

**p-InSe:Mn YARIİLETKENİNİN  
SCHOTTKY KONTAK DAVRANIŞI**

**Zeynep ELKOCA**

**Yüksek Lisans Tezi  
Fizik Anabilim Dalı  
Doç. Dr. Songül DUMAN  
2010  
Her Hakkı Saklıdır**

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**p-InSe:Mn YARIİLETKENİNİN  
SCHOTTKY KONTAK DAVRANIŞI**

Zeynep ELKOCA

FİZİK ANABİLİM DALI

**ERZURUM**

2010

Her Hakkı Saklıdır

Doç. Dr. Songül Duman danışmanlığında, Zeynep ELKOCA tarafından hazırlanan bu çalışma 12/07/2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından, Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Yrd. Doç. Dr. Bekir GÜRBULAK

İmza:

Üye: Doç. Dr. Songül DUMAN

İmza:

Üye: Yrd. Doç. Dr. Duygu EKİNCİ

İmza:

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

(imza)

**Prof. Dr. Ömer AKBULUT**

**Enstitü Müdürü**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

p-InSe:Mn YARIİLETKENİNİN SCHOTTKY KONTAK DAVRANIŞI

**Zeynep ELKOCA**

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Songül DUMAN

Bu çalışmada, Bridgman-Stockbarger metoduyla büyütülmüş olan p-InSe:Mn yarıiletkeninin Schottky kontak davranışı incelenmiştir. Bu çalışma için öncelikle yarıiletkenin mat tarafına In buharlaştırılarak omik kontak yapılmış, sonra ise gerekli temizleme işlemlerinden geçirilmiş 12 farklı kontak materyali (Cd, Au, Mn, Zn, Co, Ag, Sn, Sb, Al, Au-Be, Au-Ge, Au-Zn) yarıiletkenin parlak yüzeyine buharlaştırılarak 1 mm çapında Schottky kontaklar elde edilmiştir. Elde edilen bu diyotların oda sıcaklığında akım-gerilim ( $I$ - $V$ ) karakteristikleri alınmış ve bu karakteristikler kullanılarak idealite faktörü ( $n$ ) ve engel yüksekliği değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca seri direnç etkisi göz önünde bulundurularak Cheung fonksiyonları yardımı ile seri direnç değerleri hesaplanmıştır.

**2010, 61 Sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** InSe:Mn Schottky Kontak, Akım-Gerilim Karakteristikleri, Seri Direnç, İdealite Faktörü, Schottky Engel Yüksekliği

## **ABSTRACT**

Master of Science Thesis

### **THE SCHOTTKY CONTACT BEHAVIOUR OF p-InSe:Mn SEMICONDUCTOR**

**Zeynep ELKOCA**

Atatürk University

Graduated School of Naturel and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Songül DUMAN

In this study, the Schottky contact behaviour of p-InSe:Mn semiconductor which has been grown by Bridgman-Stockbarger Method has been investigated. For this study first the ohmic contacts with In have been made to the matte faces of semiconductors; later Schottky contacts about 1 mm diameters have been made by using 12 different contact materials (Cd, Au, Mn, Zn, Co, Ag, Sn, Sb, Al, Au-Be, Au-Ge, Au-Zn) to the brilliant faces after passing through the necessary cleaning procedures. At the room temperature current-voltage ( $I$ - $V$ ) characteristics of this diodes have been taken and ideality factor ( $n$ ) and Schottky barrier height parameters have been calculated using this characteristics. Moreover thought of the effect of series resistance  $R_s$  values have been calculated by the help of Cheung Functions.

**2010, 61 Pages**

**Keywords:** InSe:Mn Schottky Contact, Current-Voltage Characteristics, Series Resistance, Ideality Factor, Schottky Barrier Height

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü'nde hazırlanmıştır. Çalışmalarım boyunca verdiği destek ve katkılarından dolayı kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Songül DUMAN'a ve çalışmalarım süresince bana yardımcı olan bilimsel görüşlerinden faydalandığım Sayın Yrd. Doç. Dr. Bekir GÜRBULAK'a teşekkür ederim.

Laboratuar çalışmalarım esnasında yardımlarından dolayı Sayın Doç. Dr. Seydi DOĞAN'a ayrıca bu çalışmamın gerçekleşmesinde bana imkan sağlayan bölüm başkanımız Sayın Prof. Dr. Abdülmecit TÜRÜT ve Fizik Bölümü elemanlarına, doktora öğrencisi Tuba Bahtiyari TEKLE'ye ve yardımlarından dolayı Sayın Yrd. Doç. Dr. Bülent ÇETİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Bana bugüne kadar emeği geçmiş olan tüm hocalarıma, desteğini hiç esirgemeyen kıymetli aileme ve özellikle babama teşekkür ederim.

Zeynep ELKOCA

Temmuz 2010

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
<b>1.GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL TEMELLER.....</b>	<b>10</b>
2.1. Giriş.....	10
2.2. Yarıiletken Malzemeler.....	11
2.3. Katkılı Yarıiletkenler.....	12
2.3.a. p-tipi yarıiletkenler.....	13
2.3.b. n-tipi yarıiletkenler.....	14
2.4. Seri Direnç Etkisi.....	16
2.5. Omik Kontaklar.....	17
2.6. Omik Kontak Elde Etme Yolları.....	18
2.7. Metal-Yarıiletken Schottky Diyotlar.....	18
2.7.a. Metal-p-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar.....	19
2.7.b. Metal-p-tipi yarıiletken omik kontaklar.....	22
2.8. Metal (Omik)/p-Tipi Yarıiletken/Metal (Doğrultucu) Yapısı.....	23
2.9. Schottky Diyotlarda Termoyonik Emisyonla Akım İletimi.....	24
2.10. Seri Direnç Hesaplama Yöntemleri.....	25
2.11. Cheung Fonksiyonları Yardımı ile Schottky Diyot Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	26
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>28</b>
3.1. Giriş.....	28
3.2. Numunelerin Özellikleri.....	28
3.3. InSe Yarıiletkeninin Faz Diyagramı.....	29
3.4. InSe Yarıiletken Bileşiklerin Band Yapısı.....	30

3.5. Numune Hazırlanması ve Temizlenmesi.....	31
3.6. Metal/p-InSe:Mn/Metal Diyotlarının Hazırlanması.....	32
3.6.a. Omik kontak yapılması.....	33
3.6.b. Schottky kontak yapılması.....	34
3.7. I-V Karakteristiği Ölçümü.....	34
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI</b> .....	<b>36</b>
4.1. Giriş.....	36
4.2. Metal/p-InSe:Mn/Metal Schottky Diyodunda Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri ve Bazı diyot Parametrelerinin Hesaplanması.....	36
4.2.a. İdealite faktörünün hesaplanması.....	36
4.2.b. Engel yüksekliğinin hesaplanması.....	37
4.3. Cheung Fonksiyonları Yardımıyla Diyot Parametrelerinin Hesaplanması.....	47
<b>5. TARTIŞMA ve SONUÇ</b> .....	<b>55</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>57</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>62</b>



## SİMGELER DİZİNİ

<b>A</b>	Diyodun etkin alanı
<b>A*</b>	Richardson sabiti
<b>°C</b>	Santigrad derece
<b>E</b>	Elektron yükü
<b>eV</b>	Elektron volt
<b>E<sub>c</sub></b>	İletkenlik bandının enerjisi
<b>E<sub>f</sub></b>	Fermi enerji seviyesi
<b>E<sub>g</sub></b>	Yasak enerji aralığı
<b>E<sub>v</sub></b>	Valans bandının enerjisi
<b>H</b>	Planck sabiti
<b>h</b>	Planck sabitinin $2\pi$ 'ye bölümü
<b>I<sub>0</sub></b>	Satürasyon (Doyma) akımı
<b>J</b>	Akım yoğunluğu
<b>J<sub>0</sub></b>	Ters doyma akım yoğunluğu
<b>J<sub>m→s</sub></b>	Metalden yarıiletkene doğru akan akım yoğunluğu
<b>J<sub>s→m</sub></b>	Yarıiletkenden metalde doğru akan akım yoğunluğu
<b>k</b>	Boltzmann sabiti
<b>K</b>	Kelvin
<b>m<sub>e</sub></b>	Elektronun kütlesi
<b>n</b>	İdealite faktörü
<b>Nm</b>	Nanometre
<b>R<sub>s</sub></b>	Seri direnç
<b>T</b>	Mutlak sıcaklık
<b>χ<sub>s</sub></b>	Yarıiletkenin elektron ilgisi
<b>Φ<sub>m</sub></b>	Metalin iş fonksiyonu
<b>Φ<sub>s</sub></b>	Yarıiletkenin iş fonksiyonu

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. p-tipi yarıiletkenin bağ yapısı (Bor atomu katkılanmış bir silisyum örgünün iki boyutlu görünümü).....	13
Şekil 2.2. p-tipi bir yarıiletkenin enerji-bant diyagramı.....	14
Şekil 2.3. n-tipi yarıiletkenin bağ yapısı (Fosfor atomu katkılanmış bir silisyum örgünün iki boyutlu görünümü).....	15
Şekil 2.4. n-tipi bir yarıiletkenin enerji-bant diyagramı.....	16
Şekil 2.5. Metal-yarıiletken kontakta seri direncin etkisi.....	17
Şekil 2.6. Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontağın enerji-bant diyagramı.....	20
Şekil 2.7. Metal/p-tipi omik kontağın enerji-bant diyagramı.....	22
Şekil 2.8. P <sup>+</sup> PM yarıiletken diyot yapısının termal dengede enerji-bant diyagramı.....	23
Şekil 3.1. InSe yarıiletken bileşiğinin faz diyagramı.....	29
Şekil 3.2. $\epsilon$ -InSe yarıiletken bileşiğinin band yapısı.....	30
Şekil 3.3. InSe yarıiletken bileşiğinin birim hücrenin perspektif görünüşü.....	31
Şekil 3.4. Diyot yapmak için kullanılan kaplama ünitesi.....	32
Şekil 3.5. Omik kontak yapmak için kullanılan tavlama fırını.....	33
Şekil 3.6. Omik kontak termal işlemi için fırın ve kontrol ünitesi şeması.....	34
Şekil 4.1. Ag/p-InSe:Mn diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği.....	39
Şekil 4.2. Al/p-InSe:Mn diyodunun diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği.....	39
Şekil 4.3. Au-Be/p-InSe:Mn diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği.....	40
Şekil 4.4. Au-Ge/p-InSe:Mn diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği.....	40
Şekil 4.5. Au/p-InSe:Mn diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği.....	41
Şekil 4.6. Au-Zn/p-InSe:Mn diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem	41

akım-gerilim karakteristiği.....	
Şekil 4.7. Cd/p-InSe:Mn diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği.....	42
Şekil 4.8. Co/p-InSe:Mn diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği.....	42
Şekil 4.9. Mn/p-InSe:Mn diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği.....	43
Şekil 4.10. Sb/p-InSe:Mn diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği.....	43
Şekil 4.11. Sn/p-InSe:Mn diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği.....	44
Şekil 4.12. Zn/p-InSe:Mn diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği.....	44
Şekil 4.13. Metal/p-InSe:Mn diyotlarının oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristikleri.....	45
Şekil 4.14. Al/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında $dV/d(\ln I)$ -I ve H(I)-I grafiği.....	48
Şekil 4.15. Ag/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında $dV/d(\ln I)$ -I ve H(I)-I grafiği.....	48
Şekil 4.16. Au/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında $dV/d(\ln I)$ -I ve H(I)-I grafiği.....	49
Şekil 4.17. Au-Be/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında $dV/d(\ln I)$ -I ve H(I)-I grafiği.....	49
Şekil 4.18. Au-Ge/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında $dV/d(\ln I)$ -I ve H(I)-I grafiği.....	50
Şekil 4.19. Au-Zn/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında $dV/d(\ln I)$ -I ve H(I)-I grafiği.....	50
Şekil 4.20. Cd/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında $dV/d(\ln I)$ -I ve H(I)-I grafiği.....	51
Şekil 4.21. Co/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında $dV/d(\ln I)$ -I ve H(I)-I grafiği.....	51

Şekil 4.22. Mn/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında $dV/d(\ln I)$ -I ve H(I)-I grafiği.....	52
Şekil 4.23. Sb/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında $dV/d(\ln I)$ -I ve H(I)-I grafiği.....	52
Şekil 4.24. Sn/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında $dV/d(\ln I)$ -I ve H(I)-I grafiği.....	53
Şekil 4.25. Zn/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında $dV/d(\ln I)$ -I ve H(I)-I grafiği.....	53

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Metal/p-InSe:Mn diyoduna ait $\ln I-V$ grafiklerinden elde edilen temel diyot parametreleri.....	46
Çizelge 4.2. Cheung fonksiyonları kullanılarak hesaplanan metal/p-InSe:Mn diyotlarına ait bazı parametreler.....	54

## 1. GİRİŞ

1900'lü yılların başlangıcında yarıiletken malzeme kullanılarak yapılan ilk pratik devre elemanı metal/yarıiletken kontaklardır. Katıhal fiziğinin teknolojiye getirdiği belki de en büyük katkı, yarıiletken malzemelerin elektronikte kullanılmasıdır. Metal-yarıiletken kontakların önemli bir uygulama alanı bütün aktif yarıiletken devre elemanlarında kullanılan doğrultucu özellikte olmayan omik kontaklar (Rideout 1978) ve elektronik devre elemanları teknolojisinde önemli bir yere sahip olan Schottky kontaklardır.

Günümüzde vakum teknolojisi sayesinde geçmiş çalışmalardaki başarısızlıklar bertaraf edilmiş olup, güvenilir bir şekilde bu metal/yarıiletken kontakları üretmek daha kolay bir hal almıştır. Schottky diyotların ters yöne doğru akan azınlık taşıyıcıları çok az olduğundan ters yön akımı oldukça küçüktür. Bu nedenle de gürültü seviyeleri düşük, verimleri yüksektir (Li 2006). Birbirinden farklı iki ayrı gruba ait elemanlardan oluşmaları sebebiyle dirençleri lineer değildir.

Schottky kontak yapısı, yarıiletken teknolojisinin gelişmesi ve her geçen gün önemini artırması ile çok farklı kullanım alanları bulmaktadır. Bu devre elemanlarından öncelikle hızlı anahtar uygulamaları, modülatör, dedektör ve kondansatör uygulamalarında faydalanılmaktadır. Başlangıçta radyo dedektörü, daha sonraları radar dedektörü ve mikrodalga diyodu olarak geliştirilen metal-yarıiletken yapılar günümüzde de başarıyla kullanılmaktadırlar. Düşük engel yüksekliğine sahip Schottky diyotlar, kızılötesi (infrared) ve nükleer parçacıklı dedektörler, transistör kapıları, mikrodalga diyotlar, termal görüntüleme sensör olarak ve çok düşük sıcaklıklarda çalışan infrared dedektörleri gibi kriyojenik (soğuk) sıcaklıklarda çalışan aygıtlarda uygulamalar bulmuş ve elektronik aletlerde önemli roller üstlenmişlerdir (Bardeen 1947; Schmitsdorf *et al.* 1997; Chand and Bala 2005; Asubay 2008).

Yarıiletken teknolojisinde kendisine olan has özelliklerinden dolayı ikili bileşiklere de bir ilgi söz konusudur. Bu ikili bileşiklerden  $A^{III}B^{VI}$  bileşikleri tabakalı ve zincirli

yapıda olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Bu ikili yarıiletkenlerden tabakalı yarıiletken sınıfına ait olan InSe yarıiletkenleri, hem ince film olarak hem de tek kristal olarak aygıt uygulamaları için bazı özelliklerinden dolayı son yıllarda oldukça ilgi çekmiştir. InSe yarıiletkeni; oda sıcaklığında 1,24 eV'luk bir enerji aralığına,  $660\pm 5^\circ\text{C}$ 'lik erime sıcaklığına ve eksiton enerji seviyelerine sahiptir. Isıya ve ışığa duyarlıdır. Güneş enerjisi ile çalışan aletlerde, elektronik teknolojisinde kapasitör ve mikro batarya gibi mikro devre elemanlarında temel malzeme olarak kullanılmaktadır. GaAs teknolojisine göre de daha ucuzdur (Ateş vd 2001).

Son yıllarda yarıiletken ikili bileşiklere dayalı olan güneş pilleri de gittikçe ilgi çekmektedir (Khare *et al.* 1990). Güneş enerjisi dönüşümleri ile ilgili olarak, optoelektronik aygıtlarda InSe yarıiletkeninin mümkün uygulaması görünür bölgededir ve güneş pili olarak kullanılabilir (Amato *et al.* 1984; Damodara Das *et al.* 1997; Atsufumi *et al.* 2006). Güneş pillerinin performans hesabı için öncelikle başvuru metodlarından birisi Monte Carlo Metodu'dur. Bu içerik olarak birkaç konuyla ilgili tarihçe ve de teoriye uygun Schottky bariyer sonuçlarından ibarettir. Bu metodun mümkün uygulaması şudur ki numerik metodlara kıyasla güneş pilleri hakkında daha fazla bilgi verebilmektedir (Manfredotti and Meliga 1983).

$A^{III}B^{VI}$  tipi yarıiletkenlerin optik ve elektriksel özelliklerinin bilinmesi yanında, öncelikli olarak, bu kristallerin büyütülmesi de önemlidir. Elde edilen kristallerin kullanılabilir özelliklerde, tek doğrultuda büyütülmesi ve boyutlarının en azından araştırma yapılabilecek ve devre elemanı olarak kullanılacak büyüklükte olması gerekmektedir. İndiyummonoselenit yapısı ilk olarak Schubert *et al.* (1954), tarafından incelenmiştir. InSe kristalinin rombohedral yapıda büyüdüğünü ve latis parametrelerinin  $a=4,02 \text{ \AA}$ ,  $c=25,05 \text{ \AA}$ ,  $z=6$  olduğunu belirtmişlerdir. De Blasi *et al.* (1982), InSe numunesini Bridgman-Stockbarger metoduyla büyütürken In molar kesrini %51 ve %55 arasında %1'lik adımlarla değiştirerek en iyi kristallerin molar olarak %52 In ve %48 Se içeren molar karışımdan elde edileceğini belirtmişlerdir. Elde edilen bütün kristallerin, elektron kırınımı ile hegzagonal yapıya sahip olduğu ve elektron

mikroskobu ile incelenme neticesinde en iyi kristallerde bile dislokasyonların olduğunu belirtmişlerdir.

Shigetomi *et al.* (1991), InSe filmlerini vakumda buharlaştırma tekniği ve rf-sputtering tekniği ile büyütmüş ve tavlama sıcaklığının bir fonksiyonu olarak optik soğurmasını incelemiş ve X-Ray kırınım desenini elde etmişlerdir. Vakumda 400°C'de tavllanmış filmlerin oda sıcaklığında yaklaşık olarak 1,39 eV'luk yasak enerji aralığına sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Gürbulak (1997) tarafından yapılan çalışmada ikili (InSe, GaSe vs) ve üçlü (TlGaS, TaGaSe<sub>2</sub> vs) tek kristaller büyütülmüş, büyütülen bu kristallere nadir toprak elementleri (NTE) katkılanmış ve katkılı ve de katkısız kristallerin soğurma ölçümleri alınmıştır.

Shigetomi *et al.* (2002) çalışmalarında Sn katkılanmış InSe tek kristallerini Bridgman tekniği ile büyütmüş ve Sn katkı konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak PL ve PC spektrumlarını incelemişlerdir. Shigetomi and Ikari (2003) çalışmalarında; Sn ve As katkılı InSe kristallerini Bridgman tekniği ile büyütmüş ve bu numunelerin elektriksel ve optiksel özelliklerini incelemişlerdir.

Ateş *et al.* (2004) çalışmasında Bridgman-Stockbarger metoduyla büyütülmüş farklı Ho konsantrasyonları ile katkılanmış InSe tek kristalinde öz direnç ve Hall effect ölçümleri alınmıştır.

Sanchez-Royo *et al.* (2007) bu çalışmada InSe/M (M=Pd, Au) arayüzeylerinin elektronik özellikleri x-ışınımı fotoemisyon ölçümleriyle çalışılmıştır. InSe/Pd arayüzeyi için, Pd kaplamasındaki Pd atomlarının erken evrede InSe örgüsünün içine difüze olduğu ve de akseptör merkezleri gibi davrandıkları sonucu bulunmuştur.



Kovalyuk *et al.* (2009) bu çalışmalarında p-n-InSe numunesi üzerine  $\gamma$ -irradiasyonu (ışını) ( $E=3$  MeV) gönderilerek elektriksel ve fotoelektrik parametreleri üzerindeki etkisi ve asal oksit-p-InSe fotodönüştürücüleri araştırılmıştır. Akım-voltaj karakteristiğinde tespit edilen değişiklikler radyasyonun nokta kusurlarını indüklemesiyle izah edilmiştir.

InSe; fotovoltaiik uygulamalarda (Guesdon *et al.* 1987), fotodiyotlarda ve anahtarlama devrelerinde (Kenawy *et al.* 1991) geniş bir uygulama alanına sahiptir. Son yıllarda, katihal iyonik iletkenlerin kullanıldığı mikrobataryalar ve kapasitörler gibi mikro aygıtlarda, ticari ve endüstriyel uygulamalar kadar fotoiletkenlikte de polikristal indiyumselenit materyallerin potansiyel uygulamaları mevcuttur (Micocci *et al.* 1995). Düşük yoğunlukta arayüzey hallerinden dolayı, p-n ve hetero-eklemler için gelecek vadeden bir materyaldir. Tabaka düzlemleri boyunca kolayca yarılar ve kimyasal dağlama veya mekanik parlatma işlemleri yapılmaksızın son derece düzgün ve parlak yüzeyler elde edilebilmektedir. İki boyutlu davranışı, pek çok bakımdan üç boyutlu yarıiletkenlerin yüzey özelliklerine benzerdir. Mekanik olarak zayıf olması, mekaniksel olarak numune hazırlama aşamasında kristallerde çatlaklar veya distorsiyonlar (yüzeysel bozuntu) oluşması, derin tuzak seviyeleri olarak davranan çok sayıda kusur içermesi ise InSe yarıiletkeninin uygulamalarda sahip olduğu birtakım dezavantajlar olarak belirtilebilir (Hasegawa and Abe 1982; Segura *et al.* 1983).

Metal-yarıiletken yapılarının tam ideal yapılmaları imkânsızdır. Metal ve yarıiletken arasında bir oksit tabakasının oluşması, arayüzey hallerinin oluşması ve seri direncin olması hallerinde diyot idealden sapacaktır. Bu yüzden yarıiletken cihazların büyük çoğunluğunu anlayabilmek için yüzey veya arayüzey dolaylarındaki yük taşıyıcılarının davranışını incelemek gereklidir. Metal/yarıiletken kontakların elektriksel iletkenlik özelliklerinden yeterince faydalanmak, uygun kontaklar yaparak uygun elektronik devrelerde kullanımını sağlamak için onların karakteristiklerinin iyi araştırılması ve incelenmesi gereklidir.

İlk metal/yarıiletken yapı, nokta kontak diyotlardır. Bu yapılar yarıiletken malzemenin yüzeyine ince sivriltilmiş bir telin kontak haline getirilmesiyle elde edilmiştir. Nokta kontak diyotların en gelişmiş şekli Schottky diyot olarak adlandırılır. Schottky diyotların önemini ise yapımlarının kolaylığı ve de karakteristiklerinin çoğunlukla bilinmesi artırmıştır. Schottky engel diyotların nokta kontak diyotlara göre önemli avantajları vardır. Schottky engel diyot daha düşük seri direnç, daha düşük gürültü karakteristiği ve yüksek güç kapasitesine sahip bulunmaktadır (Li 2006). İkinci Dünya Savaşı döneminde, mikrodalga radarlarının gelişmesiyle nokta kontak diyotları, daha çok frekans dönüştürücüsü olarak ve mikrodalga dedektör diyodu olarak gündeme gelmiştir.

Teknolojik önemlerinden dolayı, MS (metal-yarıiletken) kontak aygıtların en basiti olan Schottky engel diyotların, elektriksel özellikleri yapısının tam olarak anlaşılması büyük bir öneme sahiptir (Sze 1981; Bobo *et al.* 2004). MS kontakların arayüzey özelliklerinin, aygıtların performans, güvenilirlik ve kararlılığı üzerine baskın bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir (Song *et al.* 1986; Chand and Bala 2005). Arayüzey hallerinin incelenmesi Schottky engel diyotlarının elektriksel özelliklerinin anlaşılması bakımından önemlidir.

Arayüzey hallerine, 1) Metal ile kontakta önce yarıiletken ve vakum seviyeleri arayüzeyinde mevcut olan asal yüzey halleri olarak rastlanabilir. Bu durum genellikle yarıiletken kristalin periyodik yapısının yüzeyde keskin bir şekilde son bulmasından ortaya çıkar. 2) Metal ile kontakta sonra oluşan asal olmayan yüzey halleri şeklinde de rastlanabilir. Bu hal genelde kontak yapılan yüzeylerin yeteri kadar temiz olmayışından, yabancı atomların varlığından dolayı oluşur. 3) Kontak yapan metal ve yarıiletken gövdesinde bulunan kusur ve safsızlıktan oluşan asal olmayan yüzey halleridir. Bu haller, yarıiletken yüzeyine metal buharlaştırdıktan sonra, yarıiletkenin üzerinden ince bir oksit tabakası ile metalden ayrılırlar. Bu durumda bu hallerin yarıiletkenle dengede olduğu kabul edilir. Bunlar Schottky diyod karakteristiklerinin beklenenden farklı çıkmasına, deneysel ve teorik sonuçların farklılık göstermesine neden olur. Arayüzey

tabakası gibi seri direnç de Schottky diyodların elektriksel karakteristiklerinin ideal olmamasına sebep olur (Ayyıldız vd 2001).

Metal-yarıiletken kontaklardaki doğrultma özelliği ilk olarak 1874'te Braun tarafından tasvir edilmiştir. Bu gözlemin açıklaması Schottky sayesinde olmuştur. Schottky (1938) yarıiletken tarafındaki arayüzeyde mevcut bulunan deplasyon tabakasını kanıtlamıştır. Böyle kontaklarda karşılıklı akım taşınımı engel yüksekliğiyle açıklanır. Schottky modeline göre, Schottky diyotların engel yükseklikleri metalin iş fonksiyonuna bağlıdır (Sze 1981; Mönch 1994).

Schottky kontakları, onların etkin engel yükseklikleri ve idealite faktörlerinden faydalanarak karakterize edilebilir. Bu nicelikler birbiriyle yakından ilgilidir. Bu ilgi, küçük engel yüksekliklerinin büyük idealite faktörü ile ilişkili olduğu, şeklinde ifade edilmiştir (Mönch 1999).

Tung (2001), Schottky diyotlarla yaptığı çalışmalarda, Schottky engelli diyotlarda deneysel olarak elde edilen  $I-V$  karakteristiklerinin bazen termoiyonik emisyon modeli ile uyuşmayabileceğini ifade etmiştir. İdealite faktörü yaklaşık 1,03'ten büyük olması durumunun, termoiyonik emisyon modeli ile direkt olarak açıklanamayacağını ve genellikle Schottky engel yüksekliğinin uygulanan gerilime bağlılığına atfedileceğini açıklamıştır. Ayrıca idealite faktörünün birden daha büyük çıkması; imaj kuvvetinin etkisiyle engelin azalması, generasyon-rekombinasyon akımları, arayüzey halleri ve tünelleme gibi mümkün mekanizmalara da atfedilmiştir.

SB (Schottky engel) değerlerinin, kullanılan ölçüm metodları ve katkı seviyesine bağımlılığı ve Schottky diyotların ideal olmayan davranışlarını açıklamak için MS arayüzeylerde Schottky engellerinin inhomojenliği önemli bir faktör olarak düşünülmüştür (Anand *et al.* 1996). Balistik Elektron Mikroskobu çalışmaları neticesinde, Schottky diyotlarında engel yüksekliklerinin bir Gaussian dağılıma sahip olduğu düşüncesi desteklenmiştir (Kampen and Mönch 1995). Yüksek engelli

yarıiletken-metal kontakların yüzeyi üzerinde, düşük engel yükseklikli bölgeler boyunca akım yoğunluğunun bu bölgelerin uzaysal boyutlarının bir fonksiyonu olmasından dolayı, inhomojen engel yüksekliklerine sahip yarıiletken-metal kontakların elektriksel davranışı teorik (Im *et al.* 2001) ve deneysel (Osvold and Horvath 2004) ilgi çekmiştir. Schottky engel diyotların akım voltaj  $I-V$  karakteristiklerinin sadece oda sıcaklığında analizi, onların iletim işlemleri hakkında veya metal-yarıiletken arayüzeyinde engel oluşumunun yapısı hakkında detaylı bilgi vermez (Chand and Bala 2005).  $I-V$  karakteristiklerinin sıcaklığa bağımlılığı iletim mekanizmasının farklı yönlerinin anlaşılmasına izin verir (Jiang *et al.* 2003). Termoionik yayınlama teorisine dayanan Schottky engel diyotların  $I-V$  karakteristiklerinin analizinde genellikle sıcaklığın azalması ile idealite faktöründe ( $n$ ) bir artış ve engel yüksekliğinde ( $\Phi_b$ ) anormal bir azalma gözlemlenmiştir (Zhu *et al.* 2000).

Duman *et al* (2007) yapmış olduğu çalışmada; Bridgman-Stockbarger metoduyla büyütülmüş n-InSe ve n-InSe:Sn yarıiletken kristallerinin sıcaklığa bağlı optik soğurma ölçüleri 10-320 K sıcaklık aralığında, 10 K'lik adımlarla alınmıştır. Eksiton enerjisinin ve yasak enerji aralığının sıcaklığa bağlı değişimi incelenmiştir. Au-Ge/n-InSe:Sn/In diyodunun akım-gerilim ( $I-V$ ) karakteristikleri 80-320 K sıcaklık aralığında 20 K'lik adımlarla tayin edilmiştir. Sıcaklığın azalması ile idealite faktöründe artma, engel yüksekliğinde ise azalma gözlemlenmiştir. Bu davranış metal-yarıiletken arayüzeylerde engel yüksekliğinin Gaussian dağılıma sahip olduğu varsayılarak engel inhomojenliğine atfedilmiştir. Oda sıcaklığında Au-Ge/InSe(:Sn)/In Schottky diyodunun engel yüksekliğinin  $0,70 \pm 0,01$  eV olduğu gözlemlenmiştir. Au-Ge/InSe(:Sn)/In kontağının sıcaklığa bağlı  $I-V$  karakteristiğinden engel yüksekliği  $\Phi_b$   $0,94 \pm 0,02$  eV ve  $0,58 \pm 0,02$  eV; Richardson sabiti  $A^*$  ise  $27 \pm 2$  ve  $21 \pm 1$  ( $A/cm^2K^2$ ) değerlerine sahiptir. Bu da grafik eğrisinden hesaplanmıştır. n-tipi InSe için Richardson sabitinin değeri bilinen değerinden 2 kat daha büyük bulunmuştur.

Literatürde metal/n tipi veya p tipi InSe yarıiletkeni Schottky diyotlar için yapılmış çok az çalışma mevcuttur. Au-Ge/p-InSe: Cd, Al/p-InSe: Cd ve de Au/n-InSe: Er için elde edilmiş engel yüksekliği değerleri 0,70 eV (Duman *et al.* 2007); 0,63 eV (Micocci *et al.*

1991); 0,57 eV (Abay *et al.* 1997) olarak *I-V* ölçümlerinden hesaplanmıştır. Bi/p-InSe için 0,70 eV; Pt/n-InSe için ise 1,05 eV (Segura *et al.* 1983) değerleri ise *C-V* ölçümlerinden hesaplanmıştır. Zaoui *et al.* (1988) Au/InSe arayüzeyinin oluşumu üzerine çalışmış ve Schottky engel yüksekliğini 0,70 eV olarak ölçmüştür.

Duman *et al.* (2009), Au-Be /p-tipi InSe: Cd Schottky diyodunun 296 K sıcaklıkta ve karanlık ortamda *I-V*, *C-V* ve de *C-f* ölçümlerini almışlar ve termoiyonik emisyon teorisine dayanarak deneysel *I-V* karakteristiğinden faydalanarak idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerini hesaplamışlardır. Au-Be/p-InSe: Cd için *I-V* grafiğinden hesaplanan BH değeri 0,74 eV ile 0,82 eV arasında; idealite faktörü değeri ise 1,49 ile 1,11 arasında değerler almıştır. Yüksek akım değerlerinde seri direnç etkisi gözlemlenmiştir. *I-V* karakteristiklerinden, Cheung ve Norde metodları kullanılarak seri direnç değerleri hesaplanmıştır.

Abay *et al.* (2000) (MPP)/n-InSe:Er diyodunun oda sıcaklığında *I-V* ve *C-V* karakteristiklerini incelemişlerdir. Diyot 1'den daha büyük bir idealite faktörü vererek ideal olmayan bir *I-V* karakteristiği göstermiştir.

Hasegawa and Abe (1982) yaptıkları çalışmada Au/InSe Schottky diyodunun çeşitli sıcaklıklarda düz beslem akım-voltaj karakteristiğini ve engel kapasitesinin frekansa bağımlılığını incelemişlerdir. Engel kapasitesi üzerinde elektron tuzaklarının etkisi incelenmiştir. Engel yüksekliği  $(0,48 \pm 0,03)$  V olarak belirlenmiştir. Yüzeyi üzerine yarı şeffaf altın film kaplanması ile Au/InSe Schottky diyodunda fotovoltajik spektrum alınmış ve soğurma kıyısının 1,2 eV civarında olduğu belirtilmiştir. Bu, temel soğurma kıyısı civarında eksiton enerjisine karşılık gelmiştir. Au/InSe Schottky diyodunda enerji dönüşümünün verimliliği %2 oranında olmuştur. Pt/InSe'ler, belirli numunelerde 0,63 eV engel yüksekliği ile doğrultucu karakteristik sergilemiştir.

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada InSe:Mn yarıiletkeni üzerine In metali ile omik ve farklı kontak metalleriyle Schottky kontak yapılarak akım-voltaj karakteristiği her bir numune için incelenmiştir. Bu tezin birinci bölümü; konu ile ilgili

literatür taraması ve bu konunun amacını belirten “giriş”, ikinci bölümü; “kuramsal temeller”, üçüncü bölümü; numune hazırlanması ve deney sistemini içeren “materyal ve yöntem”, dördüncü bölümü; *I-V* ölçümlerinden faydalanılarak bulunan temel diyot parametrelerini içeren “araştırma bulguları” ve de beşinci bölümü ise ölçümlerin değerlendirilmesi sonucunda elde edilen parametre ve bilgilerin yorumlanmasını içeren “tartışma ve sonuç” tan oluşmaktadır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Giriş

Günümüzde elektronik aletlerin büyük bir bölümü doğru akımla çalışmaktadır. Elektronik sistemlerde alternatif akımı doğru akıma çeviren bu işlem, diyotlarla gerçekleştirilmektedir. n-tipi bir yarıiletkenle p-tipi bir yarıiletkenin atomik boyutlarda üst üste gelmesiyle p-n eklem diyodu, bir metal ile bir yarıiletkenin belirli koşullar altında kontak haline getirilmesi ile de Schottky diyodu elde edilir. p-n eklemde akım azınlık taşıyıcıları ile sağlanırken, Schottky diyotlarda ise akım çoğunluk taşıyıcıları ile sağlanmaktadır. Dolayısıyla metal-yarıiletken kontaklar yarıiletken devre elemanlarında büyük bir öneme sahiptir.

Kontağın ideal olması kontak malzemenin yüzeylerinin temiz ve pürüzsüz olmasıyla doğrudan ilişkilidir (Crowel and Sze 1965). Schottky diyotların karakteristik parametrelerinin anlaşılabilmesi, yalıtkan ve yarıiletken kristallerin iletkenlik özelliklerinin anlaşılabilmesinin bir yolu da kristale uygun kontakların yapılmasıdır. Bu tür doğrultucu eklemlerden diyotlar, transistörler, tünel diyotlar, Schottky diyotları yapılmaktadır. Arayüzeyin karakteristiklerine bağlı olarak ya bir Schottky engeli ya da bir omik kontak gibi davranırlar.

Kontak haline getirilen iki iletken, aralarındaki yük alışverişinden sonra denge durumuna gelirler ve bu da her iki maddenin fermi seviyelerinin eşitlenmesi şeklinde gerçekleşir. Bu kural sadece iki iletken arasındaki kontak durumunda değil, bir iletken ve de bir yarıiletken (n-tipi veya p-tipi) arasındaki kontak durumunda da meydana gelmektedir. Oluşan bu kontak elektronların her iki yönde serbestçe hareket edebilmeleri nedeniyle omik kontak olarak adlandırılır. Şayet kontağı oluşturan maddelerden biri metal diğerinin yarıiletken olması durumunda oluşacak kontak omik ya da doğrultucu olabilir. Doğrultucu kontak durumunda elektronlar bir yönde kolayca hareket ederken ters yöndeki geçişleri, kontak bölgesinde oluşan potansiyel engeli

nedeniyle zorlaşır. Bu durum ise her iki maddenin elektronik enerji-bant diyagramı ile yakından ilişkilidir (Ziel 1968).

## 2.2. Yarıiletken Malzemeler

Elektriksel ve optik özelliklerine göre katılar iletkenler, yalıtkanlar ve yarıiletkenler olmak üzere üç grupta incelenirler. Bu ayrılan grupların enerji-bant yapıları arasında temel farklılıklar bulunmaktadır. Valans bandı tamamen dolu ve iletim bandı tamamen boş ise böyle katılara “yalıtkanlar” adı verilmektedir. Yalıtkanların yasak enerji aralığı geniştir ve oda sıcaklığında elektronların valans bandından iletkenlik bandına geçmeleri oldukça zordur. Bu nedenle yalıtkan malzemeler elektriği iletmezler. Yasak enerji aralığı olmayan yani valans ve iletkenlik bantları üst üste çakışık olan katılara da “iletkenler” adı verilmektedir. Bu malzemeler ise elektriği iyi iletirler. Yarıiletkenlerin ise yasak enerji aralığı öyle bir değere sahiptir ki, ısıl uyarılma ile erime noktalarının altındaki sıcaklıklarda bile elektriksel iletkenlik gösterirler. Bu nedenle oda sıcaklığında yarıiletkenlerde elektronlar valans bandından iletim bandına geçebilirler ve iletim sağlayabilirler.

Yarıiletkenlerin karakteristik özelliklerinden birisi de sıcaklık mutlak sifıra ( $T=0 K$ ) yaklaşırken direncinin oldukça yüksek bir değere ulaşarak yarıiletkenin yalıtkan özellik göstermesidir. Mutlak sifirda yarıiletkenler mükemmel yalıtkan özellik gösterirler. Yani yarıiletkenler, metaller ve yalıtkanlar arasında elektriksel iletkenliğe sahip bir malzeme grubuna sahiptir. Elektriksel iletkenlikleri  $10^3$ - $10^8 (\Omega\text{-cm})^{-1}$  aralığında  $10^{11}$  merteye değişebilen malzemelerdir. Bu malzemelerin iletkenliği sıcaklığa, optik uyarılmaya, katkı konsantrasyonuna hassas bir şekilde bağlıdır. Bu elektriksel özelliklerin büyüklüğünün hassas bir şekilde değişmesi yarıiletken malzemeleri elektronik devre uygulamaları için ana malzeme yapmaktadır.

Yarıiletken malzemeler periyodik tablonun IV. kolonunda bulunan tek tür atomlardan oluşmuş “elementer yarıiletkenler” ve III-V veya II-VI kolonlarında bulunan



elementlerin iki veya daha fazla kombinasyonlarından oluşan “bileşik yarıiletkenler” olmak üzere ikiye ayrılırlar. Tek cins atomların birleşmesiyle oluşan element malzemelere örnek Si ve Ge'dur. Ayrıca III. Gruptan In ile VI. Gruptan Se'nin bileşiği ikili (binary, InSe), üç elementin üçlü (ternary, TlGaSe<sub>2</sub>, TlGaS<sub>2</sub>), dört elementin dörtlü (quaternary, InGaAsP) grupları da bileşik yarıiletkenlere örnek olarak verilebilir.

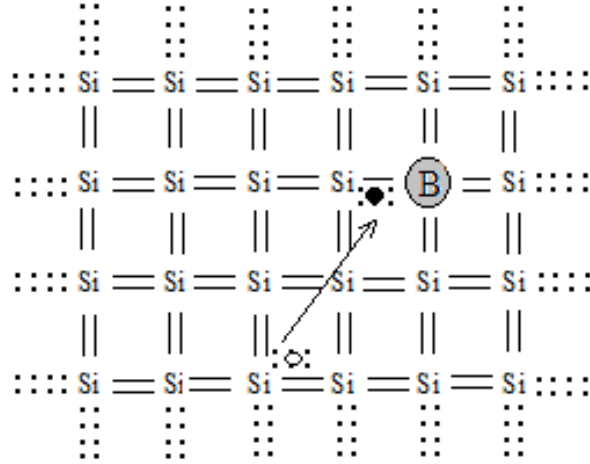
Teknolojide oldukça önemli bir yere sahip olan yarıiletken materyallerin ince ayrıntılar dışında fiziksel özellikleri birbirlerine benzerdir. Yarıiletkenlerin en önemli iki özelliği serbest elektronların bulunduğu iletim (conduction) bandı ile bağlı elektronların (valans elektronlarının) bulunduğu valans (valance) bandı arasında bir enerji aralığının bulunması ve de bu materyallere yapılacak çok düşük orandaki uygun katkılamamanın yarıiletkenlerin fiziksel özelliklerine büyük ölçüde etkisinin olmasıdır.

### **2.3. Katkılı Yarıiletkenler**

Asal yarıiletken ilginç bir materyal olabilir, fakat yarıiletkenlerin gerçek gücü katkı veya kirlilik atomlarının kontrollü bir miktarının ilave edilmesiyle anlaşılır. Bu katkılama işlemi yarıiletkenin elektriksel karakteristiklerini önemli ölçüde değiştirebilir. Katkılı yarıiletkenler sadece tek bir taşıyıcı tipinin (ya elektronlar ya da holler) elektriksel iletimi sağladığı yarıiletkenlerdir. Katkılama işlemi, uygun katkı atomlarının yarıiletken içerisine çeşitli teknikler ile katılmasıyla yapılır. Katkılama işlemi sayesinde istenilen özelliklere sahip bir yarıiletken elde edilir.

Bir yarıiletken materyale katılan safsızlık atomları istenilen özelliğe göre ya elektron verici (donor) ya da elektron alıcı (akseptör) olarak işlev görürler. Katkılama işlemi ile yarıiletkenler n-tipi veya p-tipi özellik gösterirler.

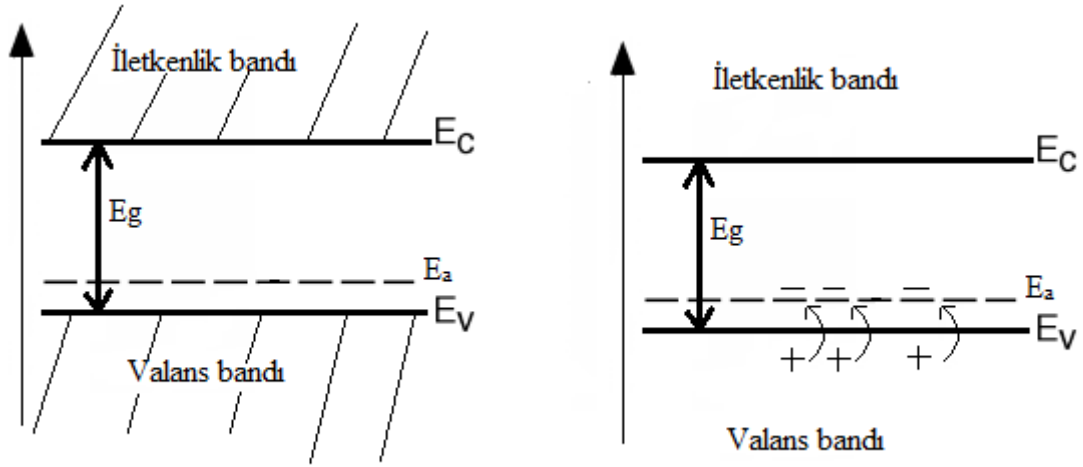
### 2.3.a. p-tipi yarıiletkenler



**Şekil 2.1.** p-tipi yarıiletkenin bağ yapısı (Bor atomu katkılanmış bir silisyum örgünün iki boyutlu görünümü)

Periyodik tablonun IV. grup elementlerinden olan Si veya Ge kristaline In, Al, B gibi III. grup elementlerinden herhangi birisi katkılanır ise katkılama yapılan yarıiletken p-tipi özellik kazanır. p-tipi yarıiletkenlerde n-tipi yarıiletkenlerin aksine çoğunluk yük taşıyıcılar hollerdir. Hol yoğunluğu elektron yoğunluğundan daha büyüktür. Bu nedenle de p-tipi yarıiletkenlerde katkı atomları akseptörler yani, elektron alıcı atomlardır. Şekil 2.1’de gösterilen Si örgüsüne periyodik tablonun III. grup elementlerinden B’un katkılanması durumunda, bağ orbitallerinden birisinin bir elektronu eksik olacaktır ve bu bağı başka bir Si-Si bağından bir elektron ile doldurulabilir. Böylece kovalent bağ yapısında ekstra bir hol oluşur ve B atomu iyonize olur. Bu III. grup atom valans bandından bir elektron aldığı için “akseptör kirlilik atomu” olarak adlandırılır. Bu akseptör atomu, iletkenlik bandında elektron oluşturmaksızın valans bandında holler oluşturabilir.

Elektrik alan varlığında B atomunun iyonlaşması ile oluşturulan hol pozitif yük taşıyıcısı olarak davranır ve Si örgüsü içerisinde hareket edebilir. Bu durumda akseptör (elektron alıcı) B atomu ile katkılanan Si kristali p-tipi yarıiletken özellik gösterir. Akseptör atomlarının yarıiletken içerisinde buldukları enerji seviyesi de akseptör enerji seviyesi olarak adlandırılır (Şekil 2.2).



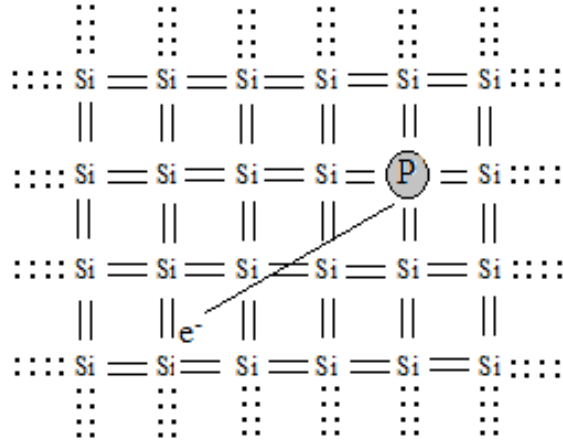
**Şekil 2.2.** p-tipi bir yarıiletkenin enerji-bant diyagramı

a) Ayırık akseptör enerji halinin b) İyonize olmuş bir akseptör enerji halinin enerji-bant diyagramı

### 2.3.b. n-tipi yarıiletkenler

Elektriksel iletkenliğe n-tipi yarıiletkenlerde katkıda bulunan çoğunluk taşıyıcılar elektronlardır. Başka bir ifadeyle; serbest elektron yoğunluğu hol yoğunluğundan daha büyüktür. Yarıiletken, donör (elektron verici) atomları ile katkılanmıştır (Şekil 2.3). Eğer bir VA grubu elementlerinden bir katkı atomu, örneğin fosfor (P), IVA grubunda bulunan bir Si atomuyla yer değiştirir ise, Si örgüsünde tetrahedral kovalent bağ için gerekli olan dört elektronun dışında bir elektron daha bulunacaktır. Bu ekstra elektron pozitif olarak yüklenmiş P çekirdeğine zayıf bir şekilde bağlıdır. Yani bu elektron P atomundan kolaylıkla ayrılabilir. Elektrik alan uygulanması durumunda ise, bu ekstra

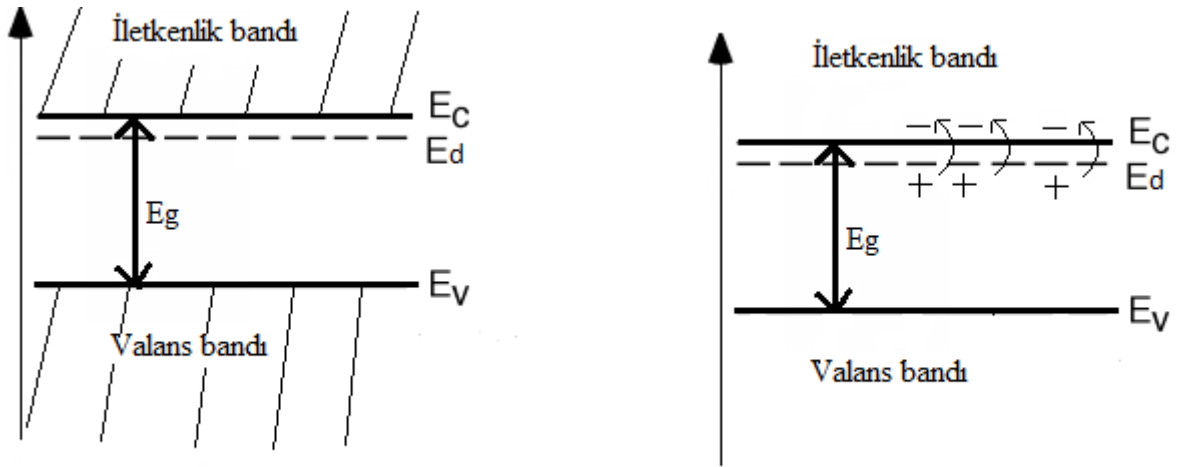
elektron iletim için gerekli olan serbest bir elektron haline gelir. P atomu pozitif bir yük kazanarak iyonlaşır.



**Şekil 2.3.** n-tipi yarıiletkenin bağ yapısı (Fosfor atomu katkılanmış bir silisyum örgünün iki boyutlu görünümü)

P, Sb ve As gibi VA grubu katkı atomları Si ya da Ge'a katkıldıklarında elektriksel iletim için kolayca iyonlaşmış elektron sağlarlar. Bu nedenle VA grubu atomları “donor kirlilik atomları” olarak adlandırılır. Şekil 2.4’te P atomu katkılanan n-tipi Si kristalinin enerji-bant diyagramı görülmektedir.

Katkı atomunun ekstra elektronu boş iletim bandının çok az aşağısında yasak enerji aralığında bir enerji seviyesinde bulunur. Böyle bir enerji seviyesi, bir donör katkı atomu sağladığı için “donör seviyesi” olarak adlandırılır. Bu durumda küçük enerji değerlerinde donör atomları kolayca iyonlaşarak iletkenlik bandına geçebilirler. Böylece elektriksel iletkenliğe katkıda bulunurlar. Katkı atomlarının neden olduğu elektriksel iletim katkılı iletkenlik adımı alır.



**Şekil 2.4.** n-tipi bir yarıiletkenin enerji-bant diyagramı

a) Ayrık donör enerji halinin b) İyonize olmuş bir donör halinin enerji-bant diyagramı

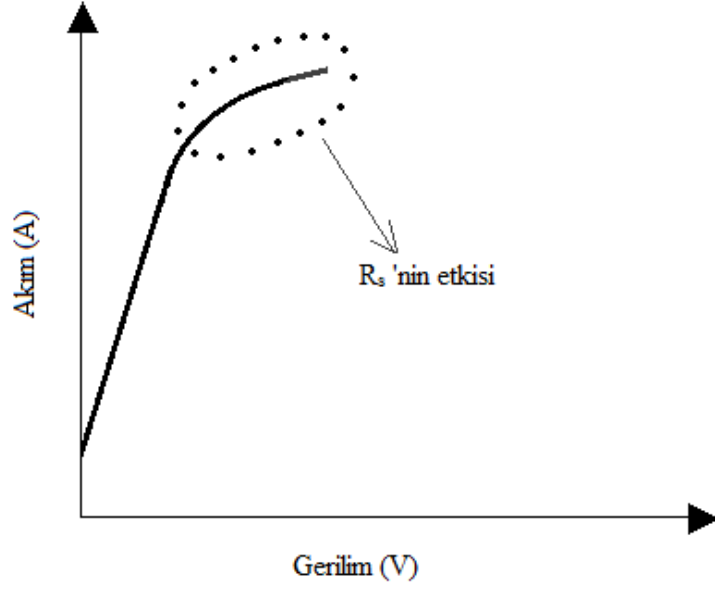
Donör kirlilik atomları, valans bandında hol oluşturmaksızın, iletkenlik bandında elektron oluştururlar. Bu nedenle bu tip yarıiletkenlerde elektron yoğunluğu donör yoğunluğuna bağlıdır ve çoğunluk taşıyıcıları elektronlar, azınlık taşıyıcıları ise hollerdir. Başka bir ifadeyle; elektronların elektriksel iletkenliğe katkısı n-tipi bir yarıiletkende hollerden daha fazladır. Bu şekilde elde edilen maddeler n-tipi yarıiletken özellik gösterirler (Neamen 1992).

#### 2.4. Seri Direnç Etkisi

Metal-yarıiletken doğrultucu kontaklarda görülen homojensizliklere neden olan etkilerden birisi de seri direnç etkisidir. Seri direnç diyotlarda güç kaybına neden olmakta ve diyodun yapısına bağlılık göstermektedir.

Aktif yarıiletken devre elemanlarında ortaya çıkan seri direnci kapsamlı olarak bipolar transistör yapısında görmek mümkündür. Seri direnç  $R_s$  ile gösterilir ve metal-yarıiletken doğrultucu kontaklarda, yarıiletken tarafında oluşan deplasyon bölgesi dışında kalan nötral bölgenin diyot akımına karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır (Rhoderick 1988). Seri direnç etkisi büyük gerilim değerlerinde baskın olmaya başlar ve de diyot akımının düşmesine sebebiyet verir. Şekil 2.5'te bir Schottky diyodunda

yüksek gerilim değerlerinde seri direncin etkisiyle diyot akımında bir azalma görülmektedir.



Şekil 2.5. Metal-yarıiletken kontakta seri direncin etkisi

## 2.5. Omik Kontaklar

Yarıiletken malzemelerde omik kontak kullanımının en yaygın amacı, minimum dirençle yarıiletkene akım vermek ya da yarıiletkenenden akım almaktır. Omik kontak, uygulanan gerilimin polaritesinden bağımsız olarak her iki yönde de akım akışına minimum direnç gösteren bir metal-yarıiletken eklemdir. Akım-voltaj ilişkisi Ohm Kanunu ile verilen kontaklar omik bir davranış sergilerler. Kontak direncinin değeri ise omik kontakın kalitesini belirlemektedir (Brillson 1993; Neamen 1992).

## 2.6. Omik Kontak Elde Etme Yolları

Omik kontak elde etmenin üç genel şekli bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, Schottky engel yüksekliği düşük bir eklem oluşturarak elektronların her iki yönde de geçiş yapabileceği bir kontak oluşturmak; ikincisi, Schottky engel yüksekliği büyük olsa dahi elektronların tünelleme yapabileceği dar potansiyel engeli oluşturmaktır. Bu tünelleme engeli, yarıiletken yüzeyini aşırı tiplilik ( $n^{++}$  veya  $p^{++}$ ) gösterecek şekilde katkılayarak yapılabilir. Üçüncüsü ise, termal difüzyonla dar bant aralıklı ve taban ile aynı özellikte bir tabaka oluşturularak omik kontak oluşturmaktır.

## 2.7. Metal-Yarıiletken Schottky Diyotlar

Kristalin içinden elektronları dışarıya (vakuma) atmak için, elektronlara belirli bir miktarda enerji transfer olmalıdır. Elektronu katı malzemenin içinden dışarıya atmak için gereken en az enerji iş fonksiyonu veya çıkış işi olarak adlandırılır. Kısaca; Fermi enerji seviyesindeki bir elektronu vakum seviyesine sıfır kinetik enerjiyle çıkarmak için gerekli enerjiye metalin veya yarıiletkenin iş fonksiyonu denir. Yarıiletkenlerin büyük bir çoğunluğunun çıkış işi 1-6 eV arasında değişmektedir ve malzemenin kristal yapısına bağlıdır (Rhoderick 1988).

Burada vakum seviyesi; metalin veya yarıiletkenin yüzeyidir. Yani elektronun hareketsiz olduğu yüzeydir. Elektron yakınlığı ise; kimyasal olarak, bir atomun bir elektron alırken açığa çıkardığı enerji veya bir atomun bir elektron aldığı anda serbest kalan enerjisi olarak tanımlanır.

Metal/yarıiletken kontaklar, metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına ( $\Phi_m$  ve  $\Phi_s$ ) bağlı olarak, omik ve doğrultucu kontak (Schottky kontak) olmak üzere iki kısımda incelenir. Doğrultucu kontak (Schottky kontak), akımın bir doğrultuda diğer doğrultudan çok daha kolay aktığı kontak türüdür. Doğrultucu kontak durumunda elektronlar bir yönde kolayca hareket ederken, ters yöndeki geçişleri kontak bölgesinde oluşan potansiyel engeli

nedeniyle zorlaşır. Bu durum her iki maddenin elektronik enerji-bant diyagramı ile yakından ilişkilidir (Ziel 1968). Elektronların her iki yönde serbestçe hareket edebilmeleriyle oluşan kontağa ise omik kontak adı verilmektedir.

- n-tipi yarıiletken/metal kontaklarında  $\Phi_m > \Phi_s$  ise doğrultucu kontak; eğer  $\Phi_m < \Phi_s$  ise omik kontak oluşur.
- p-tipi yarıiletken/metal kontaklarında ise  $\Phi_m < \Phi_s$  durumunda doğrultucu kontak ve  $\Phi_m > \Phi_s$  durumunda da omik kontak oluşur.

Yarıiletken Schottky kontaklar lineer olmayan akım-gerilim karakteristiği göstermektedir. Lineer olmayan özellikleri bu kontakların elektrik akımının doğrultulmasında, dönüşümünde, amplifikasyonunda veya elektrik sinyallerinin oluşturulmasında kullanılabilmelerini sağlamaktadır.

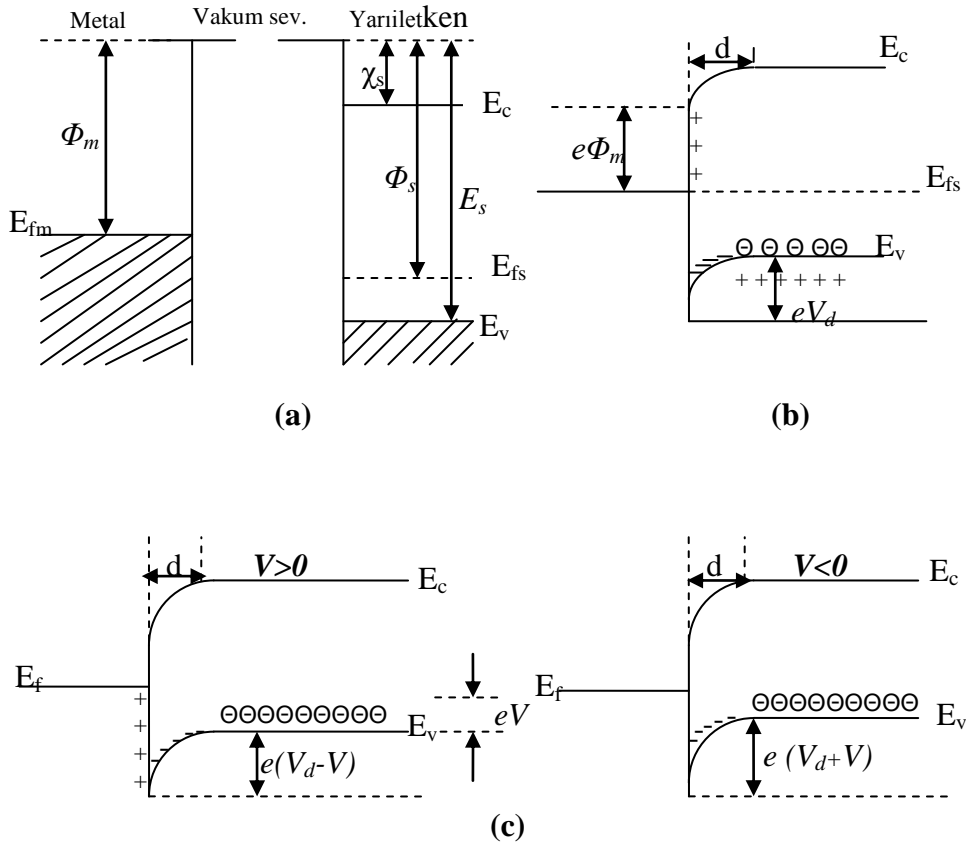
### **2.7.a. Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar**

Bir metal, bir yarıiletken ile kontak haline getirildiği zaman, bu iki madde arasında yüklerin yeniden dağılımı vuku bulur. Yük dağılımı, her iki maddenin Fermi seviyeleri (elektrokimyasal enerjileri) aynı seviyeye gelinceye kadar devam eder. Bu durumda dengeye ulaşılır. Bir metal/yarıiletken kontakta yük taşıyıcıları (elektronlar ve holler) bir doğrultuda diğer doğrultuya göre daha kolay geçebiliyorsa, buna doğrultucu kontak denir. Bundan dolayı doğrultucu kontakta bir doğrultudaki akım diğer doğrultuya göre daha kolay geçer.

$\Phi_s$ ; yarıiletkenin iş fonksiyonu,  $\Phi_m$ ; metalin iş fonksiyonu ve  $E_s$  ise valans bandının tepesi ile vakum seviyesinin tabanı arasındaki fark olsun. Eğer  $\Phi_m < \Phi_s$  ise kontak doğrultucu,  $\Phi_m > \Phi_s$  ise kontak omik olur.



Şimdi  $\Phi_m < \Phi_s$  olan birinci durumu göz önüne alalım. Oda sıcaklığında akseptörlerin hepsi iyonize olmuş olsun. Kontakta önce (Şekil 2.6.a), yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden  $(\Phi_s - \Phi_m)$  kadar aşağıdadır. Kontakta sonra, metal ve yarıiletkenin Fermi seviyeleri aynı hizaya gelinceye kadar metalden yarıiletkene elektron akışı olur. Bunun sonucunda yarıiletken tarafındaki holler, bu elektronlardan dolayı iyonize olurlar. Yarıiletkenin yüzey tabakasındaki bu negatif yüklü iyonize olmuş akseptörler,  $d$  kalınlığındaki bir uzay yükü tabakası içerisinde dağılırlar.



**Şekil 2.6.** Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontakın enerji-bant diyagramı  
 a) Kontakta önce b) Kontakta sonra ve termal dengede c)  $V \neq 0$  durumunda

Yarıiletken gövdedeki enerji seviyeleri  $(\Phi_s - \Phi_m)$  kadar yükseldiğinden, yarıiletken tarafındaki holler için yüzey engeli;

$$eV_{dif} = (\Phi_s - \Phi_m) \quad (2.1)$$

olur. Burada  $V_{dif}$ , difüzyon potansiyelidir. Yarıiletken içerisindeki bu potansiyel, metalin yüzeyine göre alınır. Kontakın metal tarafındaki holler için engel yüksekliği;

$$e\Phi_b = (\Phi_s - \Phi_m) + (E_s - \Phi_s) = (E_s - \Phi_m) \quad (2.2)$$

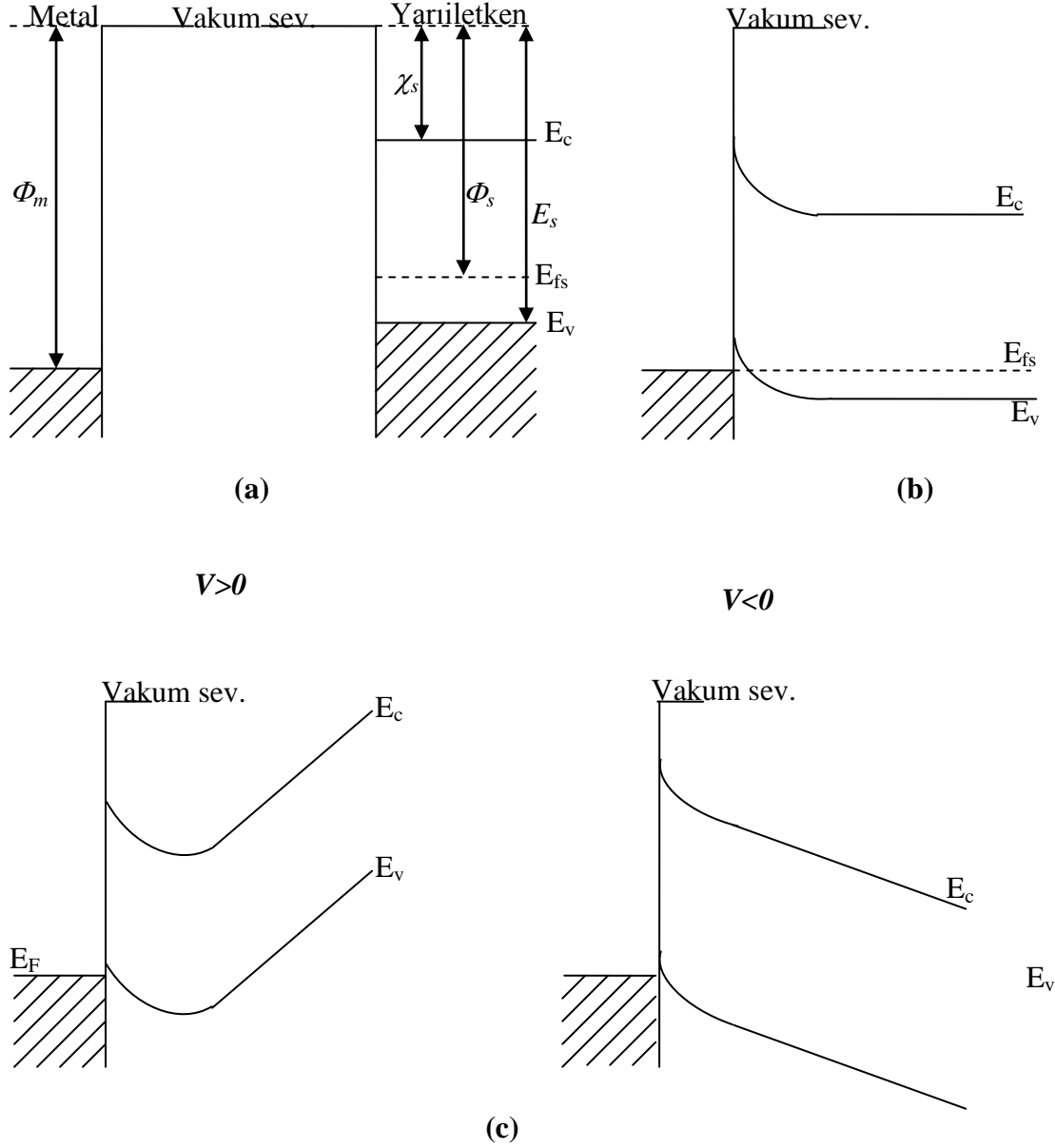
olur. Termal uyarılmadan dolayı, yarıiletkendeki bazı holler potansiyel engelini aşacak kadar enerji kazanıp, metalin içine geçebilirler. Aynı şekilde metalde termal olarak oluşan bazı holler de engeli aşacak kadar enerji kazanıp yarıiletken içine geçebilirler. Böylece kontakta engelden geçen eşit ve zıt yönlü  $I_0$  akımı oluşur.

Eğer yarıiletkene bir  $V$  gerilimi uygulanırsa (Şekil 2.6.b), soldan sağa akan hol akımı değişmez, ama sağdan sola akan hol akımı  $\exp(eV/kT)$  çarpanı kadar değişir. Bundan dolayı yarıiletkendeki enerji seviyelerinin tümü  $eV$  kadar düşer ve buna bağlı olarak yarıiletkenden metale (sağdan sola) geçen holler için engel yüksekliği  $eV$  kadar azalır. Sonuç olarak, yarıiletkenden metale geçen hollerin oluşturduğu akımın doğrultusu pozitif olarak kabul edilirse karakteristik akım;

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

olacaktır.

### 2.7.b. Metal/p-tipi yarıiletken omik kontaklar



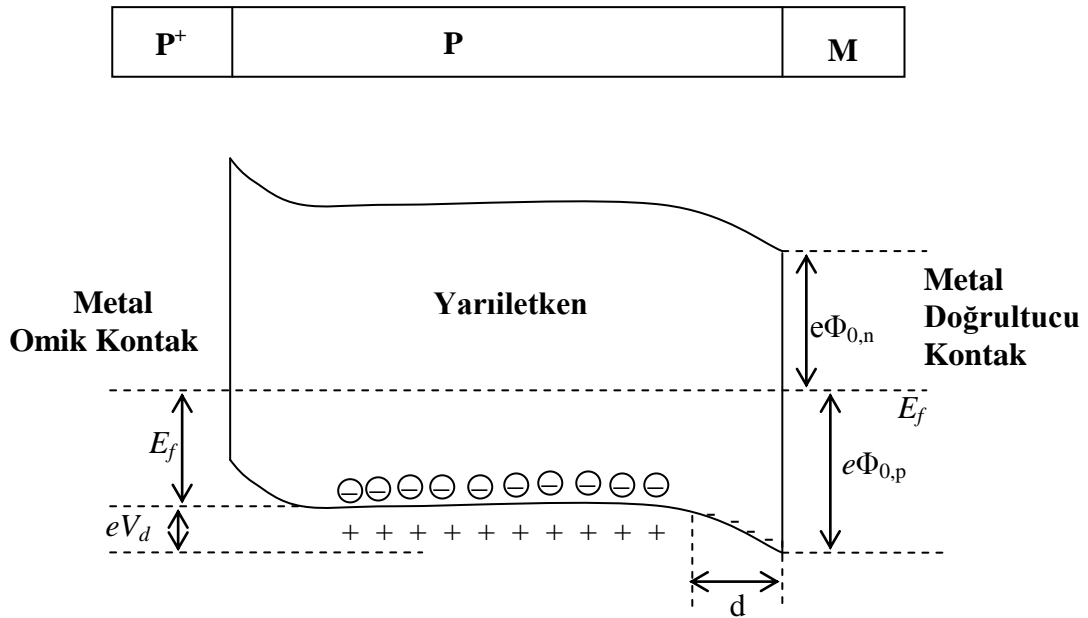
**Şekil 2.7.** Metal/p-tipi omik kontakın enerji-bant diyagramı  
**a)** Kontakdan önce **b)** Kontakdan sonra **c)**  $V \neq 0$  durumunda

Şimdi  $\Phi_m > \Phi_s$  durumunu dikkate alalım. Şekil 2.7.a'da görüldüğü gibi yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden  $(\Phi_m - \Phi_s)$  kadar yukarıdadır. Kontakdan sonra bir yük mübadelesi olacaktır. Yarıiletkendeki elektronlar, hollerden dolayı geride bir

pozitif yüzey yükü bırakarak ve metal tarafında bir negatif yüzey yükünü oluşturarak metal tarafına akarlar. Buna bağlı olarak yarıiletkendeki Fermi seviyesi şekil 2.7.b’de görüldüğü gibi  $(\Phi_m - \Phi_s)$  kadar aşağı düşer. Hol konsantrasyonunun artmasından dolayı yarıiletken yüzeyi daha fazla p-tipi olur.

Elektronlar, metalden yarıiletken içerisindeki boş durumlara kolayca geçebilirler. Bu yük hareketi, hollerin yarıiletkenden metale akışına karşılık gelir. Metal tarafına geçen holler (yüksek elektron konsantrasyonundan dolayı) hemen nötralize olurlar. Ters beslem durumunda, metalin iletkenlik bandında termal olarak oluşan holler de kolay bir şekilde yarıiletken tarafına geçebilirler. Bu şekilde, her iki doğrultuda akımı kolayca geçirebilen kontaklara omik kontak denir.

## 2.8. Metal (Omik)/p-Tipi Yarıiletken/Metal (Doğrultucu) Yapısı



Şekil 2.8. P<sup>+</sup>PM yarıiletken diyot yapısının termal dengede enerji-bant diyagramı

Metal/p-tipi yarıiletken/metal (P<sup>+</sup>PM) yapısı, p-tipi yarıiletkenin bir yüzeyine boşluk bakımından çok zengin P<sup>+</sup>P omik kontağı ile diğer yüzeyine uygulanan PM doğrultucu kontağından meydana gelir. Termal dengede böyle bir yapının enerji-bant diyagramı Şekil 2.8’de görülmektedir. P<sup>+</sup> omik kontak tarafı V>0 olacak şekilde bir gerilim uygulandığında, yapı doğru beslemde olur. P<sup>+</sup> tarafına V<0 olacak şekilde bir gerilim uygulanırsa, yapı ters beslemde olur. P<sup>+</sup>PM yapısı, diyot özelliğine sahip bir yapıdır. Bu şekildeki bir yapı yarıiletken diyot olarak adlandırılır. Şekil 2.8’de görüldüğü gibi holler için engel yüksekliği  $e\Phi_{0,p} = (eV_d + E_f)$ ’ye eşittir (Temirci 2000).

## 2.9. Schottky Diyotlarda Termoyonik Emisyonla Akım İletimi

Schottky kontaklarda bir potansiyel engeli üzerinden elektron taşınması işlemi termoyonik emisyon teorisi ile açıklanmaktadır. Sıcak bir yüzeyden termal enerjileri nedeniyle taşıyıcıların salınması olayı termoyonik emisyon olarak bilinir. Metal/yarıiletken Schottky diyotlarda termoyonik emisyon teorisi taşıyıcıların termal enerjileri nedeniyle potansiyel engelini aşarak yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçmesidir. Schottky diyotlarda akım çoğunluk taşıyıcıları tarafından sağlanır. İdeal metal/n-yarıiletken Schottky diyotlarda, doğru beslem durumunda, yarıiletkenden metale termoyonik emisyon akım yoğunluğu

$$J_{s \rightarrow m} = \left( \frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left[ \frac{-e\Phi_b}{kT} \right] \exp\left( \frac{eV}{kT} \right) \quad (2.4)$$

eşitliğiyle verilir. Bu durumda, metalden yarıiletkene akım yoğunluğu,  $J_{m \rightarrow s}$ , uygulanan gerilimden bağımsızdır ve

$$J_{m \rightarrow s} = \left( \frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left[ \frac{-e\Phi_b}{kT} \right] \quad (2.5)$$

ifadesine eşittir. Böylece, eklemdeki net akım yoğunluğu  $J = J_{s \rightarrow m} - J_{m \rightarrow s}$  olur. Daha açık ifadeyle net akım yoğunluğu,

$$J = \left[ A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.6)$$

olur. Burada  $A^*$  termoiyonik emisyon için Richardson sabiti olup,

$$A^* = \frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \quad (2.7)$$

ile verilir. Elektronun yükü  $e=1,6 \times 10^{-19}$  C, Boltzmann sabiti  $k=8,625 \times 10^{-5}$  eV/K ve T, Kelvin cinsinden ortamın sıcaklığıdır. Genel bir durum için (2.6) ifadesi,

$$J = J_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.8)$$

olarak yazılabilir. Burada  $J_0$  ters-doyma akım yoğunluğu olarak bilinir ve

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \quad (2.9)$$

şeklinde ifade edilir.

## 2.10. Seri Direnç Hesaplama Yöntemleri

Yapılan metal-yarıiletken konusundaki literatür araştırmalarında  $I-V$  analizlerinin sonucu olarak görülmüştür ki; yüksek gerilim bölgesinde diyot ideallikten sapmaktadır. İdeallikten sapmasındaki etkili bir parametre olarak da seri direnç etkisi araştırılmış ve

bu etkinin matematiksel olarak hesaplanması için ise çeşitli seri direnç modelleri izah edilmiştir (Norde 1979; Lien *et al.* 1984; Cheung and Cheung 1986; Werner 1988). Deneysel verilerin kullanımında tespit edilen belirsizliklerden dolayı en küçük kareler metodu seri direnç bölgesine uygulanarak idealite faktörü, engel yüksekliği ve de seri direnç gibi parametrelerin hesaplanmasında daha güvenilir bir şekilde kullanılabilir yeni bir hesaplama tekniği literatüre Cheung tarafından kazandırılmıştır (Cheung and Cheung 1986).

### 2.11. Cheung Fonksiyonları Yardımı ile Schottky Diyot Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Metal-yarıiletken kontak yapısının doğru beslem  $I$ - $V$  karakteristikleri yardımıyla Schottky diyot parametrelerinin hesaplanmasında Cheung (1986) tarafından farklı bir model sunulmuştur. Termoyonik emisyonun bulunan akım yoğunluğu ( $J$ ), diyozun  $A$  etkin alanıyla çarpılırsa, diyottan geçen toplam akım,

$$I = A.J = \left[ AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_{bn}}{kT}\right) \right] \left[ \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.10)$$

olarak elde edilir. (2.10) ifadesinde  $eV_a \gg kT$  ise, 1 ihmal edilebilir. Pratikte uygulanan voltajın tümü arınma bölgesinde düşmediğinden, ideal durumdan sapmalar olacaktır. Bu ideal durumdan sapmaları da ifade edebilmek için, birimsiz bir sabit olan ( $n$ ) idealite faktörünün de dikkate alınması gerekir. Bu durumda akım denklemi

$$I = A.J = \left[ AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_{bn}}{kT}\right) \right] \left[ \exp\left(\frac{eV_a}{nkT}\right) \right] \quad (2.11)$$

şekline dönüşür. Burada uygulanan  $V_a$  voltajının  $IR_s$  kadarı seri direnç üzerine düşeceği için  $V_a$  yerine  $V_a - IR_s$  olarak alınır

$$I = A.J = \left[ AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_{bn}}{kT}\right) \right] \left[ \exp\left(\frac{e(V_a - IR_s)}{nkT}\right) \right] \quad (2.12)$$

eşitliği şeklinde yazılabilir. (2.12) ifadesinin tabii logaritması alınıp,  $V_a$ 'ya göre çözümü yapılırsa

$$V_a = \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) + n\Phi_{bn} + IR_s \quad (2.13)$$

elde edilebilir. (2.13) eşitliğinin  $\ln I$ 'ya göre türevi alınır

$$\frac{dV_a}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (2.14)$$

elde edilir. (2.14) eşitliğinin  $dV/d(\ln I)$ 'nın  $I$ 'ya göre grafiği bir doğrudur ve de bu doğrunun eğimi  $R_s$  seri direncini (nötral bölge direncini) verir. Bu doğrunun düşey eksenini kestiği noktadan idealite faktörü ( $n$ ) bulunur (Cheung and Cheung 1986).  $\Phi_{bn}$  potansiyel engel yüksekliği,

$$H(I) = V_a - \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) \quad (2.15)$$

şeklinde bir  $H(I)$  fonksiyonu tanımlanabilir. (2.13) ve (2.14) eşitliklerinden,

$$H(I) = n\Phi_{bn} + IR_s \quad (2.16)$$

şeklinde yazılabilir. (2.16) eşitliğinin  $H(I)$ - $I$  grafiği çizilecek olursa yine bir doğru verecektir. Bu doğrunun eğimi, seri direnci ( $R_s$ ) verecektir. Bu doğrunun  $H(I)$  eksenini kestiği noktadan da ayrıca engel yüksekliği değeri ( $e \Phi_{bn}$ ) değeri bulunabilmektedir (Cheung and Cheung 1986).



### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

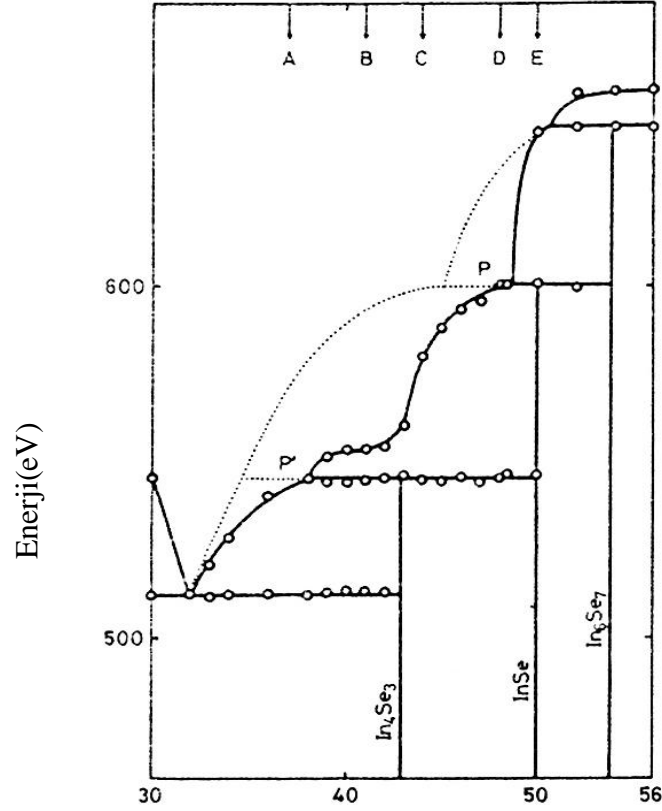
#### 3.1. Giriş

Bu bölüm, metal/p-InSe:Mn/metal Schottky diyotlarının yapımı için gerekli malzeme, numune hazırlanması, temizlenmesi ve yapımıyla ilgili bilgileri içermektedir. Yapılan numunelerin parametrelerinin ölçümünde kullanılan aletler ve teknikler bu bölümde yer almaktadır.

#### 3.2. Numunelerin Özellikleri

- InSe geniş bir sınıfa sahip olan tabakalı yarıiletkenler sınıfına aittir. II-VI, II-IV veya III-V grubu yarıiletkenlerdeki gibi 3 boyutlu bağlanma yerine bu kristallerde moleküler bağlanma iki boyutta I. mertebeden iyonik veya kovalent bağlanma şeklindedir.
- Bu bağlanma şekli, tabakalı yarıiletkenlerin eşsiz özelliklerinden anahtar özelliğine sahiptir (Segura *et al.* 1983).
- İndiyum III-A grubu elementi olup, atom numarası 49, kütle numarası ise 114,818 ve de VI-A grubu elementi olan selenyumun ise atom numarası 34, kütle numarası ise 78,950'dir.
- InSe tek kristalleri tabakalı yapıya sahip olup tabakalı yapılar oldukça fazla anizotropik özelliklere sahiptir. Atomlar birbirlerine kovalent veya iyonik bağla bağlanmışlardır ve her bir tabaka arasında Van-der Waals bağı vardır. InSe, Se-In-In-Se tabakaları şeklinde kristalleşir (Mooser 1976; De Blasi *et al.* 1982).
- Koyu siyah renklidirler.

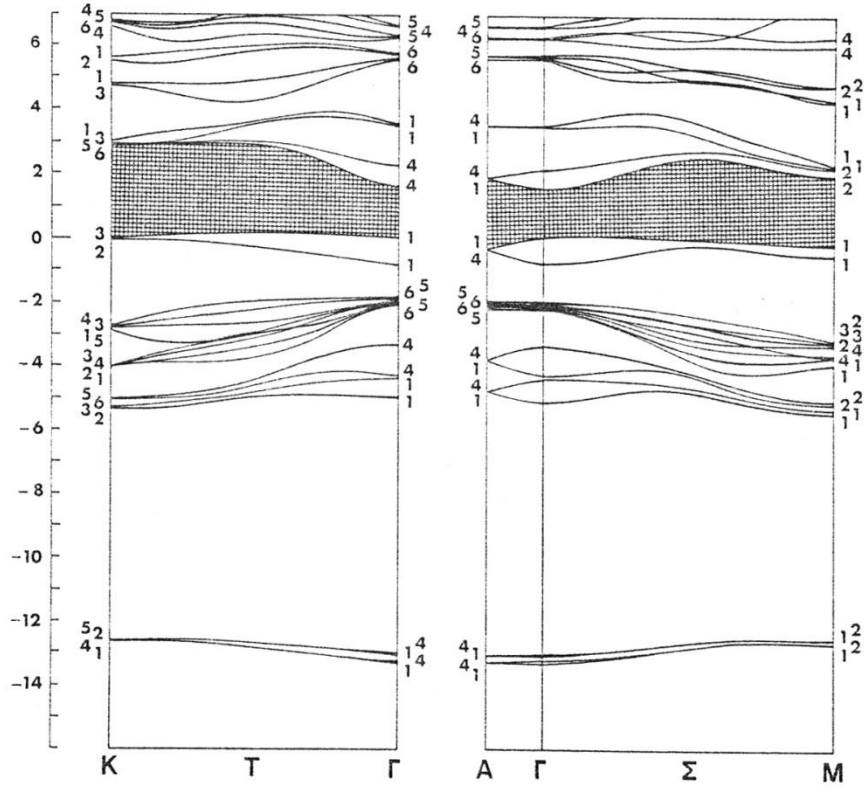
### 3.3. InSe Yarıiletkeninin Faz Diyagramı



**Şekil 3.1.** InSe yarıiletken bileşiğinin faz diyagramı (Imai *et al.* 1981)

Tek kristal elde etmek için, kristal büyütme işleminden önce bu kristallere ait faz diyagramlarının bilinmesi ve incelenmesi gerekir. Faz diyagramlarının koordinatları; basınç sabit kabul edilerek sıcaklık ve kompozisyon olarak ele alınmaktadır. Yarıiletken bileşiklerden, tek kristal elde edilebilmesi için erime sıcaklığı ve bileşiğin karşılıklı çözünebilirliği gibi verilerin bilinmesi gerekir. InSe'nin faz diyagramı Şekil 3.1'de verilmiştir.

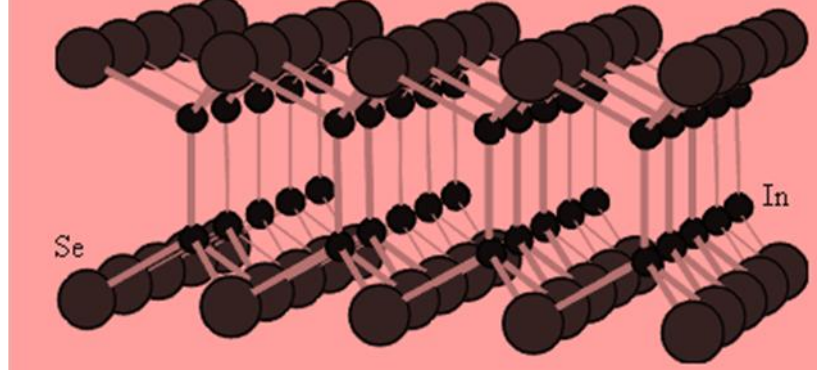
### 3.4. InSe Yarıiletken Bileşiklerin Band Yapısı



Şekil 3.2.  $\epsilon$ -InSe yarıiletken bileşiğinin band yapısı (Depeursing *et al.* 1978)

$A^{III}B^{VI}$  bileşiklerden InSe'nin  $\epsilon$ -InSe,  $\beta$ -InSe,  $\gamma$ -InSe politipleri mevcuttur. Sırasıyla  $\epsilon$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$ -politiplerinin uzay grupları  $D_{3h}^1$ ,  $D_{6h}^4$ ,  $C_{3v}^5$ 'dir (Schlüter 1973). Bridgman metoduyla büyütülen InSe kristalleri genellikle  $\gamma$ -politipi ile rombohedral (trigonal) bir kristal yapısına sahiptir (Gousskov *et al.* 1982). Metalorganik kimyasal buhar depozisyonu ile (MOCVD) büyütülmüş InSe filmlerinin hekzagonal birim hücresi ile  $\beta$ -politipine sahip olduğu belirtilmiştir (Choi and Yu 2003).  $\beta$ - ve  $\epsilon$ -politiplerin birim hücreleri iki tabaka olup 4 tane In-Se atomu ihtiva etmektedir (Likforman *et al.* 1978).  $\gamma$ -politipinin birim hücresi üç tabakadan oluşmaktadır. Şekil 3.2'de,  $\epsilon$ -InSe bileşiğinin band yapısı verilmektedir.

Birim hücresi Şekil 3.3’de verildiği üzere, atomik tabakalar Se-In-Se-In ardışık olarak dört katlı paket şeklindedir (Depeursinge *et al.* 1978; Camassel *et al.* 1978).



**Şekil 3.3.** InSe yarıiletken bileşiğinin birim hücresinin perspektif görünüşü

### 3.5. Numune Hazırlanması ve Temizlenmesi

Schottky diyot yapmak için alınan sonuçların güvenilir olabilmesi için öncelikle, kullanılacak numune yüzeyinin organik ve mekanik kirlerden arındırılması gerekmektedir. InSe:Mn numunesi tabii ayna benzeri bir yüzeye sahip tabakalı bir yarıiletken olduğundan dolayı herhangi bir mekanik veya kimyasal temizleme işlemi yapılmamıştır. Fakat omik kontak yapmak için kullanılan In ve Schottky kontak yapmak için kullanılan 12 farklı materyal (Ag, Cd, Au, Co, Sb, Mn, Sn, Zn, Al, Au-Be, Au-Ge, Au-Zn) için aşağıdaki kimyasal temizleme işlemi uygulanmıştır:

1. H<sub>2</sub>O+ HCl (10:1) içinde 5 dakika yıkama,
2. Deiyonize su (18MΩ) ile yıkama,
3. Asetonda ultrasonik olarak 5 dakika yıkama,
4. Deiyonize su ile yıkama,
5. Metanolda ultrasonik olarak 5 dakika yıkama,
6. Deiyonize su ile iyice yıkama,
7. Azot gazı (N<sub>2</sub>) ile kurutma.

Numunelere omik kontak yapıldıktan sonra, numuneleri tavlamak için kullanılan kuvars potalar sırası ile ultrasonik olarak; aseton, metanol ve deiyonize su ile 5'er dakika yıkanmıştır.

### 3.6. Metal/p-InSe:Mn/Metal Diyotlarının Hazırlanması

Vakum ortamında ısıtıcı ile yapılan termal buharlaştırma teknikleri, yarıiletken yüzeylerine ince metal filmlerin deposizyonu için en yaygın olarak kullanılan tekniklerdir. Bu tekniklerde alaşımın veya metalin oldukça küçük boyutlu parçaları kontrollü bir oranda sıcak olan buharlaştırma potasına konularak buharlaştırma yapılır. Böylece alaşımdaki veya metaldeki oranın benzeri depozit edilmiş olur. Şekil 3.4'te diyot yapmak için kullanılan kaplama ünitesi verilmiştir.



Şekil 3.4. Diyot yapmak için kullanılan kaplama ünitesi

### 3.6.a. Omik kontak yapılması

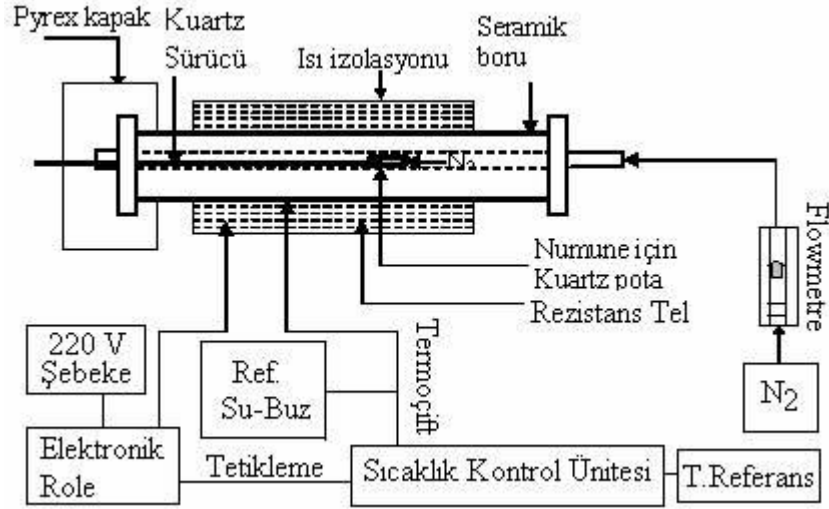
İlk aşamada, kullanılan numunenin mat tarafına omik kontak yapılması gerekir. Buharlaştırmada kullanılan ısıtıcı ilk önce %10'luk HCl ile yıkandıktan sonra deiyonize su ile iyice yıkanmış ve daha sonra kurutulularak kaplama ünitesindeki yerine yerleştirilmiştir. Oksitlenme türü kirliliklerden arındırılması için öncelikle ısıtıcı yakılmıştır. Omik kontak yapımı için kullanılan In kimyasal olarak temizlendikten sonra ısıtıcının üzerine yerleştirilerek  $10^{-5}$  Torr basınç değeri altında eritilmiş ve daha sonra p-InSe:Mn numunesinin daha mat olan yüzeyine buharlaştırılmıştır.



**Şekil 3.5.** Omik kontak yapmak için kullanılan tavlama fırını (Gürbulak 1998)

Daha sonra, vakum ortamından alınan numune kuvars potada tavlama fırınına konulmuş ve  $N_2$  ortamında farklı tavlama sıcaklıkları altında ( $200-350^{\circ}C$ ) tavlansak en iyi

tavlama sıcaklığı ve tavlama süresi belirlenmeye (1-5 dakika) çalışılmıştır. Tavlama işlemi neticesinde omik kontak direncinin düşük çıkmasından dolayı optimum değer olarak 300°C’de 3 dakikalık süre belirlenmiş ve omik kontak işlemi tamamlanmıştır.



**Şekil 3.6.** Omik kontak termal işlemi için fırın ve kontrol ünitesi şeması (Gürbulak 1998; Aydoğan 2004)

### 3.6.b. Schottky kontak yapılması

Omik kontak işleminden hemen sonra, numune tekrar vakum ortamına alınmış ve ön yüzeyine yani daha parlak olan yüzeyine  $10^{-5}$  Torr basınç altında ayrı ayrı 12 materyal (Ag, Cd, Al, Co, Sn, Sb, Au, Mn, Zn, Au-Be, Au-Ge, Au-Zn) buharlaştırılarak 1 mm çapında Schottky diyotlar yapılmıştır.

### 3.7. I-V Karakteristiği Ölçümü

Yapılan diyotlar oda sıcaklığında  $I-V$  ölçüm cihazındaki tutucuya yerleştirilerek her bir numune için akım-voltaj ölçümleri alınıp, grafikleri çizdirilmiştir. Bu çalışmadaki en kaliteli diyotlar seçilmiştir. Elde edilen bu grafiklere uygun fitler yapılarak fit denklemi oluşturulmuş ve bu fit denklemlerinden yararlanılarak bazı parametreler hesaplanmıştır.

Bunlardan birisi diyodun karakteristik parametrelerinden idealite faktörü, diğeri ise diyodun engel yüksekliği deđeridir.



## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 4.1. Giriş

Bu bölüm, yapılan deneysel çalışmalar sonucu ve p-InSe:Mn numunelerine yapılan omik ve Schottky kontak sonucu alınan akım-voltaj ( $I-V$ ) ölçümlerinin değerlendirilmesine ait bilgileri içermektedir. Schottky kontak malzemesi olarak kullanılan 12 farklı materyale ait 12 farklı grafik bulunmaktadır. Ayrıca metal/p-InSe:Mn Schottky diyotların karakterizasyonu için gerekli olan diyot parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler de bu bölümde anlatılmaktadır.

### 4.2. Metal/p-InSe:Mn/Metal Schottky Diyodunda Akım-Gerilim ( $I-V$ ) Ölçümleri ve Bazı Diyot Parametrelerinin Hesaplanması

Diyotların  $I-V$  ölçümleri, (-1)V ile (+2)V arasında 0,005 Volt adımlarla alındı. Oda sıcaklığındaki  $I-V$  grafikleri bu bölümde verilmiştir. Düz beslem  $I-V$  ölçümleri kullanılarak öncelikle diyodun idealite faktörü hesaplanmıştır. İdealite faktörü diyodun kalitesini belirleyen önemli parametrelerdendir. Bu parametre “ $n$ ” ile gösterilmektedir ve birimsiz bir değerdir. İdeal bir diyot için idealite faktörünün değeri  $n=1$ 'dir. Bu değer 1'den uzaklaştıkça yani idealite faktörü değeri büyüdükçe diyot ideallikten uzaklaşıyor demektir.

#### 4.2.a. İdealite faktörünün hesaplanması

( $I-V$ ) ölçülerinden hareketle diyodun doğru beslem tarafındaki değişiminden idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri hesaplanmıştır. İdealite faktörünü hesaplamak için kullanılan eşitlik;

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

ile verilmektedir. Bu ifadede  $eV \gg nkT$  olması durumunda üstel terim yanında 1 ihmal edilebilir. Bu durumda ifadenin yeni hali;

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

şeklinde olur. (4.2) eşitliğinin her iki tarafının tabii logaritması alınıp, sonra da  $V$ 'ye göre türevi alınırsa idealite faktörü için (4.3) eşitliği elde edilir.

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

$\ln(I)$ - $V$  grafiği çizildiğinde, doğru beslem kısmındaki lineer bölgeye bir doğru fit edilerek bu doğrunun eğiminden  $dV/(\ln I)$  değeri elde edilir. Bulunan bu değerle birlikte  $e$ ,  $k$  ve  $T$  değerleri (4.3) ifadesinde yerine yazılarak idealite faktörü değerleri hesaplanmıştır.

#### 4.2.b. Engel yüksekliğinin hesaplanması

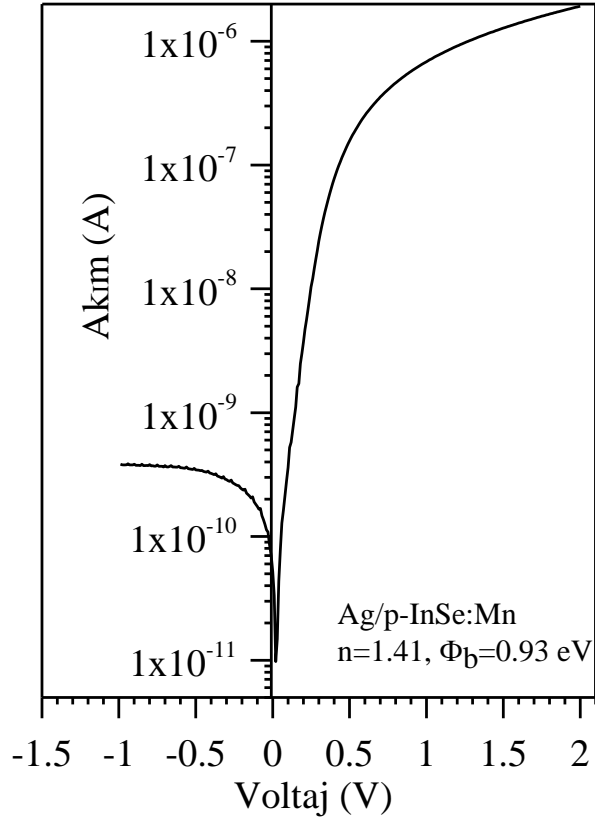
Fit edilen doğrunun  $V=0$ 'da düşey ekseni kestiği nokta  $I_0$  doyma akım yoğunluğunu verir. (4.2) eşitliğindeki  $I_0$  doyma akım yoğunluğu,

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

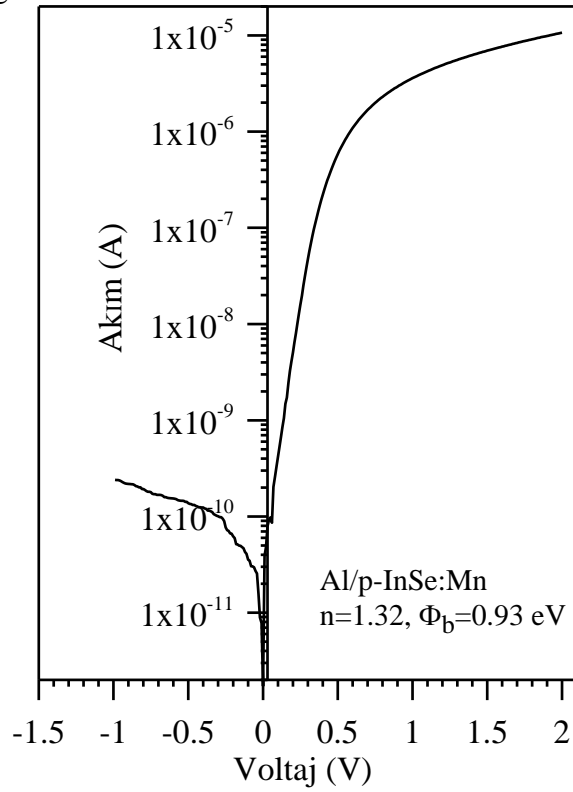
eşitliği ile verilmektedir. (4.4) eşitliğinin her iki tarafının tabii logaritması alınıp  $\Phi_b$ 'ye göre çözümlerse, (4.5) ile verilen engel yüksekliği ifadesi elde edilir.

$$e\Phi_b = kT \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (4.5)$$

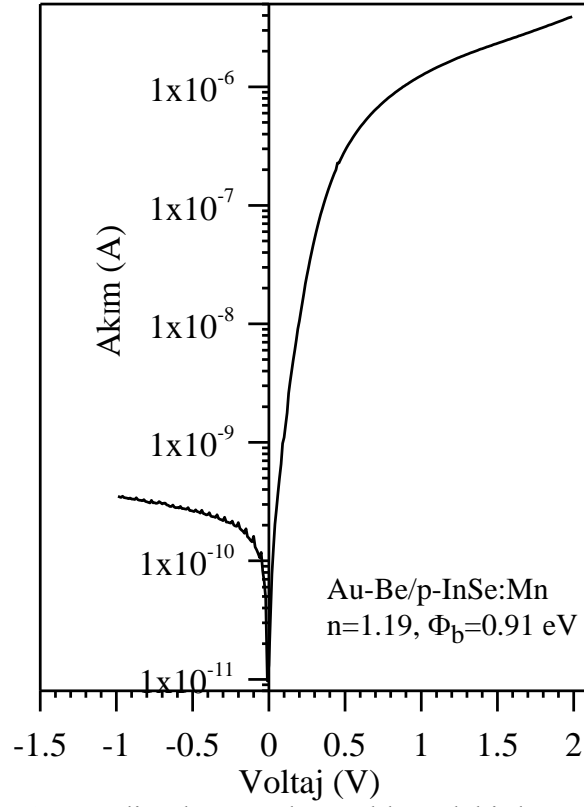
Bu (4.5) ifadesinde  $A$ , diyodun etkin alanı;  $A^*$ , Richardson sabitini ifade etmektedir. Bu parametrelerin her bir diyot için ayrı ayrı hesaplamasının yapılabilmesi için öncelikle grafikleri çizdirilmiş ve her bir numune için idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç hesaplamaları yapılmıştır. Diyotlara ait  $I$ - $V$  grafikleri Şekil 4.1-12'de verilmiştir. Ayrıca bütün diyotların  $I$ - $V$  karakteristikleri Şekil 4.13'te verilmiştir.



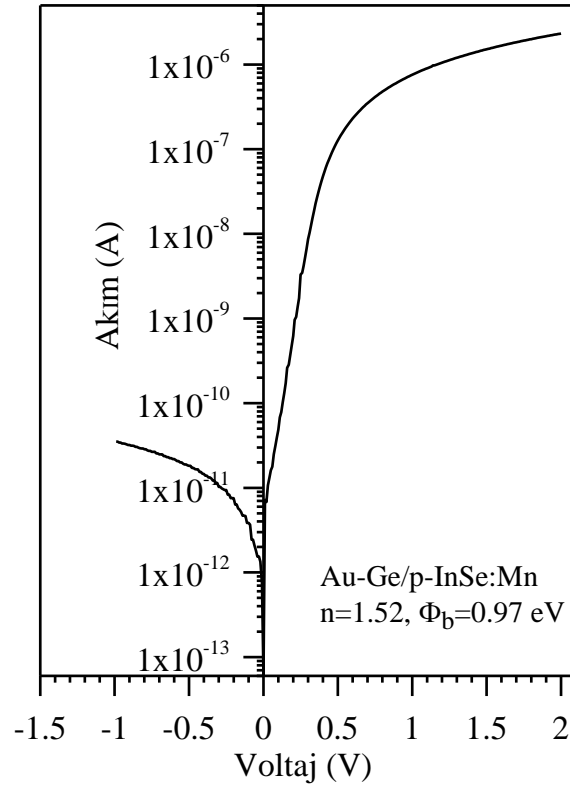
**Şekil 4.1.** Ag/p-InSe:Mn diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği



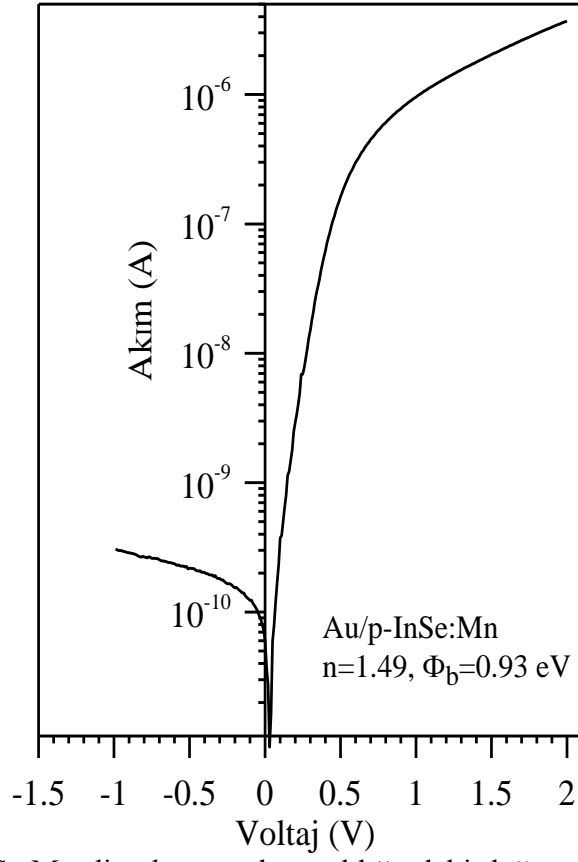
**Şekil 4.2.** Al/p-InSe:Mn diyodunun diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği



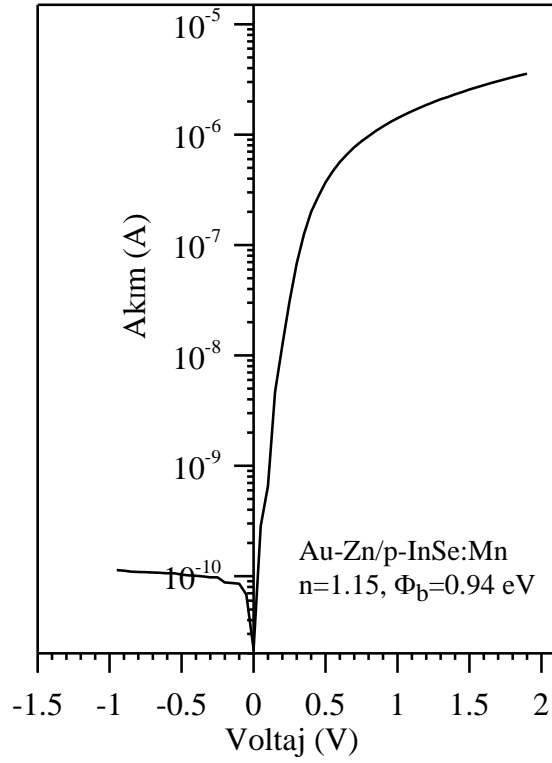
**Şekil 4.3.** Au-Be/p-InSe:Mn diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği



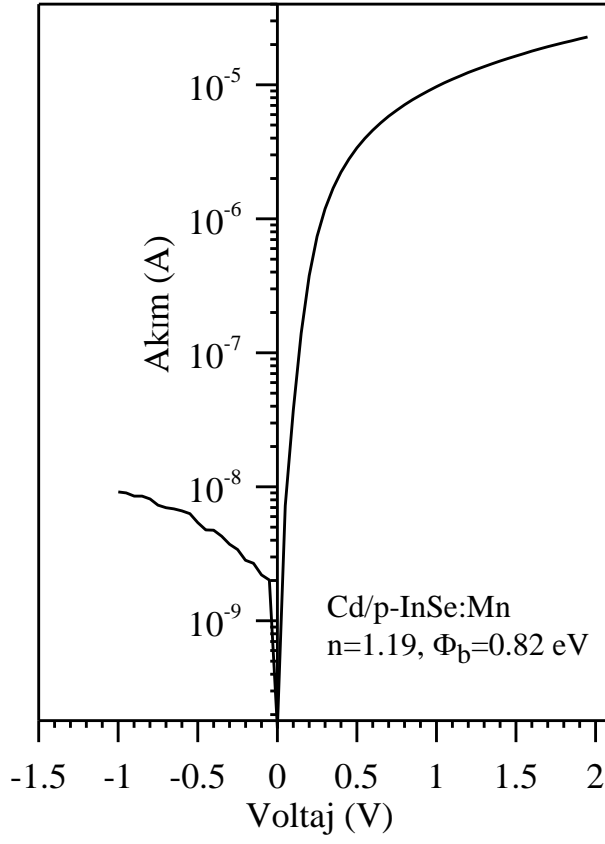
**Şekil 4.4.** Au-Ge/p-InSe:Mn diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği



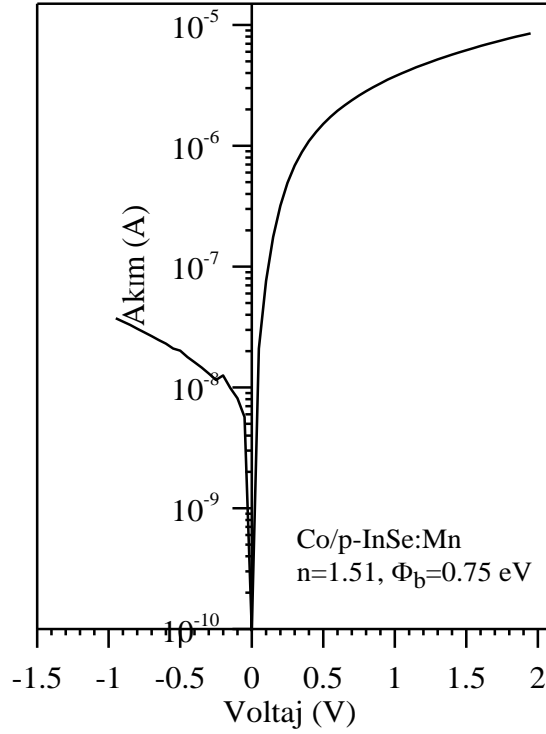
**Şekil 4.5.** Au/p-InSe:Mn diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği



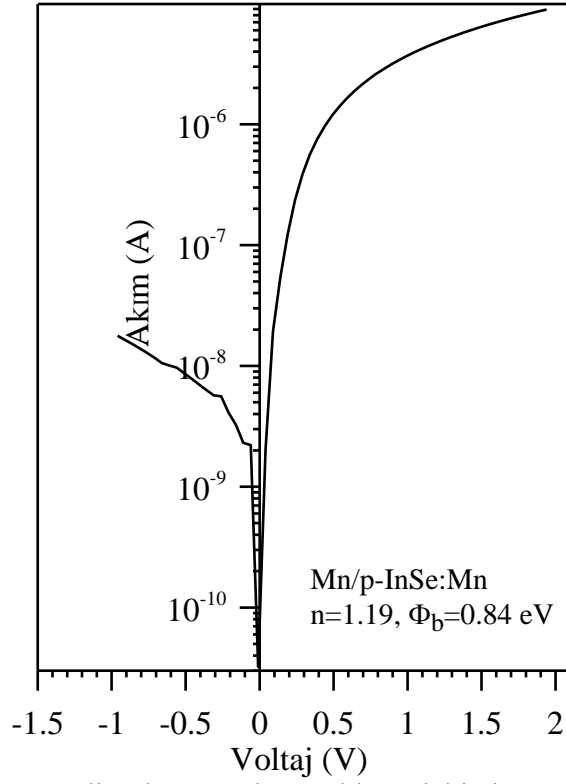
**Şekil 4.6.** Au-Zn/p-InSe:Mn diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği



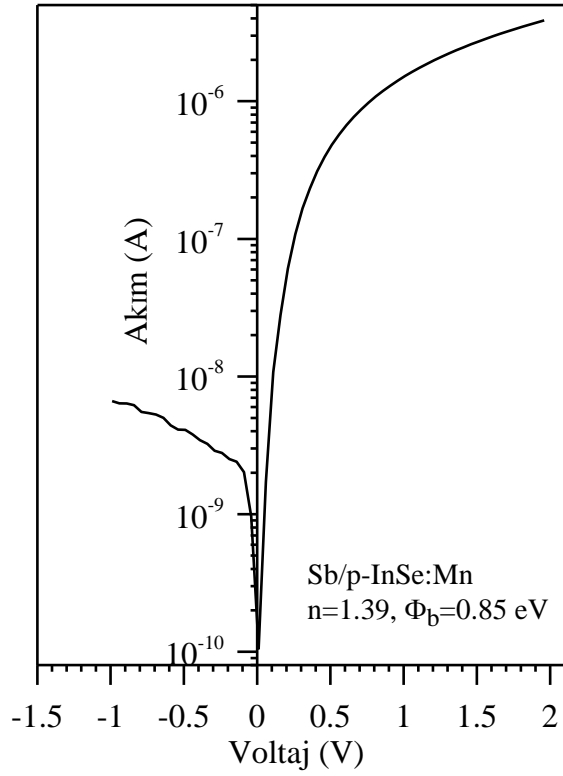
**Şekil 4.7.** Cd/p-InSe:Mn diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği



**Şekil 4.8.** Co/p-InSe:Mn diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği

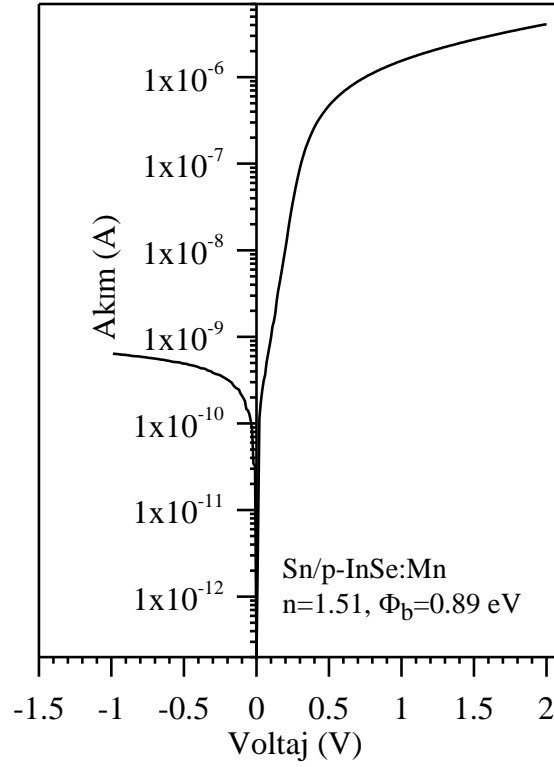


**Şekil 4.9.** Mn/p-InSe:Mn diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği

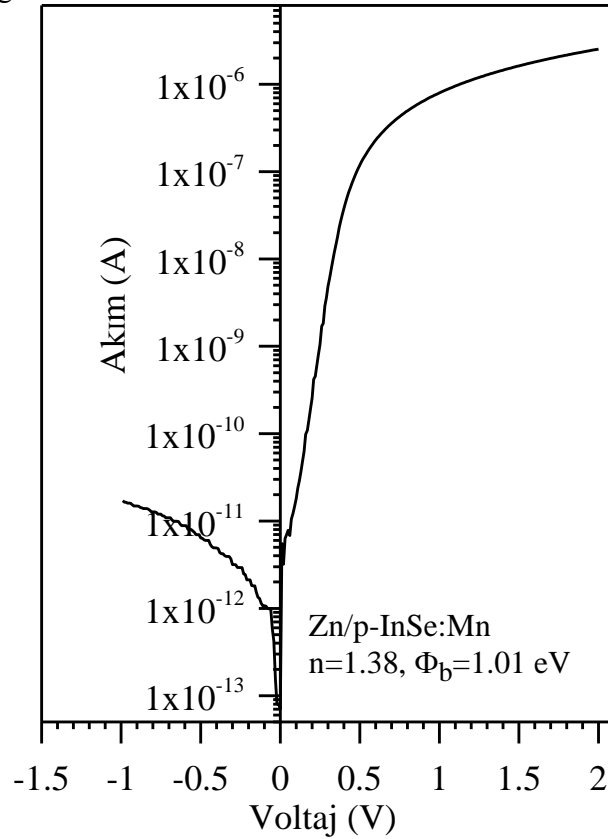


**Şekil 4.10.** Sb/p-InSe:Mn diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği

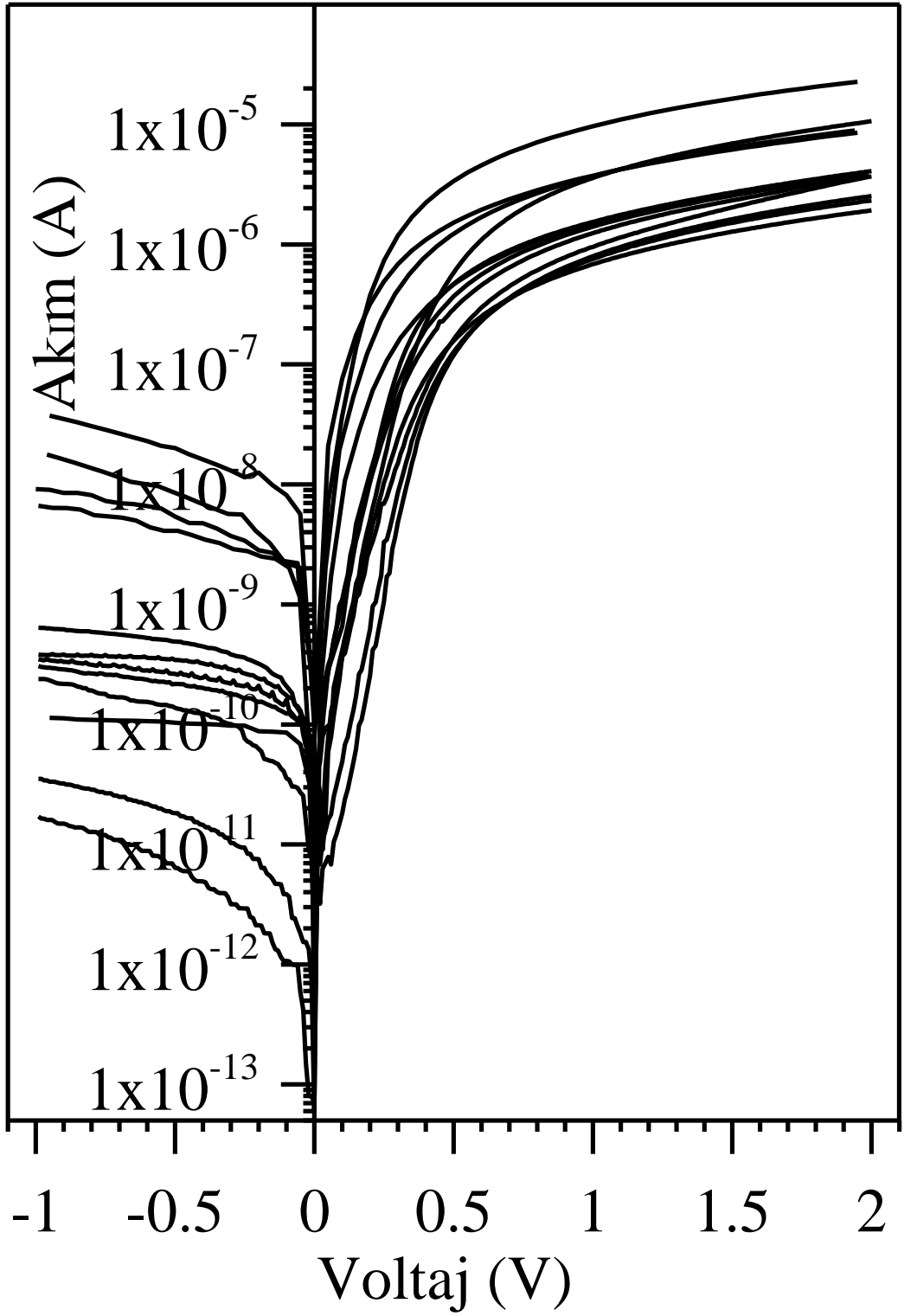




Şekil 4.11. Sn/p-InSe:Mn diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği



Şekil 4.12. Zn/p-InSe:Mn diyodunun oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği



Şekil 4.13. Metal/p-InSe:Mn diyotlarının oda sıcaklığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristikleri

Her bir diyot için her bir idealite faktörü ( $n$ ) ve engel yüksekliğinin ( $\Phi_b$ ) deneysel değerleri, (4.3) ve (4.5) denklemlerine göre, sırasıyla, düz beslem  $\ln(I)$ - $V$  grafiklerinin doğru kısmının eğim ve düşey eksenini kestiği noktanın değerlerinden bulunmuştur. Bu grafiklerden elde edilen idealite faktörleri, engel yükseklikleri ve doyma akımı ( $I_0$ ) değerleri gibi bazı parametreler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Metal/p-InSe:Mn diyoduna ait  $\ln(I)$ - $V$  grafiklerinden elde edilen bazı diyot parametreleri

<b>Metal</b>	<b>İdealite Faktörü</b>	<b>Engel Yüksekliği (eV)</b>	<b><math>I_0</math> (A)</b>
Ag	1,41	0,93	$2,094 \times 10^{-11}$
Cd	1,19	0,82	$1,404 \times 10^{-9}$
Co	1,51	0,75	$5,737 \times 10^{-9}$
Au-Zn	1,15	0,94	$1,301 \times 10^{-11}$
Au-Be	1,19	0,91	$4,827 \times 10^{-11}$
Au-Ge	1,52	0,97	$3,954 \times 10^{-12}$
Au	1,49	0,93	$1,986 \times 10^{-11}$
Al	1,32	0,93	$2,099 \times 10^{-11}$
Mn	1,19	0,84	$6,614 \times 10^{-10}$
Sb	1,39	0,85	$3,723 \times 10^{-10}$
Zn	1,38	1,01	$9,674 \times 10^{-13}$
Sn	1,51	0,89	$7,864 \times 10^{-11}$

### 4.3. Cheung Fonksiyonları Yardımıyla Diyot Parametrelerinin Hesaplanması

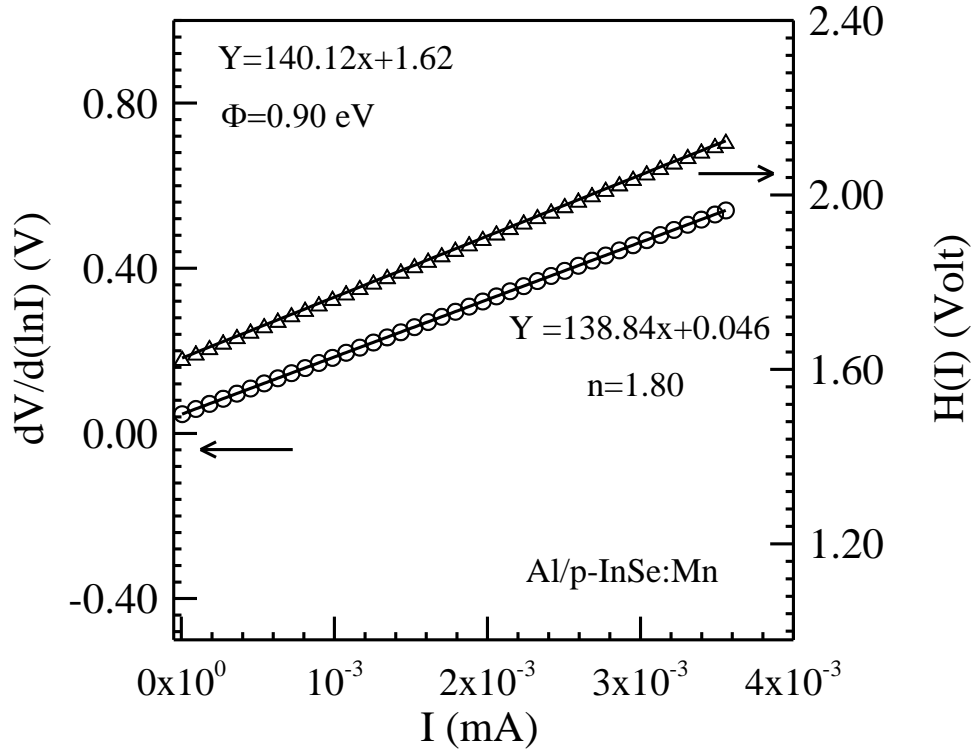
Cheung fonksiyonları kullanılarak  $I$ - $V$  grafiklerinden faydalanılarak idealite faktörü, engel yüksekliği ve de seri direnç hesaplaması yapılmıştır. (4.1) eşitliğiyle verilen temel akım denklemi kullanılarak

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (4.6)$$

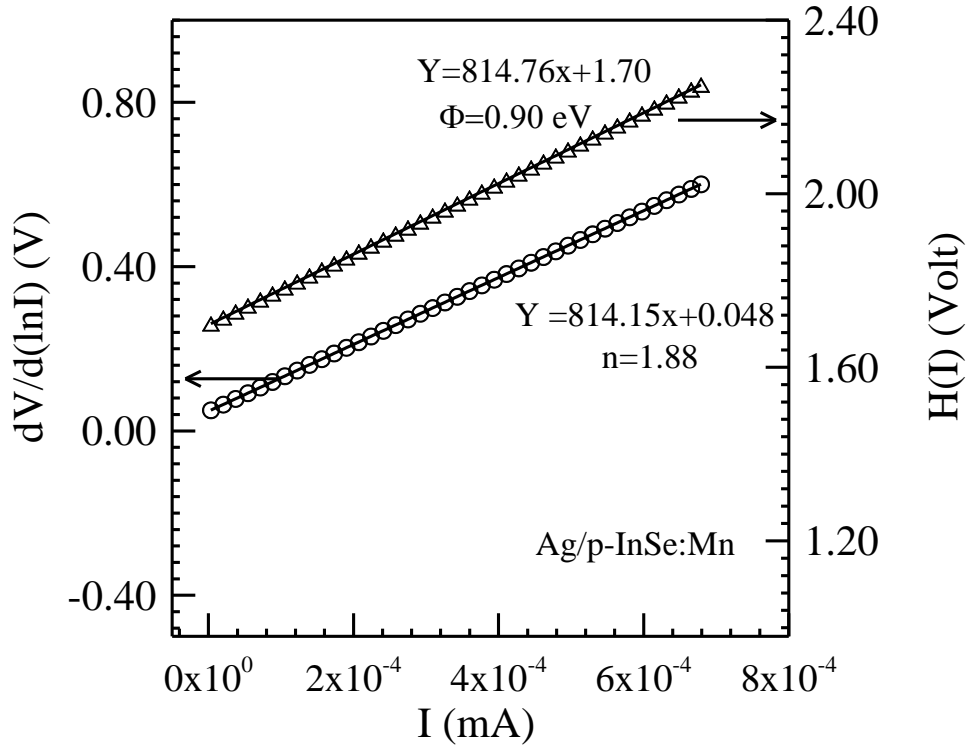
ve

$$H(I) = n\Phi_{bn} + IR_s \quad (4.7)$$

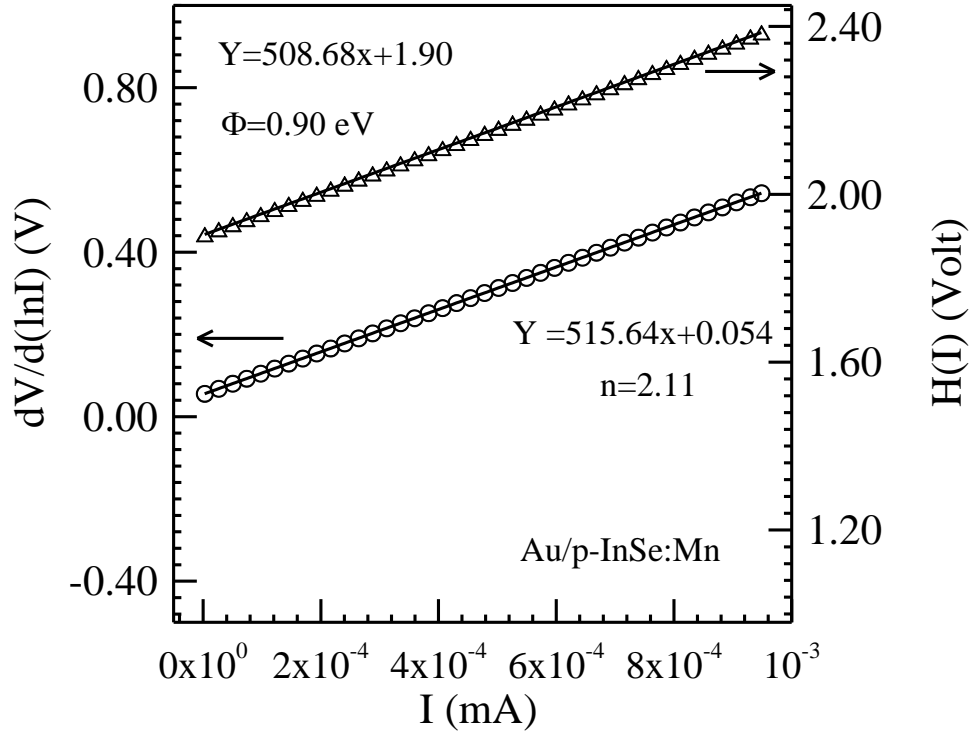
eşitlikleriyle verilen Cheung fonksiyonları elde edilir. Doğru beslem  $\ln(I)$ - $V$  grafiklerinin büyük voltajlara karşılık gelen lineer olmayan kısımları yukarıdaki (4.6) ve (4.7) denklemlerine göre lineerize edilerek  $dV/d(\ln I)$ - $I$ ,  $H(I)$ - $I$  grafikleri elde edilmiştir (Şekil 4.14-25). Diyotların nötral bölge seri dirençleri, idealite faktörleri ve engel yükseklikleri bu fonksiyonlar yardımıyla yeniden elde edilmiştir. (4.6) denklemiyle verilen  $dV/d(\ln I)$ 'nın  $I$ 'ya göre grafiği çizilirse bir doğru elde edilir. Bu doğrunun  $I=0$  iken düşey ekseni kestiği noktadan idealite faktörü ve bu doğrunun eğiminden de seri direnç elde edilir. (4.7) eşitliğiyle verilen  $H(I)$ 'nın  $I$ 'ya karşı grafiği çizildiğinde yine bir doğru elde edilir. (4.6)'dan elde edilen idealite faktörü kullanılarak  $H(I)$ - $I$  grafiğindeki doğrunun  $I=0$  iken düşey ekseni kestiği noktadan da diyodun engel yüksekliği elde edilir. Bu doğrunun eğiminden de seri direnç bulunabilir. Yapılan hesaplamalar neticesinde elde edilen bazı parametreler Çizelge 4.2'de verilmiştir.



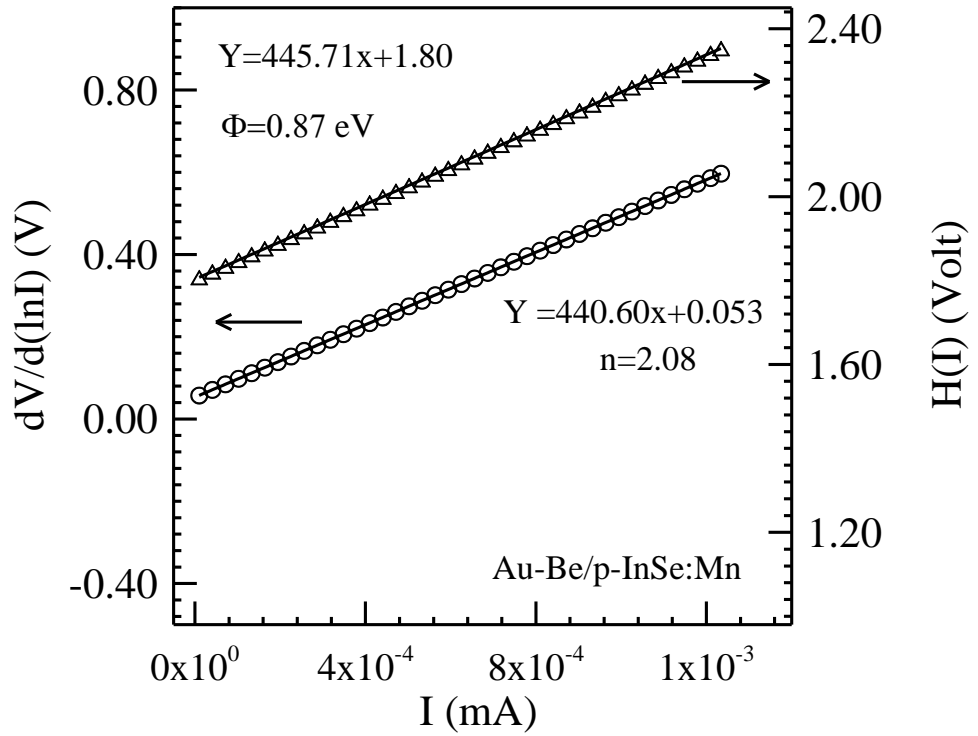
Şekil 4.14. Al/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında  $dV/d(\ln I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  grafiği



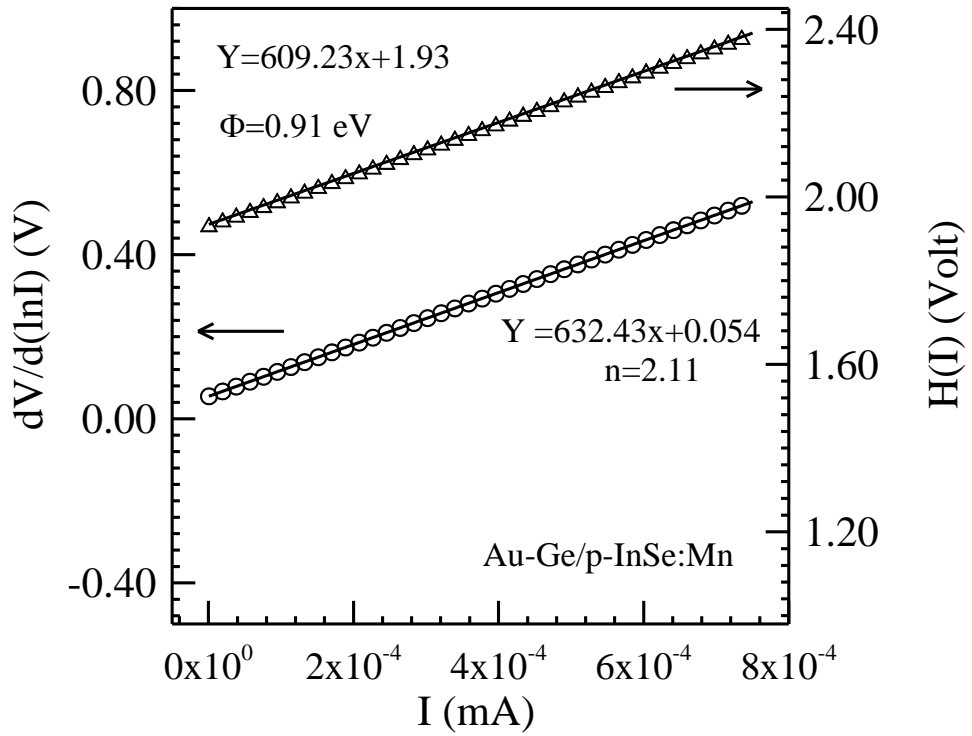
Şekil 4.15. Ag/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında  $dV/d(\ln I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  grafiği



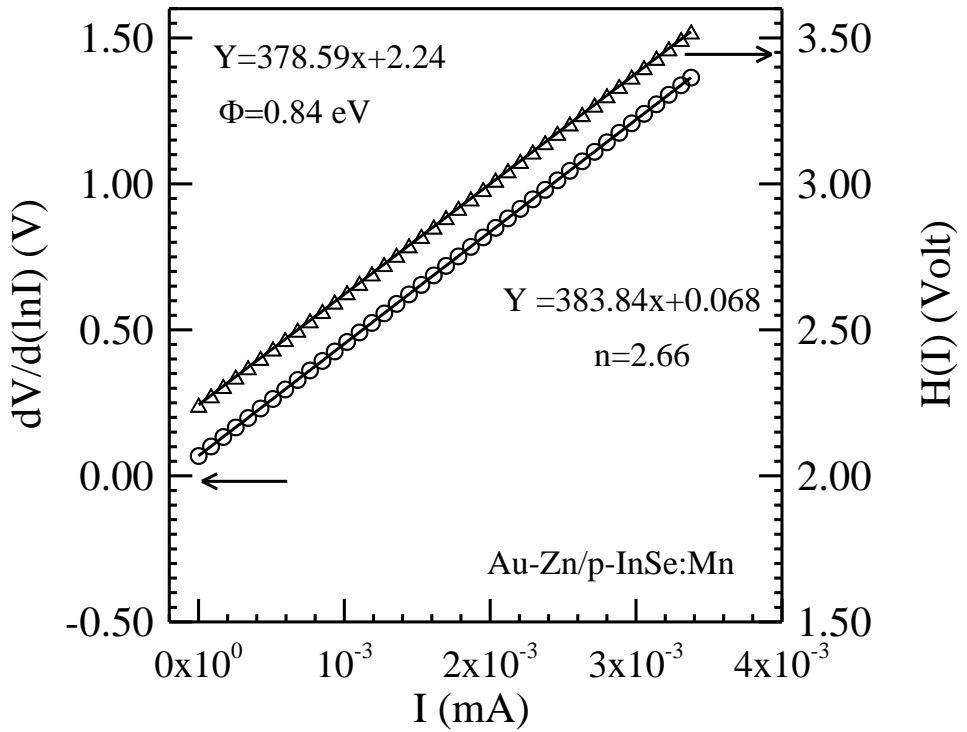
Şekil 4.16. Au/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında  $dV/d(\ln I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  grafiği



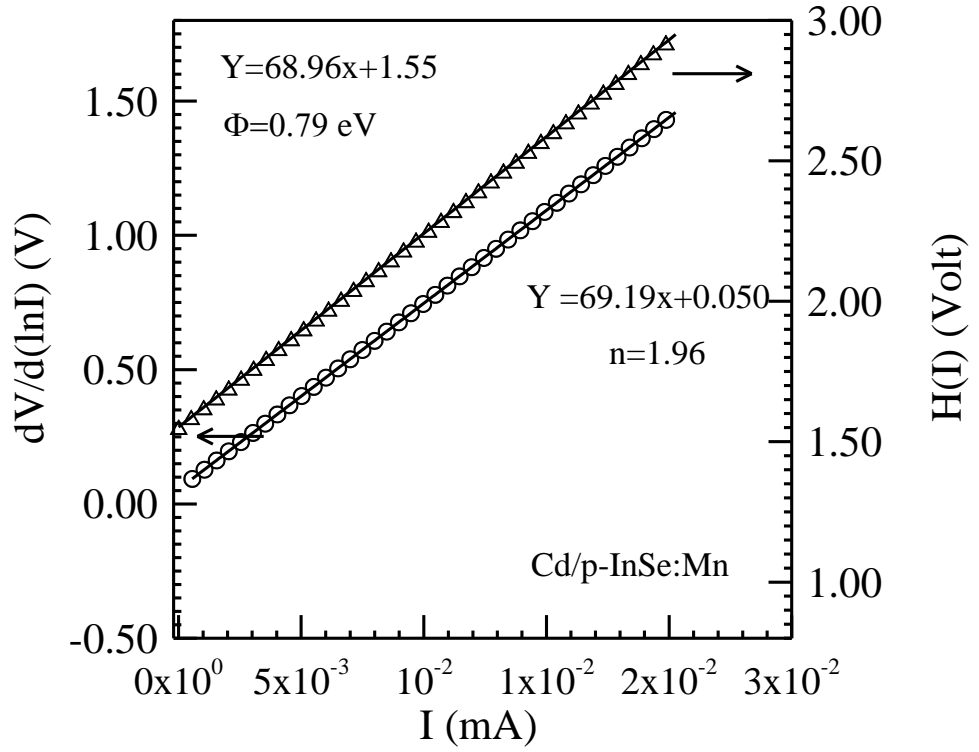
Şekil 4.17. Au-Be/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında  $dV/d(\ln I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  grafiği



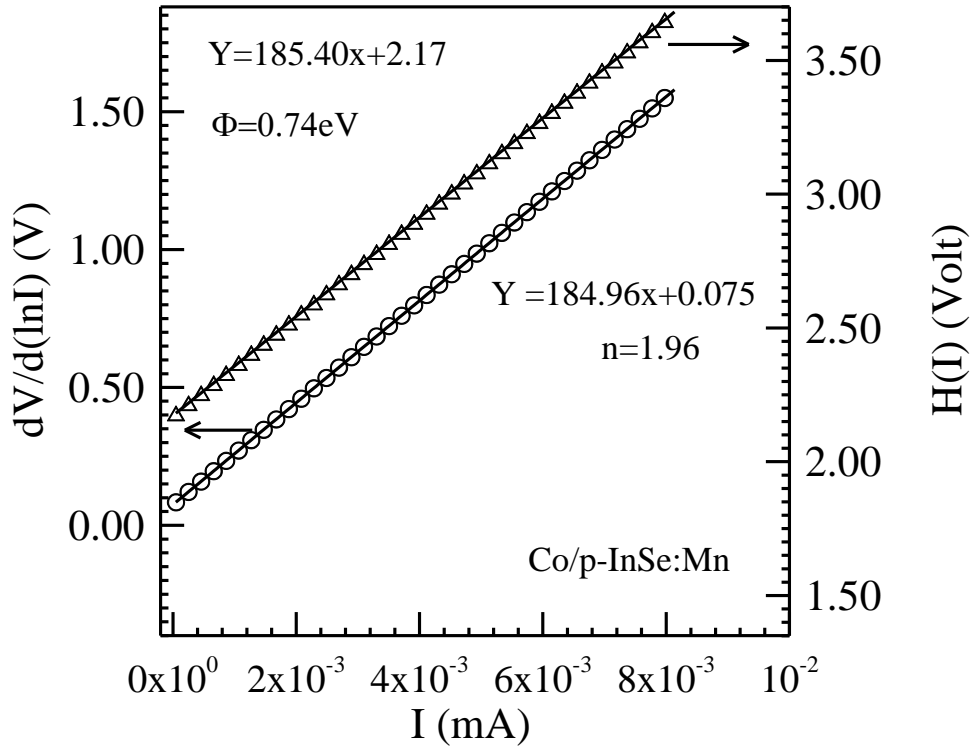
Şekil 4.18. Au-Ge/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında  $dV/d(\ln I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  grafiği



Şekil 4.19. Au-Zn/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında  $dV/d(\ln I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  grafiği

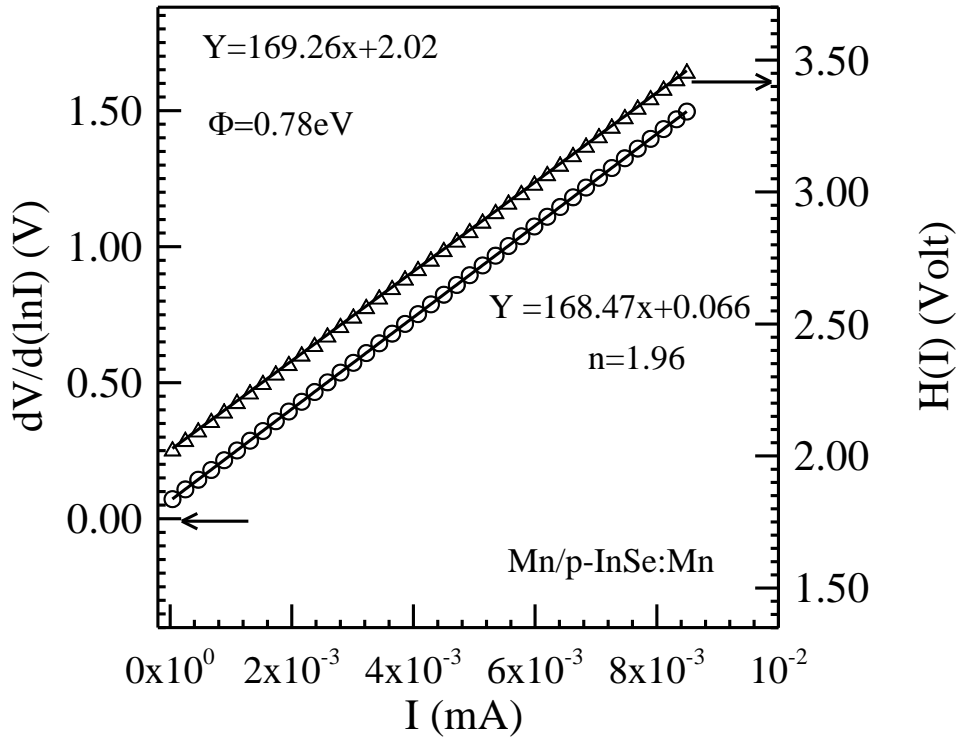


Şekil 4.20. Cd/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında  $dV/d(\ln I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  grafiği

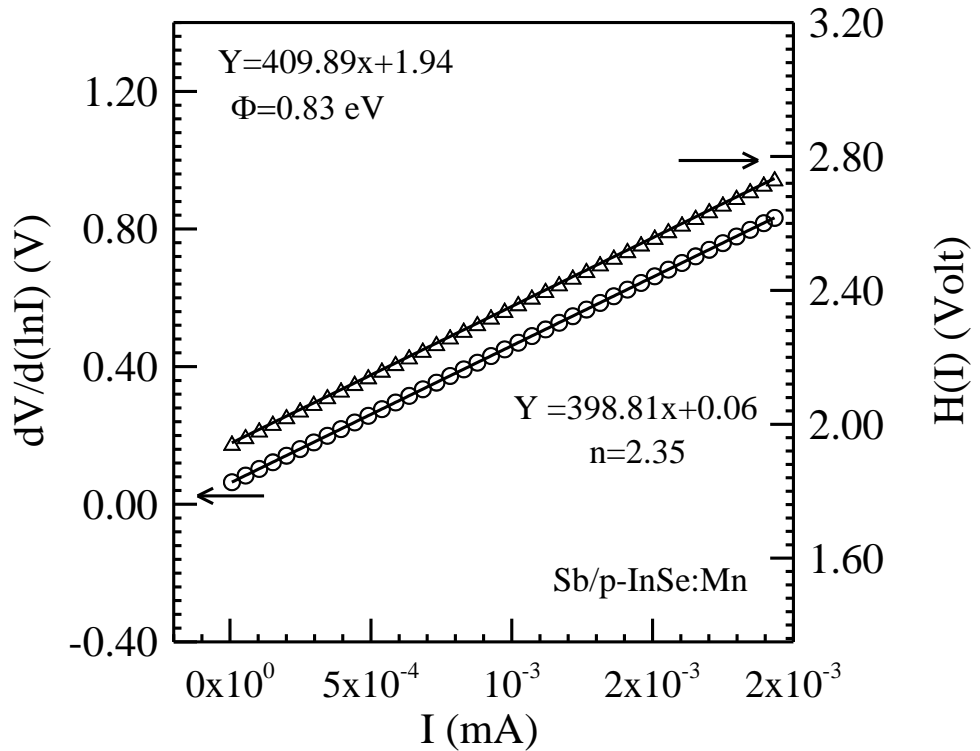


Şekil 4.21. Co/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında  $dV/d(\ln I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  grafiği

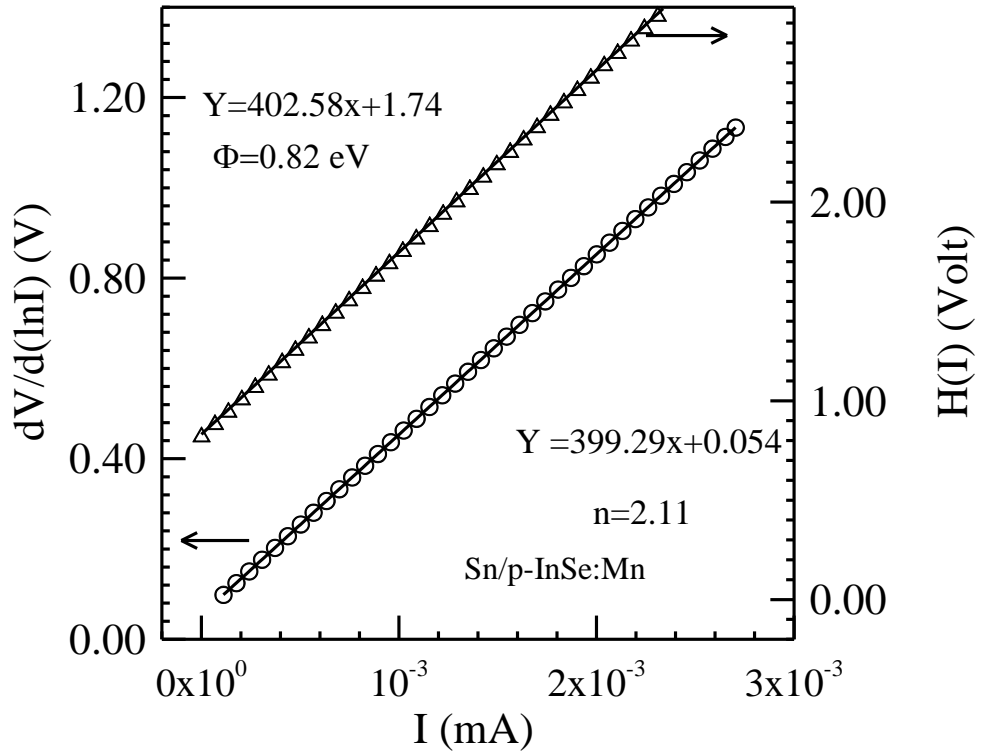




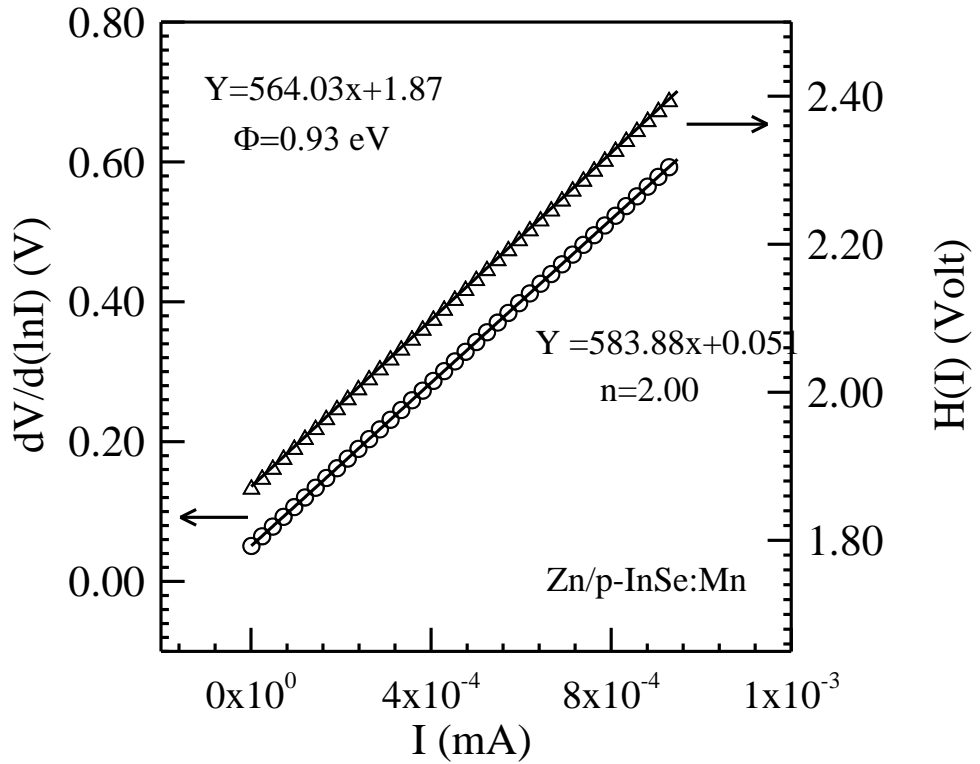
Şekil 4.22. Mn/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında  $dV/d(\ln I)$ -I ve  $H(I)$ -I grafiği



Şekil 4.23. Sb/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında  $dV/d(\ln I)$ -I ve  $H(I)$ -I grafiği



Şekil 4.24. Sn/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında  $dV/d(\ln I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  grafiği



Şekil 4.25. Zn/p-InSe:Mn diyodu için oda sıcaklığında  $dV/d(\ln I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  grafiği

Çizelge 4.2. Cheung fonksiyonları kullanılarak hesaplanan metal/p-InSe:Mn diyotlarına ait bazı parametreler

<b>Metal</b>	<b>İdealite Faktörü</b>	<b>Engel Yüksekliği (eV)</b>	<b><math>dV/d(\ln I)-I</math> grafiğinden elde edilen <math>R_s</math> (<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>H(I)-I</math> grafiğinden elde edilen <math>R_s</math> (<math>\Omega</math>)</b>
Cd	1,96	0,79	69,19	68,96
Au-Zn	2,66	0,84	383,84	378,59
Al	1,80	0,90	138,84	140,12
Au-Be	2,08	0,87	440,60	445,71
Ag	1,88	0,90	814,15	814,76
Au-Ge	2,11	0,91	632,43	609,23
Co	1,96	0,74	184,96	185,40
Sn	2,11	0,82	399,29	402,58
Au	2,11	0,90	515,64	508,68
Sb	2,35	0,83	398,81	409,89
Mn	1,96	0,78	168,47	169,26
Zn	2,00	0,93	583,88	564,03

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Metal-yarıiletken kontaklar ile ilgili çalışmalar, özellikle kontak yapılarının akım iletim mekanizmaları ve engel oluşum fiziğinin anlaşılması bakımından artarak devam etmektedir. Hemen hemen bütün yarıiletken elektronik ve optoelektronik cihazların önemli bir kısmını oluşturan metal-yarıiletken kontak yapısı yarıiletken fiziğinde önemli bir yere sahiptir. Bu metal-yarıiletken kontakların en önemli özelliklerinden birisi de Schottky engel yüksekliğidir.

Schottky modeline göre, Schottky diyotların engel yükseklikleri metalin iş fonksiyonuna bağlıdır (Sze 1981). Schottky engel yüksekliğinin belirlenmesinde yüzey hallerinin etkisini ilk defa Bardeen (1947) belirtmiştir. Schottky kontaklarda arayüzey hallerinin ilk belirlemeleri, metal iş fonksiyonunun bir fonksiyonu olarak değişik metallere engel yüksekliğinin analiz edilmesiyle deneysel olarak Cowley ve Sze tarafından yapılmıştır (Cowley and Sze 1965).

Bu çalışmada öncelikle p-InSe:Mn yarıiletkeni kaplama ünitesine konularak mat tarafına In metali buharlaştırılmış sonra azot gazı ortamında tavlama fırınında 300°C'de 3 dk tavlama yapılarak omik kontak kısmı yapılmıştır. Schottky kontak yapmak için 12 farklı materyal kullanılmıştır (Au, Cd, Ag, Co, Mn, Sn, Zn, Sb, Al, Au-Be, Au-Ge, Au-Zn). Kullanılan bu materyaller öncelikle temizleme işleminden geçirilmiştir. Fakat p-InSe:Mn numunesi tabakalı bir yarıiletken olduğundan ve ayna parlaklığına sahip olduğundan dolayı taban malzeme herhangi bir temizleme işlemine veya mekanik parlatma işlemine maruz bırakılmamıştır.

Böylece p-InSe:Mn kristaline uygun kontaklar yapılarak Metal/p-InSe:Mn Schottky diyotları elde edilmiştir. Elde edilen her bir diyodun oda sıcaklığında ve karanlık ortamda bir bilgisayar programı yardımıyla otomatik olarak akım-voltaj ( $I-V$ ) ölçümleri alınmıştır.  $\ln(I)-V$  grafiklerinin lineer bölgelerine yapılan uygun fitlerden idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri hesaplanmıştır. ( $I-V$ ) karakteristik grafiklerinden

de görüldüğü üzere Metal/p-InSe:Mn kontaklarının Schottky diyot özelliği gösterdiği görülmüştür. Hesaplanan karakteristik parametrelerde birbirinden farklılık söz konusudur. Her bir diyot için farklı bir idealite ve engel yüksekliği değeri bulunmuştur. Düşük idealite faktöründen dolayı Au-Zn/p-InSe:Mn diyonu en iyi diyot özelliği gösteren diyot olarak belirlenmiştir.

Bir diyonun idealite faktörü  $n=1$  değerine ne kadar yakınsa diyot o kadar ideallığe yaklaşmıştır. Metal-yarıiletken arayüzeyindeki doğal oksit tabakasının ve de arayüzey hallerinin varlığı diyonun idealite faktörünün artmasına neden olur. Bir yarıiletken yüzeyi ne kadar temiz olursa olsun bir metalle kontak haline getirildiği zaman, çok ince bile olsa, doğal bir oksit arayüzey tabakası meydana gelmektedir. İdealite faktörünün 1'den büyük olması farklı nedenlere atfedilmektedir. Bunları şu şekilde izah edebiliriz: 1) Metal-yarıiletken arasında ince bir oksit tabakasının ve arayüzey hallerinin varlığı, 2) Yüksek katkılı yarıiletkenlerde tünelleme akımı, 3) Arayüzeyde elektrik alan etkisiyle imaj kuvvetinin düşmesi, 4) Uzay yükü bölgesinde jenerasyon/rekombinasyon akımlarının varlığı olabilir (Werner and Güttler 1991).

Farklı materyaller kullanıldığında farklı bir idealite faktörü değeri bulunması ve bunun da farklı bir engel yüksekliği değerine karşılık gelmesi söz konusudur. Bu farklılığın sebebi aynı zamanda kullanılmış olunan 12 farklı materyalin iş fonksiyonunun farklılığı olarak da düşünülebilir. Farklı olarak ideal olmayan davranışlar ise arayüzey tabakası, arayüzey halleri ve de seri direnç etkisine bağlanmıştır. Bu yüzden kullanılan materyaller için Cheung Fonksiyonları kullanılarak seri direnç hesaplaması yapılmıştır. Çünkü diyonu ideallikten uzaklaştıran etkenlerden birisi de seri direnç etkisidir. Yapılan seri direnç hesaplamalarında  $dV/d(\ln I)-I$  ve  $H(I)-I$  grafiklerinden elde edilen seri direnç değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Çalışma daha fazla elementle, alışımla devam edilerek daha ileri seviyelere taşınacaktır. Böylece çok daha kaliteli sonuçlar alma imkanı doğacaktır.

## KAYNAKLAR

- Abay, B., Onganer, Y., Sağlam, M., Efeoğlu, H., Türüt, A., Yoğurtçu, Y. K., 1997. Solid State Electron, 41, 924.
- Abay, B., Güder, H., S., Efeoğlu, H., Yoğurtçu, Y., K., 1998. Urbach-Martienssen tails in Er-doped and undoped n-type InSe. Physica B, (254)148-155.
- Abay, B., Onganer, Y., Sağlam, M., Efeoğlu, H., Türüt, A., Yoğurtçu, Y. K., 2000. Current-voltage and capacitance-voltage characteristics of metallic polymer/InSe(:Er) Schottky contacts. Microelectronic Engineering, 51-52, 689-693.
- Abha and Warriar A.V.R., 1982. Photoluminescence studies on the layer semiconductor InSe. J. Appl. Phys., 53 (7), 5169-5171.
- Abidri, B., Ghaffour, M., Abdellaoui, A., Bouslama, M., Hiadsi, S., Monteil, Y., 2010. AES, LEED and PYS investigation of Au deposits on InSe/Si(1 1 1) substrate. Applied Surface Science 256, 3007–3009.
- Amato, G., Manfredotti, C., Meliga, M., Mellano, W., 1984. InSe photoelectrochemical solar cells. Solar Cells, 13(1), 19-28.
- Anand, S., Carlsson, S. B., Deppert, K., Montelius, L., and Samuelson, L., 1996. Electron transport at Au/InP interface with nanoscopic exclusions. J Vac. Sci. Technol. B., 14(4), 2794-2798.
- Asubay, S., 2008. Metal/p-InP/Metal Schottky kontakların akım-kapasite-gerilim karakteristiklerinin metal iş fonksiyonuna bağımlılığının incelenmesi. Doktora tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
- Ateş, A., Gürbulak, B., Doğan, S., Tüzemen, S., Yıldırım, T., and Yıldırım, M., 2001. InSe ve InSe:Ho Tek Kristallerinin Büyütülmesi, Optik ve Galvanomagnetik Özelliklerinin İncelenmesi. TFD II. Ulusal Yoğun Madde Fiziği Kongresi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Ateş, A., Gürbulak, B., Yıldırım, M., and Tüzemen, S., 2004. Absorption measurements in InSe:Ho single Crystal under an electric field: Czechoslovak Journal of Physics, 54(3), 377-385.
- Ateş, A., Yıldırım, M., and Gürbulak B., 2004. Investigation of the electrical properties of Ho-doped InSe single crystal. Physica E (21), 85-90.
- Ateş, A., Kundakçı, M., Akaltun, Y., Gürbulak, B., Yıldırım, M., 2007. Effective mass calculation for InSe, InSe:Er crystals. Physica E (36), 217–220.
- Aydoğan, Ş., 2004. Sn/PPy/n-Si/Au-Sb yapının bazı karakteristik parametrelerinin sıcaklığa bağlı akım-voltaj, kapasite-voltaj ve kapasite-frekans ölçümlerinden tayin edilmesi. Doktora tezi, A. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Ayyıldız, E., Sağlam, M., Nuhoglu, Ç., Temirci, C., Biber, M., Türüt, A., Yalçın, N., 2001. Au/n-Si Schottky Diyotların Kapasite-Frekans Karakteristiklerinden Arayüzey Hal Dağılım Eğrilerinin Belirlenmesi. TFD II. Ulusal Yoğun Madde Fiziği Kongresi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Bardeen, J., 1947. Surface State and Rectification at a Metal-Semiconductor Contact. Phys. Rev., 71, 717-27.
- Bobo, J. F., Couderc, S., Arnoult A., Fontaine, C., and Mamy, R., 2004. Comparative I(V) study of pure Schottky contacts used in spin-LEDs. Solid-State Electron., 48(5), 845-849.

- Braun, F., 1874. On the current conduction through metal sulphides (in German). *Ann. Phys. Chem.*, 153, 556.
- Brillson, L. J., 1993. *Contacts To Semiconductors*, Noyes Publications, New Jersey.
- Camassel, J., Merle, P., Mathieu H., and Chevy, A., 1978. Excitonic absorption-edge of indium selenide. *Phys. Rev. B*, 17, 4718-4725.
- Card, H., C., and Rhoderick, E., H., 1971. *J. Phys. D* (3), 1589.
- Chand, S., and Kumar, J., 1997. Electron transport and barrier inhomogeneties in palladium silicide Schottky diodes. *Applied physics A*, (65), 497-503.
- Chand, S., 2004. On the intersecting behaviour of current-voltage characteristics of inhomogeneous Schottky diodes at low temperatures. *Semiconductor Science and Technology*, (19), 82-86.
- Chand, S., and Bala, S., 2005. Analysis of current-voltage characteristics of inhomogeneous Schottky diodes at low temperatures. *Appl. Surf. Sci.* 252(2), 358-363.
- Chattopadhyay, P. and Daw, A.N., 1986. On the current transport mechanism in a metal-semiconductor (MIS) diode. *Solid State Electron.*, 29, 555-60.
- Cheung, S. K. and Cheung, N. W., 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Appl. Phys. Lett.*, 49(2), 85-87.
- Choi, I., and Yu Y. P., 2003. Properties of phase-pure InSe films prepared by metalorganic chemical vapor deposition with a single-source precursor. *Journal of Applied Physics* 93(8), 4673.
- Cowley, A. M., and Sze, S. M., 1965. Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems. *Journal of Applied Physics*, 66, 3212-20.
- Crowell, C. R., and Sze, S. M., 1965. Electron-optical-phonon scattering in the emitter and collector barriers of semiconductor-metal-semiconductor structures. *Solid-State Electron.*, 8, 979.
- Damodara Das, V., Sathyanarayanan, J., Damodare, L., 1997. Effect of annealing and surface treatment on the efficiency of photoelectrochemical (PEC) solar cells with vacuum-deposited n-InSe thin film electrode, *Surface and Coatings Technology*, 95, 669-971.
- De Blasi, C., Micocci, G., Mongelli, S., and Tepore, A., 1982. Large InSe crystals grown from stoichiometric and non-stoichiometric melts. *J. Cryst. Growth*, 57, 482-486.
- Depeursinge, Y., Doni, E., Girlanda, R., Baldereschi, A., Maschke, K., 1978. Electronic properties of layer semiconductor InSe. *Solid State Commun.* 27(12), 1449-1453.
- Dieter, K. S., 1990. *Semiconductor Material and Device Characterization*. John Wiley and Sons.
- Duman, S., 2006. n-InSe ve n-InSe:Sn tek kristallerinin yasak enerji aralığına elektrik alanın etkisi ve n-InSe:Sn yarıiletkeninin Schottky kontak davranışı. Doktora Tezi, A. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Duman, S., Gürbulak, B., Türüt, A., 2007. Temperature-dependent optical absorption measurements and Schottky contact behavior in layered semiconductor n-type InSe:Sn. *Applied Surface Science*, 3899-3905.
- Duman, S., Gürbulak, B., Doğan, S., Türüt, A., 2009. Electrical characteristics and inhomogeneous barrier analysis of Au-Be/p-InSe:Cd Schottky barrier diodes. *Microelectronic Engineering*, 86, 106-110.

- Gouskov, A., Camassel, J., and Gouskov, L., 1982. Growth and characterization of III-VI layered crystals like GaSe, GaTe, InSe,  $\text{GaSe}_{1-x}\text{Te}_x$  and  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Se}$  Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials 5(4), 323-413.
- Guesdon, J. P., Julien, C., Balkanski, M. and Chevy, A., 1987. Growth conditions and optical properties of  $\text{In}_x\text{Se}_{1-x}$  thin films. Phys. Stat. Sol. A-Applied Research, 101(2), 495-501.
- Gürbulak, B., Doktora Tezi, 1997. İkili (InSe, InSe:Er, GaSe, GaSe;Gd) ve üçlü ( $\text{TlGaSe}_2$ ;Gd) tek kristallerinin büyütülmesi soğurma ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi. A. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Gürbulak, B., Yıldırım, M., Abay, B., Tüzemen, S., Alieva, M. and Yoğurtçu, Y. K., 1998. Growth and optical properties of Ho doped n-type indium selenide. Phys. Stat.Sol. (A), 168, 495-500.
- Gürbulak, B., 1999. Growth and optical properties of Dy doped and undoped n-type InSe single crystal. Solid State Communications, 109, 665-669.
- Gürbulak, B., Yıldırım, M., Ateş, A., Doğan, S. and Yoğurtçu Y. K., 1999. Growth and temperature dependence of optical properties of Er doped and undoped n-type InSe. Jpn. J. Appl. Phys, 38, 5133-5136.
- Hasegawa, Y., Abe, Y., 1982. Electrical and optical characteristics of a Schottky barrier on a cleaved surface of layered semiconductor InSe. Phys. Stat. Sol. A, 70, 615.
- Hirohata, A., Moodera, J., S., Berera, G., P., 2006. Structural and electrical properties of InSe polycrystalline films and diode fabrication. Thin Solid Films, 510, 247 – 250.
- Im, H. J., Ding, Y., Pelz, J. P. and Choyke, W. J., 2001. Nanometer-scale test of the Tung model of Schottky-barrier height inhomogeneity. Phys. Rev. B, 64(7), 075310.
- Imai, K., Suzuki, K., Haga, Ti, Haegawa, Y. and Abe, Y., 1981. Phase diagram of In-Se system and crystal growth of indium monoselenide. Journal of Crystal Growth, 54, 501-506.
- Jiang, Y. L., Ru, G. P., Lu, F., Qu, X. P., Li, B. Z. and Yang, S., 2003. Ni/Si solid phase reaction studied by temperature-dependent current-voltage technique. Journal of Applied Physics, 93 (2), 866-870.
- Kampen, T. U. and Monch, W., 1995. Lead contacts on Si(111):H-1x1 surfaces. Surf. Sci., 331(3), 490-495.
- Kenawy, M. A., El-Shazly, A. F., Afifi, M. A., Zayed, H. A., and El-Zahid, H A., 1991. Electrical and switching properties of InSe amorphous thin films. Thin Solid Films 200(2), 203-210.
- Khare, N., Razzini, G., and Bicelli, L. P., 1990. Electrodeposition and heat-treatment of  $\text{CuInSe}_2$  Films. Thin Solid Films, 186, 113-128.
- Kovalyuk, Z., D., Politanska, O., A., Tkachenko, V., G., Maksymchuk, I., N., Dubinko, V., V., Savchuk, A., I., 2009. Radiation resistance of photodiodes based on indium monoselenides under  $\gamma$ -irradiation. Journal of Nuclear Materials, 385, 489-494.
- Li, S., 2006. Metal-Semiconductor Contacts. Semiconductor Physical Electronics, 2nd. Ed. Springer, New York, 284-333.



- Lien, C.-D., So, F. C. T. and Nicolet, M.-A., 1984. An improved forward I-V method for nonideal Schottky diodes with high series resistance. *IEEE Transactions on Electron Devices*, ED(31), 1502-1503.
- Likforman, A., Carre, D., Hillel, R., 1978. Crystal-Structure of indium Selenide  $\text{In}_2\text{Se}_3$ . *Acta Crystallographica Section B-Structural Science*, 34, 1-5.
- Manfredotti, C. and Meliga, M., 1983. Monte Carlo simulation of solar cells. *Solar Cells*, 10(3), 211-222.
- Micocci, G., Molendini, M., Tepore, A., Rella, F. L., Siciliano, P., 1991. *J. Appl. Phys.*, 70, 6847.
- Micocci, G., Tepore A., Rella R. Siciliano P., 1995. Electrical and optical characterization of electron-beam evaporated  $\text{In}_2\text{Se}_3$  thin films. *Phys. Stat. Solidi.*, 148, 431-438.
- Mooser, E., 1976. Ed., *Physics and Chemistry of Material with Layered Structures* (Reidel Dordrecht).
- Mönch, W., 1994. Metal-semiconductor contacts and electronic properties. *Surface Science*, 299-300, 928-944.
- Mönch, W., 1999. 125 years metal-semiconductor contacts: Where do we stand?. *Advances in Solid State Physics*, 39, 1-13.
- Mönch, W., 1999. Barrier heights of real Schottky contacts explained by metal-induced gap states and lateral inhomogeneties. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 17, 1867.
- Neamen, D. A., 1992. *Semiconductors Physics and Devices*. R. R. Donnelley & Sons Company, 746, Sydney, Australia (Çevirenler Prof. Dr. Mustafa Sağlam and Doç. Dr. Aytunç Ateş, 2007).
- Norde, H., 1979. A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *J. Appl. Phys.*, 50(7), 5052-5053.
- Olguin, D., Canterero A., Ulrich., Syassen K., 2003. Effect of Pressure on Structural roperties and Energy Band Gaps  $\gamma$ -InSe. *Phys. Stat. Sol. B*, 235(2), 456-463.
- Osvald, J., and Horvath, Z. J., 2004. Theoretical study of the temperature dependence of electrical characteristics of Schottky diodes with an inverse near-surface layer. *Appl. Surf. Sci.*, 234 (1-4), 349-354.
- 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 Applications of Metal-Semiconductor Rectifiers. *Thin Solid Films*, 48, 261-91.
- Sanchez-Royo, J., F., Pellicer-Porres, J., Segura, A., Gilliland, S., J., Safonova, O., Chevy, A., 2007. Buildup of the InSe/M interface (M=Pd, Au) studied by X-ray photoemission and X-ray absorption spectroscopy. *Surface Science*, 601, 3778-3783.
- Schlüter, M., 1973. *Nuovo Cimento*, 13(B), 313.
- Schmitsdorf, R. F., Kampen, T. U., Monch, W., 1997. Explanation of the linear correlation between barrier heights and ideality factors of real metal-semiconductor contacts by laterally nonuniform Schottky barriers. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 15 (4), 1221-1226.
- Schubert, K., Dorre, E., and Günsel, E., 1954. *Kristalchemische Ergebnisse an Phasen aus Elementen*, *Naturwissenschaften*, (41), 448.
- Segura, A., Guesdon, J. P., Besson, J. M., Chevy, A., 1983. Photoconductivity and photovoltaic effect in indium selenide. *J. Appl. Phys.*, 54(2), 876-888.

- Shigetomi, S., and Ikari, T., 1991. Crystalline InSe films prepared by RF-sputtering technique. *Japanese Journal of Applied Physics*, 30, L2127-L2129.
- Shigetomi, S., Ikari, T., 2002. Optical and electrical properties of layer semiconductor n-InSe doped with Sn. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 41, 5565-5566.
- Shigetomi, S., and Ikari, T., 2003. Electrical and optical properties of n-and p-InSe doped with Sn and As. *Journal of Applied Physics*, 93, 2301-2303.
- Song, Y. P., Van Meirhaeghe, R. L., Lafl'ere, W, H, and Cardon, F., 1986. On the difference in apparent barrier height as obtained from capacitance-voltage and current-voltage-temperature measurements on Al/P-InP schottky barriers. *Solid-State Electron*. 29(6), 633-638.
- Sugaike, K., 1957. Crystal structure of In-Se alloys. *Mineral J. (Japan)*,(3), 63.
- Szatkowski, J., and Sieranski, K., 1992. *Solid-St. Electron*.35, 1013.
- Sze, S. M., 1981. *Physics of Semiconductor Devices 2<sup>nd</sup> Edn.* John Wiley and Sons. Inc., New York.
- Temirci, C., 2000. Doktora Tezi, A. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Tung, R. T., Levi, A. F. J., Sullivan, J. P., and Schrey, F., 1991. Schottky-barrier inhomogenetiyy at epitaxial NiSi<sub>2</sub> interfaces on Si(100) *Phys. Rev. Lett.*, 66(1), 72-75.
- Tung, R. T., 1992. Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers. *Appl. Phys. Lett.*, 58, 2821-23.
- Tung, R. T., 2001. Recent advances in Schottky barrier concepts, *Materials Science and Engineering R* 35, 1-138.
- Usami, A., 2006. Optical and electrical modeling of nanocrystalline solar cells. *Nanostructured Materials for Solar Energy*, 81-104.
- Werner, J. H., 1988. Schottky barrier and p-n junction I-V plots-small signal evaluation. *Appl. Phys. A*, (47), 291-300.
- Werner, J. H., and Güttler, H., H., 1991. *J. Appl. Phys.* (69), 1522.
- Zaoui, X., Mamy, R., Chevy, A., 1988. Au/InSe interface formation: A photoemission study. *Surface Science* (204), 174-182.
- Zhu, S. Y., Van Meirhaeghe, R. L., Detavernier, C., Cardon, F., Ru, G. P., Qu, X. P., and Li, B. Z., 2000. Barrier height inhomogeneities of epitaxial CoSi<sub>2</sub> Schottky contacts on n-Si (100) and (111). *Solid-State Electron.*, 44(4), 663-671.
- Ziel, A. V., 1968. *Solid State Physical Electronics*, Prentice-Hall, Inc, New Jersey, 97-245.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Erzurum doğumlu Zeynep ELKOCA, ilk ve orta öğrenimini Erzurum'da tamamladı. Erzurum Anadolu Lisesi'nden mezun olduktan sonra 2004 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü'nü kazandı ve 2008 yılında mezun oldu. Halen Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında yüksek lisans öğrencisidir.