapılmıştır. İnce film teknolojisi katıhal elektroniğindeki şaşırtıcı gelişmelerin temelidir. İnce filmler birçok fiziksel ve kimyasal methodla oluşturulabilirler. Devre elemanının performansı ince filmin elektriksel ve optik özelliklerine bağlıdır.

Günümüz teknolojisinde üretim maliyetlerinin yüksek olması çözelti fazı veya kimyasal büyütme tekniklerinin ucuz ve kolay uygulanabilirliğini öne çıkarmaktadır. Bu durumları göz önüne alarak düşük maliyet açısından bu çalışmada, *CuS* arayüzey tabakasını elde etmek için, SILAR metodu kolay, ucuz ve istenildiği kadar tekrarlanabilen bir metod olduğu için tercih edilmiştir.

İndiyum metali kullanılarak omik kontağı yapılan n-GaAs yarıiletken kristal üzerinde *CuS* ince filminin SILAR metodu ile büyütülebilmesi için *Cu* kaynağı olarak pH değeri yaklaşık olarak 11 olan 0,2 M *CuSO₄* çözeltisi ve Sülfür kaynağı olarak pH değeri 12 olan 0,05 M *Na₂S* çözeltisi kullanılmıştır. Yarıiletken numune hazırlanan çözeltilerle önce *CuSO₄* çözeltisinde 20 saniye bekletilerek numune yüzeyinde bakır (Cu^{+2}) ve az miktarda sülfat (SO_4^{-2}) iyonları yüzeyde toplanmaya başlamıştır. Ardından numune deiyonize su içerisinde 40 saniye tutularak zayıf bağlı Cu^{+2} ve SO_4^{-2} iyonlarının yüzeyden ayrılması sağlanmıştır. Daha sonra *Na₂S* çözeltisinde 20 saniye bekletilerek numune yüzeyinde sülfür iyonlarının (S^{-2}) yapışmış Cu^{+2} iyonları ile tepkimeye girmesi sağlanmıştır. Son olarak numune tekrar deiyonize su içerisinde 40 saniye tutularak tepkimeye girmeyen zayıf bağlı sodyum (Na^{+}) iyonları ve sülfür (S^{-2}) iyonlarının yüzeyden ayrılmaları sağlanmıştır. Bu işlem sonucunda bir SILAR döngüsü tamamlanmıştır. 20 turda taban malzeme yüzeyine homojen olarak kaplanmış *CuS* ince filmleri elde edilmiştir. *CuS* filminin yapısal özellikleri incelendikten sonra, filmin

üzerine Cu metali buharlaştırılarak sandviç yapı elde edilmiştir. Elde ettiğimiz bu yapının sıcaklığa bağlı olarak I-V ve C-V karakteristikleri incelenmiştir.

Cam altlık üzerinde elde edilen CuS ince filminin soğurma ölçümleri oda sıcaklığında alınmıştır. Optik soğurma spektrumu yardımıyla CuS ince filminin yasak enerji aralığı değerini tayin etmek için, $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafiği çizilmiştir. Burada $h\nu$ foton enerjisi ve α soğurma katsayısıdır. Soğurma katsayısı α 'nın foton enerjisi $h\nu$ ile değişimi soğurma teorisine göre $\alpha(h\nu) = A(h\nu - E_g)^{1/2}$ şeklinde ifade edilmektedir. Bu ifade de ki parametreler daha önce verilmişti. Bu bağıntı dikkate alınarak $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafiği çizildiğinde doğrusal bir değişim görülür ve bu değişimdeki doğrunun enerji eksenini kestiği nokta E_g 'yi verir. Şekil 4.1'de $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafiği çizilmiştir bu grafikten CuS ince filminin bant aralığı $E_g = 2,05$ eV olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç literatürle uyumludur (Yücel vd. 2015; Sağlam vd. 2016).

n-GaAs altlık üzerinde büyütülen CuS ince filminin yapısal ve yüzeysel özelliklerini araştırmak için XRD ve SEM ölçümleri alınmıştır. XRD metodu kristal yapı tayininde kullanılan güçlü ve zararsız bir methodur. Bu method yapı, faz, tercihleri kristal yönelimi ve kristal kusurları ile ilgili önemli bilgiler verir. Şekil 4.2'de CuS ince filminin XRD verileri verilmiştir. Bu veriler incelendiğinde CuS ince filminin farklı düzlemler ve fazlar boyunca yönelimlerle (102) ve (108) şeklinde polikristal yapıda olduğu görülmüştür.

SEM tekniği ince filmlerin morfolojik yapısını incelemek için kullanılır. Taneciklerin büyümesi, şekli ve boyutu hakkında önemli bilgiler verir. Şekil 4.3, n-GaAs altlık üzerinde büyütülen CuS ince filminin SEM görüntüsünü göstermektedir. SEM görüntüsünden, filmin tüm yüzeyi kapladığı ve oldukça düzgün yüzey yapısına sahip olduğu görülmektedir.

Schottky diyotlarda I-V grafiklerinden ve termoiyonik emisyon teorisinden idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri hesaplanabilir. Ayrıca Norde ve Cheung

metotlarından idealite faktörü ve engel yüksekliğinin yanısıra seridirenç değeri de hesaplanabilir.

Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının 100 K, 200 K ve 300 K sıcaklık değerlerinde idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerini bulmak için I-V ölçümleri, (-1) V-(+2) V aralığında 0,05 Volt adımlarla alınmıştır. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının doğru ve ters beslem $\ln I$ -V grafiği Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Bu grafikten ters beslem durumunda her bir sıcaklık için bir doygunluk olduğu ve Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının doğrultma özelliği gösterdiği açıkça görülmektedir. Gerekli hesaplamalar yapıldıktan sonra elde edilen n ve Φ_b değerleri sıcaklık değerlerine göre sırasıyla 2,507 ve 0,358 eV (100 K'de) 1,311 ve 0,625 eV (200 K'de) 1,190 ve 0,706 eV (300 K'de) aralığında değişmektedir. $n=1$ durumunda akım termoiyonik emisyon teorisine uygun olarak akacağından diyot ideal kabul edilir. Fakat idealite faktörünün 1'den büyük olduğu durumlarda diyot ideal kabul edilmez bu nedenle elde ettiğimiz diyodumuz ideal değildir. İdealite faktörünün 1'den büyük olmasının birkaç nedeni olabilir (Pinero J.C. vd. 2017):

- 1) Çok yoğun katkılanmış yarıiletkenlerde tunelleme akımları vardır.
- 2) Metal ile yarıiletken arasındaki arayüzeyde arayüzey halleri vardır.
- 3) Uzun-yükü bölgesi içinde jenerasyon-rekombinasyon akımları vardır.
- 4) Arayüzeydeki elektrik alanda Schottky engelinin imaj-kuvvet etkisinden dolayı alçalması söz konusudur.

Sıcaklığa bağlı $\ln(I)$ -V grafiklerinden hesaplanan değerler, azalan sıcaklıkla idealite faktörünün arttığını engel yüksekliğinin azaldığını göstermektedir. Azalan sıcaklıkla idealite faktörünün artması ve engel yüksekliğinin azalması, yük taşıyıcılarının termal enerjileri göz önüne alınarak açıklanabilir (Göksu vd 2010; Güzeldir 2011).

Şekil 4.4 incelendiğinde doğru beslem voltajının artmasıyla $\ln I$ -V grafiklerinde sapmalar olduğu gözlenmiştir. Bu sapmaların nedenlerinden biri diyodun önemli parametrelerinden olan seri dirençtir ve bu direnç farklı metodlarla hesaplanabilir. Seri

direnç hesaplamasında Norde ve Cheung metodları kullanılmıştır. Doğru beslem $\ln I$ - V karakteristiklerinin aşağı doğru eğri bölgelerinden, $dV/d\ln(I)$ - I ve $H(I)$ - I grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.5 ve Şekil 4.6). Çizelge 4.1’de sıcaklığa bağlı olarak idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri verilmiştir. Bu tablo incelendiğinde Cheung fonksiyonlarından elde edilen parametrelerin I - V grafiklerinden elde edilen parametrelerden farklı olduğu görülmektedir. Bu durum yüksek gerilim ve yüksek akım değerlerine karşılık gelen bölgelerde seri direncin ve arayüzey hallerinin etkisine atfedilebilir (Cheung 1986).

Norde fonksiyonundan faydalanılarak da Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının seri direnci ve engel yüksekliği sıcaklığa bağlı olarak hesaplanmıştır. Norde fonksiyonuna ait grafikler Şekil 4.7’de verilmiştir. Sıcaklığa bağlı Norde fonksiyonlarından elde edilen seri direnç ve engel yükseklikleri değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Seri direnç ve engel yüksekliği değerleri sıcaklığa önemli ölçüde bağlılık göstermektedir. Değişik sıcaklıklarda Norde fonksiyonlarından elde edilen $F(V)$ eğrisi kullanılarak hesaplanan engel yüksekliği değerlerinin sıcaklığın artmasıyla arttığı, seri direnç değerlerinin ise artan sıcaklıkla azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum yine taşıyıcıların termal enerjileri ile açıklanabilir.

Bir Schottky diyodun ters beslem C - V değişiminden yararlanarak diyodun difüzyon potansiyeli, iyonize olmuş donör konsantrasyonu (n -tipi yarıiletken için) Fermi enerji seviyesi ve engel yüksekliği hesaplanabilir. Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının oda sıcaklığında frekansa bağlı C - V grafikleri Şekil 4.8’de verilmiştir ve tükenim bölgesinin yapısını anlamak için C - V karakteristikleri incelenmiştir. Şekil 4.8’de verilen grafikten de görüldüğü gibi frekans değeri arttıkça kapasite değerleri azalmaktadır. Bu değişim literatür ile uyumludur. Şekil 4.9’da Cu/CuS/n-GaAs/In sandviç yapısının ters beslem durumunda C^{-2} - V grafikleri gösterilmiştir. Grafiklerden C^{-2} - V değişimlerinin doğrusal olduğu görülmektedir.

Bir Schottky diyodun ters beslem C - V değişiminden yararlanarak diyodun iyonize olmuş donör konsantrasyonu, difüzyon potansiyeli, Fermi enerji seviyesi ve dolayısı ile

de (4.12) eşitliğinden engel yüksekliği hesaplanabilir. Ters beslem C^{-2} -V değişimlerinden, N_d , V_d , E_F , ve Φ_b değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 4.2’de farklı frekans değerleri için bu değerler verilmiştir. Çizelge 4.1’de I-V grafiklerinden elde edilen engel yüksekliklerinin Çizelge 4.2’deki C-V değişimlerinden elde edilen engel yükseklikleri ile karşılaştırıldığında, C-V değişimlerinden elde edilen engel yüksekliklerinin daha büyük olduğu görülmektedir. Bu fark ölçüm yöntemlerinin farklı olmasına atfedilebilir.

Aynı zamanda C-V ölçümleri 100 K ve 200 K numune sıcaklıklarında da alınmıştır ve ters beslem C^{-2} -V karakteristiklerinden N_d , V_d , E_F , ve Φ_b değerleri numune sıcaklığına bağlı olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler Çizelge 4.3’de verilmiştir. Numune sıcaklığına bağlı C-V ölçümleri 500 kHz frekans değerinde yapılmıştır.

Cu/CuS/n-GaAs/In yapının arayüzey özellikleri ve doğrultma oranları üç farklı numune sıcaklığında doğru beslem $\ln(I)$ -V grafiklerinden hesaplanmıştır. Beklendiği gibi, arayüzey hal yoğunluğunun iletkenlik bandının tabanından bant ortasına doğru hızlı bir şekilde azaldığı (hemen hemen eksponansiyel olarak) görülmüştür. Yine diyodun oda sıcaklığında hemen hemen 10^5 mertebede bir doğrultmaya sahip olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışmada CuS arayüzey tabakalı Cu/n-GaAs/In diyot yapısı elde edilerek, yapının karakteristik özellikleri üç farklı numune sıcaklığında incelenmiştir. CuS arayüzey tabakası çok basit bir kimyasal model olan SILAR tekniğiyle elde edilmiştir. CuS arayüzey tabakası ile Cu/n-GaAs/In diyodunun özelliklerinin değiştirilebileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Altuntas, H. and Özçelik, S., 2013. The interface states and series resistance analyzing of Au/SiO₂/n-GaAs at high temperatures. *Journal of Alloys and Compounds*. 577, 143-147.
- Ateş, A., Sağlam, M., Güzelidir, B., Yıldırma, M. A., Astam, A., 2010. The electrical characteristics of Cu/CuS/p-Si/Al structure. *Journal Of Optoelectronics And Advanced Materials*. 12, 1466-1471.
- Boer, K. W., 1926. Introduction. *Survey of Semiconductor Physics*. University of Delaware, ABD, 11-14
- Bohlin, K.E., 1986. Generalized Norde Plot Including Determination of the Ideality Factor. *J. Appl. Phys.* 60, 1223.
- Braun, F. 1878. Ueber unipolare Electricitätseitung, *Annalen der Physik*. 4, 476.
- Braun, F. 1883. Einige Bemerkungen über die unipolare Leitung fester Körper. *Annalen der Physik* 19, 340.
- Castillo, A.C., Mota González M. De L., Ramírez M. M., Castillo S.J., Ambrosio Lázaro R.C., Luquef P.A., Gómez-Gutiérrezf C.M., Quevedo López M.A., 2017 Study of optical, microstructural and electrical properties for multiple dip deposition of CuS films prepared by a simple cbd. *Chalcogenide Letters*, 14(2), 55-60.
- Chaki, S. H., Deshpande, M. P., Tailor, J. P., 2014. Characterization of CuS nanocrystalline thin films synthesized by chemical bath deposition and dip coating techniques. *Thin Solid Films*. 550, 291-297.
- Chand, S., Bala, S., 2007. Simulation studies of current transport in metal–insulator–semiconductor Schottky barrier diodes. *Physica B: Condensed Matter*. 390, 179–184.
- Chattopadhyay, P., 1994. Effect of Localized States on the Current-Voltage Characteristics of Metal-Semiconductor Contacts With Thin Interfacial Layer, *Solid-State Electronics*, 37 (10), 1759-1762.
- Chawanda, A., Mtangi, W., D Auret, F., Nel, J., Nyamhere, C., Diale, M., 2012. Current–voltage temperature characteristics of Au/n-Ge (1 0 0) Schottky diodes. *Physica B*. 407, 1574–1577
- Cheung, S.K. and Cheung, N.W., 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Appl. Phys. Lett.*, 58, 382.
- Cimilli, F. E., Efeoglu, H., Sağlam, M., Türüt, A. 2009a. Temperature-dependent current–voltage and capacitance–voltage characteristics of the Ag/n-InP/In Schottky diodes, *J. Mater Sci: Mater Electron*, 20, 105-112. Cimilli, F. E., Sağlam, M., Efeoglu, H., Türüt, A., 2009. Temperature-dependent current–voltage characteristics of the Au/n-InP diodes with inhomogeneous Schottky barrier height. *Physica B: Condensed Matter*. 404, (8-11) 1558-1562
- Coşkun, C., Biber, M., Efeoglu, H. 2003. Temperature dependence of current- voltage characteristics of Sn/p-GaTe Schottky diodes. *Applied Surface Science*, 211, 360-366.
- Crowell, C. R., 1977. Physical Significance of to Anomalies In Schottky Barriers, *Solid-State Electronics*, 20 (3) 171-175.

- Çaldıran, Z., Deniz, A. R., Coşkun, F. M., Aydoğan, Ş., Yeşildağ, A., Ekinci, D., 2014. I-V-T (Current- voltage- temperature) characteristics of the Au/Anthraquinone/p-Si/Al junction device. *Journal of Alloys and Compounds*. 584, 652-657.
- Çevik, S., 2013. Yüksek Lisans Tezi. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Burdur.
- Davydov, B. 1939. On the contact resistance of semiconductors. *J. Phys. USSR*, 1, 167-171.
- Davydov, B. 1941. Junction resistances in semiconductors. 1941. *J. Phys. USSR*, 4, 335-339.
- Dhruv, D.K. and Patel, B.H. 2016. Fabrication and electrical characterization of Al/p-ZnIn₂Se₄ thin film Schottky diode structure. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 54, 29-35.
- Göksu, T., Yıldırım, N., Korkut, H., Özdemir, A.F., Turut, A., Kökçe, A., 2010. Barrier height temperature coefficient in ideal Ti/n-GaAs Schottky contacts *Microelectronic Engineering* 87, 1781-1784.
- Grondahl, L. O. 1933. The Copper-Cuprous-Oxide Rectifier and Photoelectric Cell *Rev. Mod. Phys.* 5, 141.
- Güllü, Ö., Kılıçoğlu, T., Türüt, A., 2010. electronic properties of the metal/organic interlayer/inorganic semiconductor sandwich device. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 71, 351–356.
- Güzeldir, B., 2011. Sılar Tekniği ile Büyütülen Cds İnce Filmlerin Sandviç Tipi Devre Elemanları Yapımında Kullanılması ve Bu Yapıların Karakteristiklerinin incelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı.
- Güzeldir, B., Sağlam, M., Ateş, A., 2012. Preparation and characterization of CdSe, ZnSe and CuSe thin films deposited by the successive ionic layer adsorption and reaction Method. *Journal Of Optoelectronics and Advanced Materials*. 14. 3-4.
- Güzeldir, B., Sağlam, M., Ateş, A., 2011. Temperature dependent electrical characteristics of Cu/CuS/n-Si/Au-Sb structure deposited by SILAR method. *American Institute of Physics*. 1400, 56-59.
- Henisch, H.K., 1984. *Semiconductor Contacts*. Oxford University. London.
- Hudait, M.K. and Krupanidhi, S.B., 2001. Doping dependence of the barrier height and ideality factor of Au/n-GaAs Schottky diodes at low temperatures. *Physica B* 307 125-137.
- Hudait, M.K., Venkateswarlu, P., Krupanidhi, S.B., 2001. Electrical transport characteristics of Au/n-GaAs Schottky diodes on n-Ge at low temperatures. *Solid-State Electronics* 45, 133-141
- Kim G.S., Kim, S.W., Kim, S.H., Park, J., Seo, Y., Cho, B.J., Shin, C., Shim, J.H. and Yu, H.Y., 2016. Effective Schottky Barrier Height Lowering of Metal/n-Ge with a TiO₂/ GeO₂ Interlayer Stack. *Appl. Mater. Interfaces*. 8, 35419–35425
- Kundakçı, M., 2011. The annealing effect on structural, optical and photoelectrical properties of CuInS₂/In₂S₃ films. *Physica B: Condensed Matter*. 406, 2953-2961.
- Lindroos, S., Arnold, A., Leskela M., 2000. Growth of CuS thin films by the successive ionic layer adsorption and reaction method. *Applied Surface Science*. 158, 75-80.
- Merritt, E. 1925. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 11, 743.

- Metzner, H., Hahn, Th., Schmiga, Chr., Bremer, J.H., Borchert, D., Fahrner, W.R., Seibt, M., 1997. Epitaxial n-Si/p-CuInS₂ heterojunction devices. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 49, 337-342.
- Metzner, H., Hahn, Th., Schmiga, Chr., Bremer, J.H., Borchert, D., Fahrner, W.R., Seibt, M., 1997. Epitaxial n-Si/p-CuInS₂ heterojunction devices. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 49, 337-342.
- Milnes, A. G. and D. L. Feucht 1972. *Heterojunctions and Metal-Semiconductor Junctions*, Academic Press, New York.
- Mott, N. F. 1938. Note on the Contact between a Metal and an Insulator or Semiconductor, *Proc. Cambr: Philos. Soc.* 3, 4, 568.
- Neaman, D., 1992. *Semiconductor Physics and Devices*, R. R. Donnelley & Sons Company, Sydney.
- Özakın, O., Güzeldir, B., Yıldırım, M. A., Sağlam, M., Ateş, A., 2012. Influence of film thickness on structural and optical properties of ZnS thin films obtained by SILAR method and analysis of Zn/ZnS/n-GaAs/In sandwich structure. *Physica Status Solidi A*. 1-7.
- Özaydın, C., Akkılıç, K., İlhan, S., Rüzgar, Ş., Güllü, Ö., Temel, H., 2013. Characterization of an Au/n-Si photovoltaic structure with an organic thin film. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 16, 1125-1130
- Padovani, F. A. 1971. in *Semiconductors and Semimetals* 7 A, R.K. Willardson and A.C. Beer (eds.), Academic Press, New York, Chapter 2. Padovani
- Pinero J.C., Araujo, D., Fiori, A., Traore, A., Villar, M.P., Pernot, J., Teraji, T., 2017. Atomic composition of WC/ and Zr/O-terminated diamond Schottky interfaces close to ideality. *Applied Surface Science*. 395, 200-207.
- Rhoderick, E. H. 1978. *Metal-Semiconductor Contacts*, Clarendon Press, Oxford.
- Rhoderick, E. H. 1982. *Proc. IEEE* 129, 1.
- Rhoderick, E.H. and Williams, R.H. 1988. *Metal-Semiconductor Contacts*, 2nd Ed.(Clarendon, Oxford). 1-225.
- Rideout, V. L., 1978. A Review of The Theory, Technology and Application of Metal-Semiconductor Rectifiers. *Thin Solid Films*. 48, 261-266.
- Ruben, S. 1930. U. S. Patent Nos. 1, 171, 361 and 1, 751, 362.
- Sağlam, M. and Güzeldir, B., 2016. Time-dependent of characteristics of Cu/CuS/n-GaAs/In structure produced by SILAR method. *Materials Research Bulletin*. 81, 55-62.
- Sağlam, M., Ateş A., Güzeldir B., Yıldırım M. A., Astam A., 2008. Calculation from the current-voltage (I-V) and capacitance-voltage (C-V) measurements of characteristics parameters of MIS Schottky diode with CdS interface layer grown on n-Si substrate by SILAR method, *Microelectronic Engineering*, 85, 1831-1835.
- Sağlam, M., Ateş, A., Yıldırım, M.A., Güzeldir, B., Astam, A., 2010. Temperature dependent current-voltage characteristics of the Cd/CdO/n-Si/Au-Sb structure. *Current Applied Physics* 10, 513-520.
- Sanganmesha, M.A., Pushpalathon, K., Shekar, G.I., Shamsundar, S., 2013. Preparation and characterization of nanocrystalline CuS thin film for dye-sensitized solar cell, Hindawi Publishing Corporation, ISRN, Nanomaterials (doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/829430>, article ID: 829430, 8 pages).

- Sato, K., Yasamura, Y., 1985. Study of Forward I-V Plot for Schottky Diodes with Series Resistance. *J. Appl. Phys.*, 58(3), 3655
- Schottky, W., 1940. *Physik. Zeitschr.* 41, 570. Sects 1.1.1, 1.1, 2
- Schottky, W., 1942. *Z. Physik.* 118, 539. Sects 1.1.1, 1.1.5, 2.1, 2.2, 4.5.1
- Schottky, W., Spenke, E., 1939. Quantitative treatment of the space charge and boundary layer theory of the crystal rectifier. *Wiss. Veroff. Siemens-Werken.* 18, 225-291
- Schottky, W. 1938. Halbleitertheorie der Sperrschicht, *Naturwissenschaften* 26, 843.
- Schottky, W. 1939. Zur Halbleitertheorie der Sperrschicht- und Spitzengleichrichter. *Z. Phys.* 113, 367.
- Sharma, B.L. 1984. "Physics of Schottky Barrier Junctions", *Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their applications*, Plenum Press, New York and London, 1-56
- Tataroğlu A. and Altındal Ş. 2009. The analysis of the series resistance and interface states of MIS Schottky diodes at high temperatures using I-V characteristics. *Journal of Alloys and Compounds.* 484, 405-409
- Tecimer, H., Aksu, S., Uslu, H., Atasoy, Y., Bacaksız, E., Altındal, S., 2012. Schottky diode properties of CuInSe₂ films prepared by a two-step growth technique. *Sensors and Actuators A.* 185, 73-81
- Temirci, C., Gülcan, M., Goksen, K., Sönmez, M., 2010. Ohmic and rectifier properties of Al/Ligand(N-APTH) and Al/Cu(II)Complex contacts. *Microelectronic Engineering.* 87, 2282-2287.
- Tung, R. T., 1991. Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers. *Appl. Phys. Lett.*, 58, 2821-2823
- Tung, R.T., 2001. Recent advances in Schottky barrier concepts, *Mater. Sci. Eng. R.* 35, (1-3) 1-138
- Türüt, A., Sağlam, M., Efeoğlu, H., Yalçın, N., Yıldırım, M., Abay, B., 1995. Interpreting the nonideal reverse bias C-V characteristics and importance of the dependence of Schottky barrier height on applied voltage. *Physica B.* 205, 41-50.
- Wilmsen, C. W., 1985. *Physics and Chemistry of III-V Compound Semiconductor Interface* (New York: Plenum).
- Yıldırım, M. A., Ateş, A., Astam, A., 2009. Annealing and light effect on structural, optical and electrical properties of CuS, CuZnS and ZnS thin films grown by the SILAR method. *Physica E.* 41, 1365-1372.
- Yücel, Y., Yücel, E., Gökhan, D., 2015. Optimization and modelling of preparation conditions of CuS thin films deposited by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method using response surface methodology. *J Mater Sci: Mater Electron.* 26, 4105-4112.

ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında Erzurum’da doğdu. İlk ve ortaöğrenimini Erzurum’da tamamladı. 2005 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünü kazandı. 2009 yılında bu bölümden mezun oldu ve aynı yıl içerisinde Atatürk Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği Bölümü’nde Tezsiz Yüksek Lisans programına başladı. 2010 yılında bu bölümden mezun oldu. 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Katıhal Fiziği Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans yapmaya başladı.

