

**Au/n-CdTe YAPILARIN ELEKTRİKSEL VE OPTİKSEL
ÖZELLİKLERİ**

Nergiz BALCI

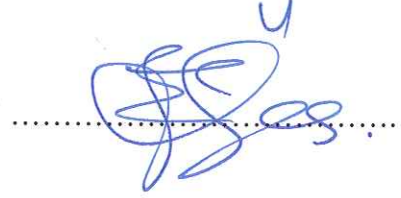
**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EYLÜL 2008
ANKARA**

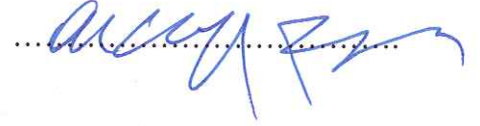
Nergiz BALCI tarafından hazırlanan Au/n-CdTe YAPILARIN ELEKTRİKSEL VE OPTİKSEL ÖZELLİKLERİ adlı bu tezin Yüksek Lisans olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Metin ÖZER
Tez Danışmanı Fizik Bölümü



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği/oy çokluğu ile FİZİK Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

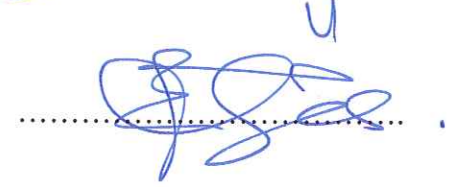
Prof. Dr. Necati YALÇIN
Fen Bilgisi Öğretmenliği Anabilim Dalı, G. Ü.



Doç. Dr. Selim ACAR
Fizik Anabilim Dalı, G. Ü.



Yrd. Doç. Dr. Metin ÖZER
Fizik Anabilim Dalı, G. Ü.



Tarih: 12/09/2008

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nermin ERTAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Nergiz BALCI

**Au/n-CdTe YAPILARIN ELEKTRİKSEL VE OPTİKSEL
ÖZELLİKLERİ**
(Yüksek Lisans Tezi)

Nergiz BALCI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Eylül 2008

ÖZET

Bu çalışmada, 10x10x0,5 mm boyutlarında, (111) yönelimli, n-tipi CdTe yarıiletken üzerine buharlaştırma metodu ile Au/n-CdTe yapılar oluşturuldu. Hazırlanan bu yapıların 150-350 K sıcaklık aralığında akım-voltaj (I-V) karakteristikleri belirlendi. Schottky diyotların engel yüksekliği, idealite faktörleri ve bazı diğer parametreleri farklı ışık frekans aralıklarına sahip ışık filtreleri kullanılarak hesaplandı. Schottky diyotların engel yüksekliği oda sıcaklığında 0,35 eV elde edildi. Engel yükseklikleri ve idealite faktörlerinin ışık frekansı ile değiştiği gözlemlendi. Oda sıcaklığında I-V karakteristiklerinden hesaplanan engel yüksekliklerinin artan ışık şiddetiyle azaldığı bulundu.

Bilim Kodu : 202. 01. 147
Anahtar Kelimeler : n-CdTe, Schottky engeli, idealite faktörü
Sayfa Adedi : 77
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Metin Özer

**ELEKTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF Au/n-CdTe
STRUCTURES
(M.Sc. Thesis)**

Nergiz BALCI

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
September 2008**

ABSTRACT

In this study, the Au/n-CdTe structures were prepared on n type CdTe wafer (10x10x0,5 mm) with (111) orientation by metal evaporating method. The current-voltage (I-V) characteristics of prepared these structures have been determined in the temperature range 150-350 K. The evaluations of the experimental data, barrier heights, ideality factors and some other parameters of the Schottky diodes were calculated in the different light frequency ranges by using light filters. The barrier height was obtained 0,35 eV at room temperature. The barrier heights and the ideality factors are observed changing with light frequency. The barrier heights calculated from the I-V characteristics are found to decrease with increasing light intensity.

Science Code : 202. 01. 147

Key Words : n-CdTe, Schottky barrier, ideality factor

Page Number : 77

Adviser : Assist. Prof. Dr. Metin Özer

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER	3
2.1. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklar.....	3
2.1.1. İdeal metal-yarıiletken kontaklar	3
2.2. Metal-Yarıiletken Kontaklarda Akım İletim Mekanizması.....	8
2.2.1. Termiyonik emisyon teorisi (TE)	9
2.2.2 Difüzyon teorisi	11
2.2.3 Termiyonik emisyon-difüzyon teorisi	12
2.2.4 Engel boyunca tünelleme	14
2.2.5 T_0 etkili akım iletimi.....	16
2.3. Metal Yarıiletken Yapıların Fiziği	17
2.3.1 İdeal MIS diyod	18
2.3.2 MIS yapılarda akım-iletim mekanizması	21
2.4. Potansiyel Değişim Modeli.....	25
2.4.1 Gaussian engel dağılımı.....	27

Sayfa

2.4.2. Akım(I) ve sığa(C) için etkin potansiyel engel yüksekliği.....	28
2.4.3. Sıcaklığa bağlı potansiyel engel yüksekliği.....	30
2.4.4 İdealite faktörünün voltaj ve sıcaklığa bağlılığı.....	31
2.5. Işığın Yarıiletkenle Etkileşmesi.....	31
2.6. Işığın Soğurulması.....	33
2.6.1 Doğrudan band aralıklı yarıiletkenler.....	33
2.6.2. Dolaylı band aralıklı yarıiletkenler.....	35
2.6.3. Diğer soğurmalar.....	35
2.7. Birleşme Olayları.....	36
2.7.1 Işıyıcı birleşme.....	37
2.7.2. Auger birleşme.....	38
2.7.3. Tuzaklar yoluyla birleşme.....	39
3. DENEYSEL YÖNTEM	41
3.1 MIS Yapıların Hazırlanması.....	41
3.1.1 Kristal temizleme.....	41
3.1.2 Omik kontakın oluşturulması	42
3.1.3 Doğrultucu kontakın oluşturulması.....	44
3.2 Kullanılan Ölçüm Düzenekleri	46
3.2.1. Akım-Voltaj (I-V) ölçüm düzeneği	46
4. DENEYSEL SONUÇLAR.....	48
4.1 Giriş	48
4.2 Değişik Sıcaklıklar İçin Akım-Voltaj (I-V) Karakteristikleri	48

Sayfa

4.3 Işık Şiddetine ve Farklı Dalga Boylarındaki Filtrelere Bağlı Akım-Voltaj (I-V) Karakteristikleri.....	56
5. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	71
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	77

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Diyodun değişik sıcaklıklardaki akım–voltaj karakteristiğinden elde edilen; idealite faktörü, doyum akımı, potansiyel engel yüksekliği.....	51
Çizelge 4.2. Diyodun beyaz filtre ($300\text{ nm} < \lambda < 900\text{ nm}$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım–voltaj karakteristiğinden elde edilen; idealite faktörü, doyum akımı, potansiyel engel yüksekliği.....	62
Çizelge 4.3. Diyodun kırmızı filtre ($600\text{ nm} < \lambda$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım–voltaj karakteristiğinden elde edilen; idealite faktörü, doyum akımı, potansiyel engel yüksekliği.....	63
Çizelge 4.4. Diyodun koyu kırmızı filtre ($300\text{ nm} < \lambda < 400\text{ nm}$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım–voltaj karakteristiğinden elde edilen; idealite faktörü, doyum akımı, potansiyel engel yüksekliği.....	64
Çizelge 4.5. Diyodun sarı filtre ($400\text{ nm} < \lambda$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım–voltaj karakteristiğinden elde edilen; idealite faktörü, doyum akımı, potansiyel engel yüksekliği.....	65
Çizelge 4.6. Diyodun siyah filtre ($800\text{ nm} < \lambda$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım–voltaj karakteristiğinden elde edilen; idealite faktörü, doyum akımı, potansiyel engel yüksekliği.....	66
Çizelge 4.7. Diyodun turuncu filtre ($700\text{ nm} < \lambda$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım–voltaj karakteristiğinden elde edilen; idealite faktörü, doyum akımı, potansiyel engel yüksekliği.....	67
Çizelge 4.8. Diyodun yeşil filtre ($400\text{ nm} < \lambda$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım–voltaj karakteristiğinden elde edilen; idealite faktörü, doyum akımı, potansiyel engel yüksekliği.....	68

Çizelge**Sayfa**

Çizelge 4.9. Farklı dalga boylarına sahip tüm filtrelerde ki voltajlara göre idealite faktörleri.....	69
Çizelge 4.10. Farklı dalga boylarına sahip tüm filtrelerdeki ışık kaynağının çıkış güçlerine bağlı potansiyel engel yükseklikleri.....	70

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Metal/ n-tipi yarıiletken kontak için ($\Phi_m > \Phi_s$) elektron enerji band diyagramı.....	4
Şekil 2.2. Metal /n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için elektron enerji band diyagramı.....	6
Şekil 2.3. $\Phi_m < \Phi_s$ için metal/n-tipi yarıiletken omik kontakın elektron enerji band diyagramı	8
Şekil 2.4. Metal/n-tipi CdTe yarıiletkende doğru beslem altında temel akım iletim mekanizmaları.....	9
Şekil 2.5. Doğru beslemde Termiyonik Alan Emisyonu ve Alan Emisyonu band diyagramı (ξ 'nin negatif olduğu çok katkılı yarıiletken için).....	15
Şekil 2.6. Metal/n-Yarıiletken kontaklarda çok katlı tünelleme modeline göre band diyagramı.....	16
Şekil 2.7. Farklı akım iletim mekanizmalarını gösteren $nkT/q-kT/q$ grafiği.....	17
Şekil 2.8. Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) diyod.....	18
Şekil 2.9. $V=0$ durumunda ideal bir MIS diyodun enerji-band diyagramı.....	19
Şekil 2.10. $V \neq 0$ durumunda ideal MIS diyodun enerji-band diyagramı.....	20
Şekil 2.11. Metal/yalıtkan/n-CdTe yapısının enerji band diyagramı.....	23
Şekil 2.12. Metal/yalıtkan/p-CdTe yapısının enerji band diyagram.....	23
Şekil 2.13. Homojen olmayan bir Schottky kontakın iki boyutlu diyagramı.....	26
Şekil 2.14. Bir yarıiletken üzerine gelen tek renkli bir ışımın.....	32
Şekil 2.15. Doğrudan band aralıklı bir yarıiletkende bir fotonun soğurulması.....	34
Şekil 2.16. Dolaylı band aralıklı bir yarıiletken de fonon yayınlama veya soğurma yoluyla fotonların soğurulması.....	35

Şekil	Sayfa
Şekil 2.17. Doğrudan band aralıklı bir yarıiletkende foton soğurulması. a) İki adımlı, b) elektron-deşik çifti oluşturmaksızın.....	36
Şekil 2.18. a) Doğrudan band aralıklı, b) Dolaylı band aralıklı, yarıiletkenlerde ışık birleşmeler.....	37
Şekil 2.19. Auger birleşmesinde ortaya çıkan enerji a) iletim bandında, b) valans bandında, bir elektrona verir.....	39
Şekil 2.20. Bir yarıiletkenin yasak enerji aralığında bulunan, a) bir tuzak düzeyiyle iki adımlı birleşme, b) izinli yüzey durumları.....	40
Şekil 3.1. Omik kontak maskesi.....	43
Şekil 3.2. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulmada kullanılan buharlaştırma sistemi.....	43
Şekil 3.3. Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan maske.....	44
Şekil 3.4. Au/n-CdTe diyodun hazırlanış sırası a) kimyasal temizleme, b) omik kontak, c) doğrultucu kontak oluşturulması, d) ölçme uçlarının hazırlanması.....	45
Şekil 3.5. Au/n-CdTe diyodunun şematik gösterimi.....	45
Şekil 3.6.a. Akım-voltaj ölçümleri için kullanılan düzenek.....	46
Şekil 3.6.b. Farklı ışık filtreleri ile akım-voltaj ölçümleri için kullanılan düzenek.....	47
Şekil 3.7. Işık kaynağının şeması.....	47
Şekil 4.1. Au/n-CdTe yapının karanlıkta 150-350 K sıcaklık aralığındaki akım-voltaj karakteristikleri.....	50
Şekil 4.2. Diyodun engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı değişimi.....	52
Şekil 4.3. Diyodun doyma akımının sıcaklığa bağlı değişimi.....	52
Şekil 4.4. Diyodun $\ln(I_0) - 1000/nT$ değişimi.....	53
Şekil 4.5. Diyodun sıcaklığa bağlı nT değişimi.....	53

Şekil	Sayfa
Şekil 4.6. Diyodun $n-1000/T$ değişimi.....	54
Şekil 4.7. Diyodun $\ln(I_0/T^2)-1000/nT$ değişimi.....	55
Şekil 4.8. Au/n-CdTe yapının oda sıcaklığında 5 watt cihaz çıkış gücü için akım-voltaj karakteristikleri.....	57
Şekil 4.9. Au/n-CdTe yapının oda sıcaklığında 10 watt cihaz çıkış gücü için akım-voltaj karakteristikleri.....	57
Şekil 4.10. Au/n-CdTe yapının oda sıcaklığında 20 watt cihaz çıkış gücü için akım-voltaj karakteristikleri.....	58
Şekil 4.11. Au/n-CdTe yapının oda sıcaklığında 40 watt cihaz çıkış gücü için akım-voltaj karakteristikleri.....	58
Şekil 4.12. Au/n-CdTe yapının oda sıcaklığında 60 watt cihaz çıkış gücü için akım-voltaj karakteristikleri.....	59
Şekil 4.13. Au/n-CdTe yapının oda sıcaklığında 80 watt cihaz çıkış gücü için akım-voltaj karakteristikleri.....	59
Şekil 4.14. Au/n-CdTe yapının oda sıcaklığında 100 watt cihaz çıkış gücü için akım-voltaj karakteristikleri.....	60
Şekil 4.15. Au/n-CdTe yapının oda sıcaklığında 150 watt cihaz çıkış gücü için akım-voltaj karakteristikleri.....	60
Şekil 4.16. Au/n-CdTe yapının oda sıcaklığında 200 watt cihaz çıkış gücü için akım-voltaj karakteristikleri.....	61
Şekil 4.17. Au/n-CdTe yapının oda sıcaklığında 250 watt cihaz çıkış gücü için akım-voltaj karakteristikleri.....	61
Şekil 4.18. Au/n-CdTe yapının beyaz filtre ($300\text{ nm} < \lambda < 900\text{ nm}$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım-voltaj karakteristikleri.....	62
Şekil 4.19. Au/n-CdTe yapının kırmızı filtre ($600\text{ nm} < \lambda$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım-voltaj karakteristikleri.....	63
Şekil 4.20. Au/n-CdTe yapının koyu kırmızı filtre ($300\text{ nm} < \lambda < 400\text{ nm}$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım-voltaj karakteristikleri.....	64
Şekil 4.21. Au/n-CdTe yapının sarı filtre ($400\text{ nm} < \lambda$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım-voltaj karakteristikleri.....	65

Şekil	Sayfa
Şekil 4.22. Au/n-CdTe yapının siyah filtre ($800 \text{ nm} < \lambda$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım-voltaj karakteristikleri.....	66
Şekil 4.23. Au/n-CdTe yapının turuncu filtre ($700 \text{ nm} < \lambda$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım-voltaj karakteristikleri.....	67
Şekil 4.24. Au/n-CdTe yapının yeşil filtre ($400 \text{ nm} < \lambda$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım-voltaj karakteristikleri.....	68
Şekil 4.25. Oda sıcaklığında farklı dalga boylarına sahip tüm filtreler için idealite faktörü(n)-ışık kaynağı çıkış gücü karakteristikleri.....	69
Şekil 4.26. Farklı dalga boylarına sahip tüm filtreler için potansiyel engel yüksekliği-ışık kaynağı çıkış gücü karakteristikleri.....	70

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Diyotun etkin alanı
A^{**}	Richardson sabiti
A_{ox}	Yalıtkan oksit tabakanın alanı
C	Sığa
C_{ox}	Yalıtkan oksit tabakanın sığası
C_{ss}	Arayüzey sığası
d_{ox}	Yalıtkan oksit tabakanın kalınlığı
E_c	İletkenlik bandı enerjisi
E_f	Fermi enerjisi
E_g	Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
E_v	Valans bandı enerjisi
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_i	Yalıtkan dielektrik sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
G	İletkenlik
k	Boltzman sabiti
n	İdealite faktörü
N_{ss}	Arayüzey durum yoğunluğu
R_s	Seri direnç
T	Sıcaklık
τ	Arayüzey tuzakların ömrü
V_{ox}	Yalıtkan oksit yüzeyine düşen gerilim

Simgeler**Açıklama** W_D

Tükenim tabakası genişliği

 w

Açısal frekans

Kısaltmalar**Açıklama**

AE

Alan Emisyonu

d.c.

Doğru akım

I-V

Akım-gerilim

MS

Metal-Yarıiletken

MIS

Metal-Yalıtkan-Yarıiletken

MOS

Metal-Oksit-Yarıiletken

TAE

Termiyonik Alan Emisyonu

TE

Termiyonik Emisyon

TED

Termiyonik Emisyon Difüzyon

Au/n-CdTe YAPILARIN ELEKTRİKSEL VE OPTİKSEL**ÖZELLİKLERİ****(Yüksek Lisans Tezi)****Nergiz BALCI****GAZİ ÜNİVERSİTESİ****FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ****Eylül 2008****ÖZET**

Bu çalışmada, 10x10x0,5 mm boyutlarında, (111) yönelimli, n-tipi CdTe yarıiletken üzerine buharlaştırma metodu ile Au/n-CdTe yapılar oluşturuldu. Hazırlanan bu yapıların 150-350 K sıcaklık aralığında akım-voltaj (I-V) karakteristikleri belirlendi. Schottky diyotların engel yüksekliği, idealite faktörleri ve bazı diğer parametreleri farklı ışık frekans aralıklarına sahip ışık filtreleri kullanılarak hesaplandı. Schottky diyotların engel yüksekliği oda sıcaklığında 0,35 eV elde edildi. Engel yükseklikleri ve idealite faktörlerinin ışık frekansı ile değiştiği gözlemlendi. Oda sıcaklığında I-V karakteristiklerinden hesaplanan engel yüksekliklerinin artan ışık şiddetiyle azaldığı bulundu.

Bilim Kodu : 202. 01. 147
Anahtar Kelimeler : n-CdTe, Schottky engeli, idealite faktörü
Sayfa Adedi : 77
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Metin Özer

**ELEKTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF Au/n-CdTe
STRUCTURES
(M.Sc. Thesis)**

Nergiz BALCI

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
September 2008**

ABSTRACT

In this study, the Au/n-CdTe structures were prepared on n type CdTe wafer (10x10x0,5 mm) with (111) orientation by metal evaporating method. The current-voltage (I-V) characteristics of prepared these structures have been determined in the temperature range 150-350 K. The evaluations of the experimental data, barrier heights, ideality factors and some other parameters of the Schottky diodes were calculated in the different light frequency ranges by using light filters. The barrier height was obtained 0,35 eV at room temperature. The barrier heights and the ideality factors are observed changing with light frequency. The barrier heights calculated from the I-V characteristics are found to decrease with increasing light intensity.

Science Code : 202. 01. 147

Key Words : n-CdTe, Schottky barrier, ideality factor

Page Number : 77

Adviser : Assist. Prof. Dr. Metin Özer

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Metin ÖZER'e öncelikle teşekkür ederim. Metal kaplama sistemiyle Schottky bariyeri oluşturulmasında yardımcı olan sayın hocam Prof. Dr. Tofiq S. MAMMADOV'a ve yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım sayın hocam Doç. Dr. Selim ACAR'a burada teşekkürlerimi sunmak isterim. Bu çalışmaya maddi destek sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri'ne teşekkür ederim. Yine manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme ve özellikle anneme, tez yazım aşamasında bana yeterli zaman veren değerli takım liderim Tarık GÜL'e teşekkürü bir borç bilirim.

1.GİRİŞ

Elektronikte yarıiletken malzemelerin kullanımıyla büyük bir sanayi oluşmuş ve yarıiletken teknolojisi gelişmiştir. Yarıiletken aygıtlarda kullanılan yarıiletken kristal yüzeyleri, genellikle laboratuvar ortamında organik kirler ve tabii oksit tabakalarıyla kaplı olurlar. Bu nedenle yarıiletken kristallerin yüzey yapıları üretilen aygıtların parametrelerini çok önemli ölçüde etkilemektedir [1-8]. Yarıiletken malzemelerden aygıt hazırlanması kullanım amacına uygun yüzey hazırlanmasıyla mümkün olabilmektedir.

Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) ve metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapılar, metal ile yarıiletken tabakaların arasına yalıtkan bir tabakanın oluşturulmasıyla meydana gelir. Metal-yarıiletken eklemlerde, metal ile yarıiletken arayüzeyinde bir potansiyel engel oluştuğunu ilk olarak Schottky ortaya atmıştır. Schottky engelli metal-yarıiletken (MS) ve metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılar arasındaki fark arayüzeydeki yalıtkan tabaka kalınlığıdır. Yalıtkan tabaka, metal ve yarıiletken tabakaları birbirinden izole eder. Yalıtkan tabakanın kalınlığı yaklaşık 100 Å altında ise MIS yapı, üstünde ise MOS yapı oluşmaktadır [2,3]. Metal ve yarıiletken öyle seçilmelidir ki bu iki maddenin iş fonksiyonları arasındaki fark eklemden bir boşalmış bölgenin oluşmasına ve dolayısıyla da yarıiletken yüzeyinin hemen altında bir elektrik alan oluşmasına sebep olsun. Böylece soğurulan fotonlar tarafından oluşturulan elektron-deşik çiftleri bu elektrik alan altında zıt yönde hareket ederek birbirinden ayrılırlar ve dış devredeki yük üzerinde fotoelektrik akımı sağlanmış olur.

Işığın etkisi, ilk olarak 1939'da Edmund Becquerel tarafından kaydedildi [16]. Bir metal ile yarıiletken arasında sıkı temas (kontak) sağlanırsa, ısısal denge kuruluncaya kadar aralarında taşıyıcı geçişleri olur. Metal-yalıtkan (MS) ve metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılarda başlıca akım-iletim mekanizmaları; termiyonik emisyon, difüzyon, termiyonik emisyon-difüzyon, termiyonik alan emisyonu, alan emisyonu, azınlık taşıyıcı enjeksiyonu, üretilme-yeniden birleşme (generation-recombination) ve çok katlı tünellemelerdir [2,7,8]. Ancak, bunlardan hangi mekanizmanın baskın olduğunu belirlemek oldukça zordur. Bu nedenle değişik sıcaklıklarda yapılan akım-

voltajın (I-V) deneysel ölçümlerden elde edilen bulgular ile hangi akım iletim mekanizmasının baskın olduğunun belirlenmesi mümkün olabilmektedir [12-15].

Yarıiletkenlerle yapılan optik çalışmalarda ilk olarak 1954’de, CdS p-n üretilmiştir [20]. CdTe, InP, CdS ve GaAs gibi geniş yasak bant aralığına sahip yarıiletkenlerde kuramsal ve deneysel çalışmalar devam etmektedir. Bu metaryaller optoelektronik sanayide yaygın olarak kullanılmaktadır. CdTe, II-VI yarıiletkenler grubunda olup, son zamanlarda özellikle optik özellikleri açısından deneysel çalışmalarda bu yarıiletken kullanılarak Schottky engelli yapıların oluşturulmasına ve incelenmesine yoğun ilgi gösterilmektedir. CdTe direk band aralığına sahip absorblayıcı bir yarıiletken olmasından dolayı optik özellikleri açısından belirli bir potansiyele sahiptir. CdTe özellikleri bakımından fotovoltaiik uygulamalarda kullanmak için cezbedici bir materyaldi [18-20].

Bu çalışmada, elektronik ve optoelektronik sanayide birçok alanda değişik amaçlar için kullanılan metal-yarıiletken yapılara örnek olarak Au/n-CdTe yapıları vakumda metal buharlaşma metodu ile hazırlandı. Hazırlanan bu yapıların karanlıkta ve farklı ışık filtreleri ile farklı ışık kaynağı çıkış gücünde I-V ölçümleri 150 K ile 350 K sıcaklık aralığında yapıldı. Hazırlanan yapının optik özelliklerini belirlemek için literatür taramalarımıza göre ilk defa bu çalışmada farklı optik filtreler kullanılarak akım-voltaj ölçümleri yapıldı ve yapıların parametreleri hesaplandı.

Tezde, Bölüm 2’de MS, MIS, MOS yapılar ve bu yapılarda ışığın yarıiletkenle etkileşmesi hakkında genel bilgiler verildi. Bölüm 3’de Au/n-CdTe yapının oluşturulması anlatıldı. Bölüm 4’de I-V ölçümlerinden elde edilen deneysel sonuçlar, grafikler ve çizelgeler verildi. Bölüm 5’de ise deneysel sonuçlar tartışıldı.

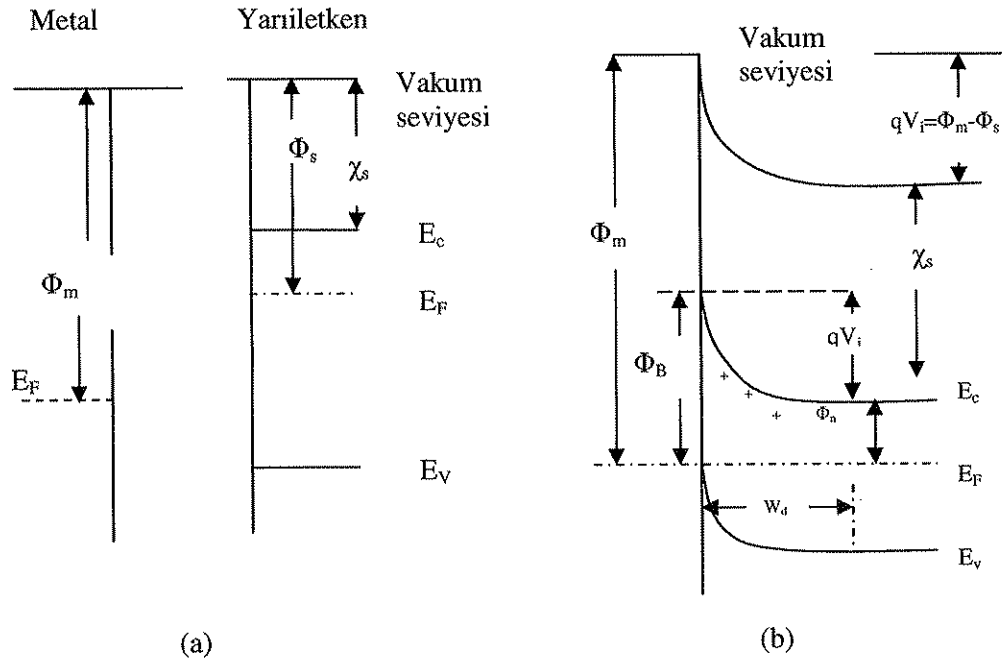
2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Metal – Yarıiletken (MS) Kontaklar

2.1.1. İdeal metal – yarıiletken kontaklar

Metal-yarıiletken kontaklar; bir metalin yarıiletkene temas ettirilmesiyle oluşturulur. Metal, yarıiletken ile kontak edildiğinde, termal denge kuruluncaya kadar metal ile yarıiletken arasında yük geçişleri olur. Metalden yarıiletkene, yarıiletkenden metale elektron geçişi; metal ile yarıiletkenin Fermi enerji düzeylerinin eşit olduğu termal denge durumuna kadar devam eder. Böylece metal-yarıiletken arayüzeyinde yüklerin ayrılmasıyla yeni bir yük dağılımı sonucunda bir potansiyel engeli oluşur. Arayüzey bölgesi, yarıiletken tarafında oluşan ve hareketli yüklerin olmadığı yüksek dirençli bir bölgedir. Metal-yarıiletken (MS) kontaklarda, metal ile yarıiletken arayüzeyinde bir potansiyel engel oluştuğunu ilk olarak Schottky, eklemde oluşan bu potansiyelin metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklandığını ise Mott açıklamıştır. Schottky-Mott teorisine göre potansiyel engeli, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki fark sebebiyle oluşmaktadır [1].

Engelin doğrultucu ya da omik olması yarıiletkenin tipine, metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına bağlıdır. Metalin iş fonksiyonunu Φ_m , yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s olmak üzere metal/n- tipi yarıiletken eklemlerde $\Phi_m > \Phi_s$ ise engel doğrultucu, $\Phi_m < \Phi_s$ ise engel omik olur. Metal/p-tipi yarıiletken eklemlerde ise $\Phi_m > \Phi_s$ için engel omik, $\Phi_m < \Phi_s$ ise engel doğrultucudur. Şekil 2.1 $\Phi_m > \Phi_s$ olan n-tipi yarıiletken ile metal kontağın elektron enerjisi band diyagramını göstermektedir (doğrultucu kontak). Şekil 2.1.a da gösterilen metalin iş fonksiyonu Φ_m , bir elektronu Fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli enerjidir. Yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s ise, yarıiletkenin Fermi enerji farkıdır ve Fermi seviyesi katkı miktarına göre değiştiği için değişken bir niceliktir. Vakum seviyesi bir metalin tam dışındaki sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesidir. Yarıiletkenin katkı miktarına bağlı olmayan elektron yakınlığı χ_s , iletkenlik bandının en üst sınırından bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gerekli enerji miktarıdır.



Şekil 2.1. Metal/ n-tipi yarıiletken kontak için ($\Phi_m > \Phi_s$) elektron enerji band diyagramı. a) Birbirinden ayrılmış nötral materyaller b) Kontak oluştuktan sonra termal denge durumu.

Şekil 2.1.b doğrultucu kontak oluşturulup denge kurulduktan sonraki enerji band diyagramını göstermektedir. Metal-yarıiletken kontak oluşturulduğunda, metaldeki elektrondan daha yüksek enerjiye sahip yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar, iki taraftaki Fermi enerji düzeyi eşit olana kadar metale doğru akarlar. Elektronlar yarıiletkenden metale doğru gittiği için yarıiletkenin sınıra yakın bölgesinde serbest elektron konsantrasyonu azalır. İletkenlik band kenarı E_c ile Fermi seviyesi E_f arasındaki fark, azalan elektron konsantrasyonu ile artar ve termal dengede E_f tamamen serbest kaldığı için iletkenlik ve valans band kenarı Şekil 2.1.b deki gibi bükülür. Metale geçen iletkenlik band elektronları, arkalarında donar iyonları bırakırlar, böylece yarıiletkenin metale yakın kısmında hareketli yükler tüketilir. Ara yüzeyin yarıiletken tarafında pozitif yükler oluşur ve metale geçen elektronlar arayüzeyden yaklaşık $0,5\text{\AA}$ uzaklıkta ince bir negatif yük tabakası oluştururlar. Sonuçta, Şekil 2.1.b'de olduğu gibi yarıiletkenden metale doğru bir elektrik alan oluşur. Yarıiletkenin yasak enerji aralığı kontak sebebiyle değişmediği için, E_v valans band kenarı E_c iletkenlik band kenarına paralel olarak kayacaktır.

Yarıiletkenin vakum seviyesi de aynı değişimi gösterir. Bunun sebebi, yarıiletkenin elektron yakınlığının kontak ile değişmemesidir. Sonuç olarak termal dengedeki sistemde, band bükülmesi miktarı, metalin iş fonksiyonu Φ_m ile yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s arasındaki farka eşittir. Bu fark $qV_i=(\Phi_m -\Phi_s)$ olarak ifade edilir. Burada V_i eklemden oluşan potansiyel yada kontak potansiyel farkı olarak bilinir ve birimi volt' tur. qV_i yarıiletkenden metale gidecek olan elektronun sahip olması gereken enerji yani engel yüksekliğidir. Bununla birlikte metalden belirlenen engel yarıiletkenden belirlenen engelden farklıdır ve

$$\Phi_B = (\Phi_m - \chi_s) \quad (2.1)$$

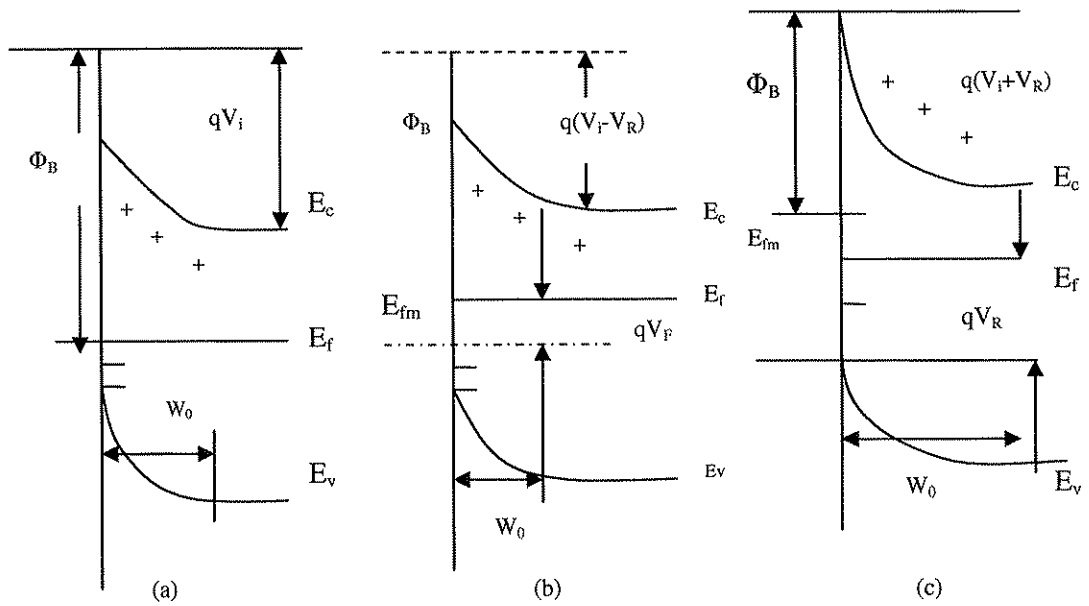
ile verilir.

$\Phi_s = \chi_s + \Phi_n$ ve $\Phi_m = qV_i + \Phi_s$ olduğu için,

$$\Phi_B = (qV_i + \Phi_n) \quad (2.1 a)$$

elde edilir. Burada $\Phi_n = (E_c - E_f)$ olup, q elektronik yüküdür.

Eş. 2.1, birbirinden bağımsız olarak Schottky ve Mott tarafından ifade edilmiştir. Schottky' ye göre yarıiletken homojen bir şekilde katkılanmıştır bu durum arayüzey tüketim bölgesinde homojen bir yük yoğunluğu verir. Bu sabit uzay yük için elektrik alan şiddeti, uzay yük tabakasının kenarından olan uzaklığı ile artar ve oluşan parabolik engel "Schottky Engeli" olarak bilinir. Mott' a göre yarıiletkenin hiç yük içermeyen ince tabakası düzenli olarak katkılanan bir yarıiletken ve metal arasında yerleştirilmiştir bu ince bölgedeki elektrik alan büyüklüğü sabittir ve potansiyel, bu bölgeye doğru geçerken çizgisel olarak artar. Engelin bu tipi "Mott Engeli" olarak bilinir.

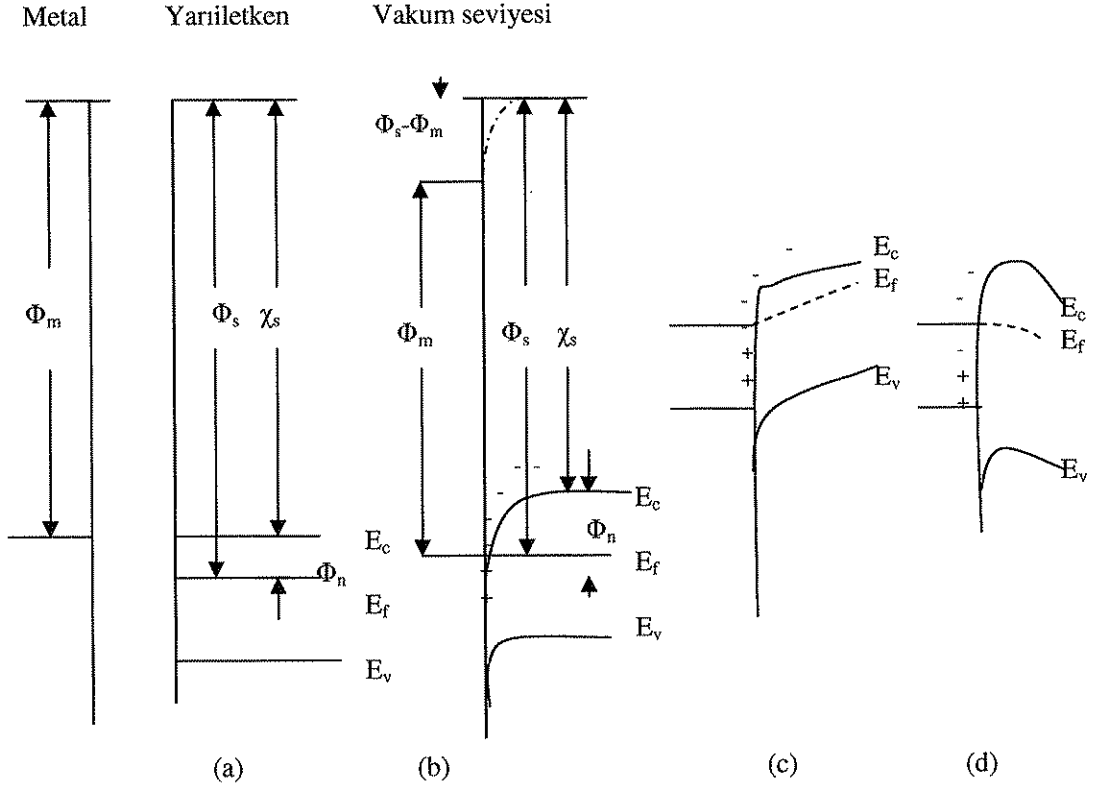


Şekil 2.2. Metal /n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için elektron enerji band diyagramı a) termal denge durumu b) doğru beslem c) ters beslem

Termal dengede potansiyel engeli aşan elektronların oranı, engeli ters yönde aşan elektronların oranı ile dengelenir ve net akım oluşmaz. Yarıiletkenin tüketim bölgesi çok az hareketli taşıyıcı içerdiği için, bu bölgenin direnci metalin ve yarıiletkenin nötr kısmının direnci ile kıyaslandığında çok yüksektir ve uygulanan dış voltajın tamamı bu bölgeye düşer. Uygulanan voltaj termal denge band diyagramını değiştirir. Bu değişim tüketim bölgesine düşen potansiyelin değişmesiyle ve band bükülmelerindeki değişiklik nedeniyle oluşur. Metal pozitif, yarıiletken negatif olacak şekilde uygulanan bir voltaj ($V=V_F$) tüketim bölgesinin genişliğini azaltır ve Şekil 2.2.b’de görüldüğü gibi bu bölgedeki voltaj; qV_i ’den $q(V_i-V_F)$ ’ye düşer. Bu durumda yarıiletkendeki elektronlar daha düşük bir engelle karşılaşacaklar, bunun sonucunda da yarıiletkenden metale elektron akımı termal denge değerine göre artacaktır. Metalden yarıiletkene elektron akımı termal denge değerine göre değişmez. Bunun sebebi metalde herhangi bir voltaj düşmesi olmaz, böylece Φ_B uygulanan voltajdan etkilenmez. Sonuç olarak, yarıiletken tarafı negatif metal pozitif olacak şekilde potansiyelin uygulandığı doğru beslem durumunda yarıiletkenden

metale doğru net bir akım mevcuttur. Doğru beslem akımı, uygulanan V_F voltajı ile üstel olarak artar [2].

Ters beslemde kontağın enerji band diyagramı Şekil 2.2.c'de gösterilmiştir. Yarıiletken pozitif, metal negatif olacak şekilde uygulanan bir voltaj ($V=-V_R$) tüketim bölgesinin genişliğini artırır ve potansiyel qV_i 'den $q(V_i+V_R)$ 'ye çıkar. Yarıiletkenden metale doğru elektron akımı ise termal denge durumuna göre azalır. Metalden yarıiletkene elektron akımı ise değişmez termal dengedekinin aynısı olur. Yarıiletkenden metale doğru olan akım doğru beslemdeki ile kıyaslandığında daha küçüktür. Böylece bu şartlar altında bahsedilen kontak tek yönde akım ileten doğrultucu kontak olur. $\Phi_m < \Phi_s$ olan n-tipi yarıiletken ile oluşturulan omik kontağın enerji band diyagramı Şekil 2.3'de görülmektedir. Şekil 2.3.a'da materyaller ayrı durumda iken arkalarında pozitif yükler bırakarak, metalden yarıiletkenin iletkenlik bandına doğru akarlar ve sınırın yarıiletken tarafında elektron yığılmasına neden olurlar. Termal dengeye ulaştığında yarıiletkenin Fermi seviyesi Şekil 2.3.b'de gösterildiği gibi $(\Phi_s - \Phi_m)$ kadar yükselir. Yarıiletkende negatif yüklerin yığılması ile oluşan tabaka Debye mesafesi kadar bir kalınlık içinde sınırlanır ve bunlar yüzey yükleridir. Metaldeki elektronların konsantrasyonu çok daha fazla olduğu için metal tarafındaki pozitif yükler de, metal yarıiletken arayüzeyinden yaklaşık $0,5\text{\AA}$ bir uzaklık içinde sınırlanmış olan yüzey yükleridir. Yarıiletken içinde oluşan bir tüketim bölgesi yoktur ve yarıiletkenden metale yada tersi yönde elektronların akması için bir potansiyel engel yoktur. Arayüzey yakınındaki bölgede elektron konsantrasyonu artırılır ve sistemin en yüksek dirençli bölgesi yarıiletken bölgesinde oluşur.



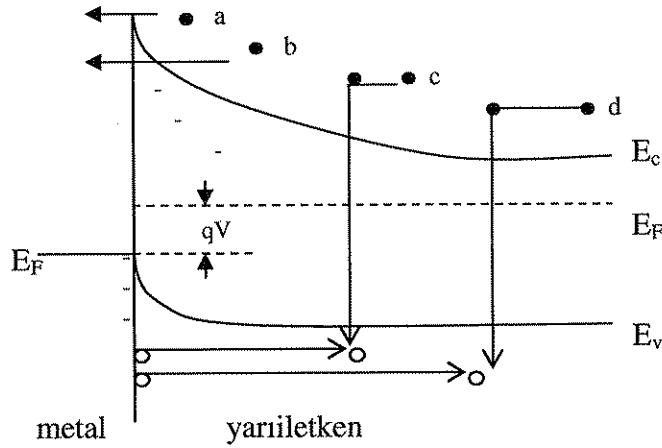
Şekil 2.3. $\Phi_m < \Phi_s$ için metal/n-tipi yarıiletken omik kontakın elektron enerji band diyagramı a) birbirinden ayrı nötral materyaller b) termal dengede kontak c) yarıiletken negatif beslemde ve d) yarıiletken pozitif beslemde

Şekil 2.3.c ve Şekil 2.3.d’de doğru ve ters beslemde yarıiletken bölgesini göstermektedir. Akımın bu bölgenin direnci ile belirleneceği açıktır ve uygulanan voltajın yönünden bağımsızdır. Doğrultucu olmayan böyle kontaklar omik kontak olarak adlandırılır.

2.2. Metal-Yarıiletken Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları

MS ve MIS yapılarında akım iletimi genellikle çoğunluk taşıyıcıları ile gerçekleşir. Sıcaklık, arayüzey durumları, seri direnç ve metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan tabaka nedeniyle akım iletim mekanizması MS ve MIS yapılarında farklılık gösterir. Bu yapılarında geçerli olabilecek akım iletim mekanizmaları şunlardır [3]; Termiyonik Emisyon (TE), Difüzyon, Termiyonik Emisyon-Difüzyon, Kuantum Mekaniksel

Tünelleme (TAE, AE, çok katlı tünelleme), Üretilme-Yeniden Birleşme, Azınlık Taşıyıcı Konsantrasyonu ve T_0 etkili akım iletimi. Şekil 2.4'de metal/n-CdTe yarıiletkenin doğru beslem altında başlıca akım iletim mekanizmaları gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Metal/n-tipi CdTe yarıiletkende doğru beslem altında temel akım iletim mekanizmaları; a) potansiyel engelin tepesi üzerinden metalin içirisine doğru elektronların iletimi (Termiyonik emisyon), b) elektronların engel içinden doğrudan kuantum-mekaniksel tünellemeleri (Engel içinde tünelleme), c) uzay yük bölgesinde yeniden birleşme, d) metalden yarıiletkene deşik enjeksiyonu.

2.2.1. Termiyonik emisyon teorisi (TE)

Yeterli ısısal enerji kazanan Schottky kontaklarda taşıyıcıların potansiyel engeli (Φ_B) üzerinden yarıiletkenden metale, yada metalden yarıiletkene geçmeleri (TE) olarak bilinir. Beethe'nin MS kontaklarda akımın çoğunluk taşıyıcıları tarafından iletildiğini kabul ederek kurduğu termiyonik emisyon varsayımları şunlardır [4]; (a) potansiyel engel yüksekliği kT/q enerjisinden çok büyüktür (b) Schottky bölgesinde taşıyıcı çarpışmaları yoktur yani taşıyıcıların ortalama serbest yolları Schottky tabakasının kalınlığından daha büyüktür (c) görüntü (hayali) kuvvetlerin etkisi ihmal edilmektedir ve akım engel yüksekliğine zayıfça bağlıdır. Bu varsayımlar doğrultusunda yarıiletkenden metale doğru akı yoğunluğu J_{sm} , potansiyel engelini

geçmeye yetecek kadar enerjiye sahip elektronların konsantrasyonu ve bunların hızı ile ifade edilir:

$$J_{sm} = \int_{E_F + q\phi_B}^{\infty} qv_x dn \quad (2.2)$$

Burada $E_F + q\phi_B$ metalden TE için gerekli minimum enerji, V_x ise iletim yönündeki taşıyıcı hızıdır. dn küçük bir enerji aralığında enerji yoğunluğudur. Bu ifadeden hareketle metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda metalden yarıiletken geçen elektronlar için akım denklemi,

$$J_{sm} = \left(\frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left[\frac{-q(\phi_B)}{kT} \right] \exp\left(\frac{qV}{kT} \right) \quad (2.3)$$

şeklinde verilir. Burada m^* taşıyıcının etkin kütlesi, k Boltzmann sabiti, h 'da Planck sabitidir. Buradan;

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp\left[\frac{-q\phi_B}{kT} \right] \exp\left(\frac{qV}{kT} \right) \quad (2.4)$$

ifadesi yazılır. Burada A^* , TE için Richardson sabitidir. Metalden yarıiletkene hareket eden elektronlar için engel yüksekliği aynı kaldığı için yarıiletkene akı yoğunluğu uygulanan gerilimden etkilenmez. Bu akım yoğunluğu dengede ($V=0$), yarıiletkenden metale geçen akım yoğunluğuna eşittir. Buna göre metalden yarıiletken doğru akan akım,

$$J_{sm} = -A^* T^2 \exp\left[\frac{-q\phi_B}{kT} \right] \quad (2.5)$$

şekline ifade edilir. Toplam akım yoğunluğu Eş. 2.4 ve yine Eş. 2.5 denklemlerinin toplamı olup,

$$J_n = \left(A^* T^2 \exp\left[\frac{-q(\phi_B)}{kT} \right] \right) \left(\exp\left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right) \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $A \cdot T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right)$ terimi, doyum akım yoğunluğudur.

2.2.2. Difüzyon teorisi

Aralarında yoğunluk farkı bulunan bölgeler arasında, yoğunluğun çok olduğu bölgeden az olduğu bölgeye doğru gerçekleşen yük geçişlerine difüzyon [5] denir. Schottky tarafından tanımlanan Difüzyon teorisinin dayandığı varsayımlar [6,7,8]; (a) potansiyel engelin yüksekliği kT/q enerjisinden büyüktür (b) tüketim bölgesindeki elektronların çarpışma etkisi ihmal edilir (c) $x=0$ ve $x=w$ 'daki taşıyıcı konsantrasyonları akımdan etkilenmemiştir (yani onlar termal denge değerine sahiptir) (d) yarıiletkendeki safsızlık konsantrasyonu dejenere değildir. Kabuller doğrultusunda tüketim bölgesindeki akım, bölgesel alan ve yoğunluk farkına bağlı olduğundan akım yoğunluğu denklemi kullanılır. Bu denklem metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için,

$$J_x = J_n = q \left[n(x) \mu E(x) + D_n \frac{\partial n}{\partial x} \right] \quad (2.7)$$

$$J_x = q D_n \left[\left(\frac{-qn(x)}{kT} \right) \left(\frac{\partial V(x)}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial n}{\partial x} \quad (2.8)$$

şeklinde dir. Burada $n(x)$ elektron yoğunluğu μ elektron mobilitesi, D_n elektron difüzyon sabiti ve $E(x)$ Schottky bölgesindeki elektrik alanıdır. Buna göre difüzyon kuramında akım ifadesi,

$$J_x = J_{SD} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.9)$$

ile verilir. Burada J_{SD} doyum akım yoğunluğu olup,

$$J_{SD} = \left(\frac{q^2 N_c D_n}{kT} \right) \left[\frac{q(V_d - V) 2N_D}{\epsilon_s} \right]^{1/2} \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \quad (2.10)$$

şeklinde ifade edilir. Burada N_c iletkenlik bandındaki etkin taşıyıcı yoğunluğu, V_d difüzyon gerilimi, N_D verici yoğunluğu, ϵ_s yarıiletkenin dielektrik geçirgenliğidir. Bu iki kuramdan elde edilen ifadeler birbirine çok benzer, bununla birlikte difüzyon kuramının doyum akım yoğunluğu, J_{SD} voltaj ile daha çabuk değişir fakat sıcaklığa bağlılığı TE'deki doyum akım yoğunluğuna göre daha küçüktür.

2.2.3. Termiyonik emisyon-difüzyon teorisi

Crowell ve Sze, TE ve difüzyon teorisini birleştirerek Termiyonik emisyon difüzyon teorisini geliştirdiler. Teori MS arayüzey kenarında tanımlanmış olan V_r rekombinasyon hızı üzerine kurulmuştur. Metal ile yarıiletken gövde arasına uygulanan gerilim, metale doğru bir elektron akışına neden olur. Taşıyıcıların bir kısmı optik fonon geri saçılmalarına bir kısmı da kuantum mekaniksel yansımalara uğradığından akım değeri azalır. Sze bunun nedenini rekombinasyon hızındaki azalmaya bağlamıştır. Termiyonik emisyon difüzyon teorisine göre elektronlar MS arayüzeyinde optik fononlarla etkileşmeksizin potansiyel engel üzerinden salınma olasılığı ve ortalama iletim katsayısı değeri göz önüne alınarak A^* Richardson sabiti A^{**} olarak değişir. Buna göre en genel akım-gerilim (I-V) ifadesi,

$$J = J_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right) \quad (2.11)$$

ile verilir. Burada T sıcaklık, n diyodun idealite faktörü ve J_0 doyma akım yoğunluğu olup,

$$J_0 = -A^{**} T^2 \exp \left[\frac{-q\phi_B}{kT} \right] \quad (2.12)$$

şeklinde ifade edilir. A^{**} , düzenlenmiş etkin Richardson sabitidir. β engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişim katsayısı olmak üzere,

$$A^{**} = A^* \exp \left(\frac{\beta}{kT} \right) \quad (2.13)$$

ile verilir. Eğer metal ile yarıiletken arasında yalıtkan bir oksit tabakası (MIS-MOS) varsa Richardson sabiti oksit tabakasına bağlı etkin değer alır ve A^{**} yerine yalıtkan oksit tabakası nedeniyle A_{etk} alınır:

$$A_{\text{etk}} = A^{**} \exp \left[\frac{-4\pi\delta}{h((2m^* \chi)^{1/2})} \right]^{1/2} \quad (2.14)$$

Burada δ , metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan oksit tabakanın kalınlığı, $m^* = m_0$ etkin kütle, h Planck sabiti, χ ise yarıiletkenin elektron yakınlığıdır. Termiyonik emisyon teorisine göre ideal bir Schottky diyotda $n = 1$ 'dir. İdeal diyottan sapmaları belirlemek amacıyla bir idealite faktörü, n tanımlanır. Buna göre akım yoğunluğu ifadesi:

$$J = J_0 \exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) \quad (2.15)$$

şeklini alır. Burada n idealite faktörü 1'den uzaklaştıkça engel yüksekliğinin voltaja bağlılığı artmaktadır. İdealite faktörü yarıiletken ile dengede arayüzey durumları (N_{ss}) ve metal yarıiletken arasındaki yalıtkan oksit tabakasının kalınlığı (δ) cinsinden,

$$n = 1 + \frac{\delta}{\epsilon_i} \left[\frac{\epsilon_s}{w} + qN_{ss} \right] \quad (2.16)$$

olarak ifade edilir. Bu denklemde ikinci terimin artması ile ideallikten uzaklaşılır. Yani idealite faktörü, hem yalıtkan tabaka kalınlığının artmasıyla hem de arayüzey durumlarının artması ile doğru olacak şekilde artmaktadır. Engel alçalması ve A^{**} 'nın alana bağımlı olması nedeniyle gerçek Schottky diyodlarında n idealite faktörü $1 < n < 1,2$ arasında değer alır.

2.2.4. Engel boyunca tünelleme

Metal-yarıiletken Schottky diyodlarında TE mekanizması yanında, elektronlar kuantum mekaniksel tünelleme ile engeli aşabilirler. Çok fazla katkılanmış dejenere ($N_d > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) yarıiletken durumunda tünelleme doğru beslemde, düşük katkılı yarıiletkenlerde de tünelleme işlemi ters beslemde ortaya çıkar [9]. Aşırı katkılanmış yarıiletken nedeniyle tüketim bölgesi incedir. Alçak sıcaklıklarda, Fermi seviyesine çok yakın elektronlar yarıiletkenden metale doğru tünelleme yapabilir. Böylece doğru beslem yönündeki akım yarıiletkenin Fermi enerjisine yakın elektronların tünellemesiyle artar. Bu duruma alan emisyonu (AE) adı verilir yüksek sıcaklıklarda, elektronların önemli bir kısmı Fermi seviyesinin üstüne doğru yükselir. İletkenlik bandından E_m kadar yukarıda bulunan bu elektronların daha yüksek enerjili olması ve bu seviyede daha düşük bir engelle karşılaşılıyor olmaları tünelleme ihtimalini artırır ve doğru beslem yönündeki akımı artırır. Bu durum Termiyonik alan emisyonu (TAE) olarak bilinir. Bu mekanizmalar Şekil 2.5’de gösterilmiştir.

Eğer sıcaklık daha da artırılırsa elektronlar potansiyel engel yüksekliğini aşabilecek kadar yeterli enerji kazanırlar ve dolayısıyla tünelleme olmadan engel üzerinden karşı tarafa rahatlıkla geçerler. Bu durum Termiyonik emisyonudur (TE). Termiyonik alan emisyonu (TAE) durumunda çok düşük doğru beslem voltajı varken, doğru beslem I-V karakteristiği,

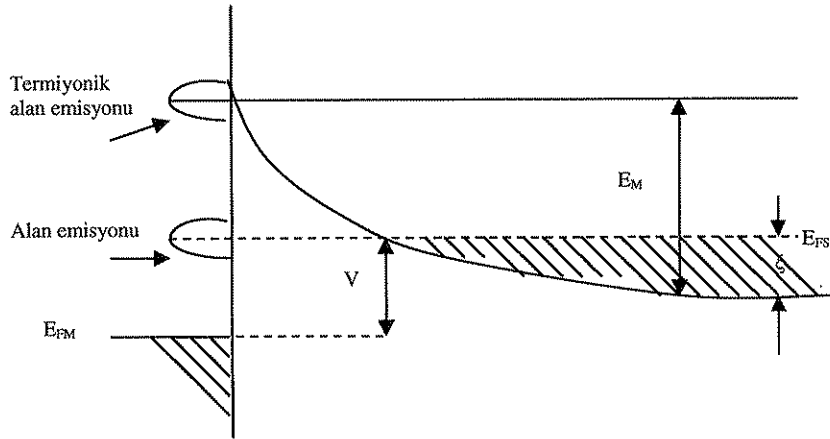
$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{E_0}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right] \quad (2.17)$$

şeklinde ifade edilir. Burada,

$$E_0 = E_{00} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (2.18)$$

$$E_{00} = h / 4\pi \left(\frac{N^*}{m^* \epsilon_s}\right)^{1/2} \quad (2.19)$$

şeklindedir. Burada N^* , etkin taşıyıcı yoğunluğu, m^* , etkin elektron kütlesi ve h , Planck sabitidir. I_0 , zayıf bir şekilde gerilime bağlı olup engel yüksekliğinin, yarıiletken parametrelerinin ve sıcaklığının bir fonksiyonudur. E_{00} enerjisi tünelleme işleminde önemli bir parametre olup, kT/E_{00} , TE 'nin ve tünellemenin önemli bir ölçüsüdür [10]. Alçak sıcaklıklarda E_{00} kT 'ye nazaran büyük bir değer alır ve $E_0 \cong E_{00}$ 'dır.



Şekil 2.5. Doğru beslemde Termiyonik Alan Emisyonu ve Alan Emisyonu band diyagramı (ξ 'nin negatif olduğu çok katkılı yarıiletken için).

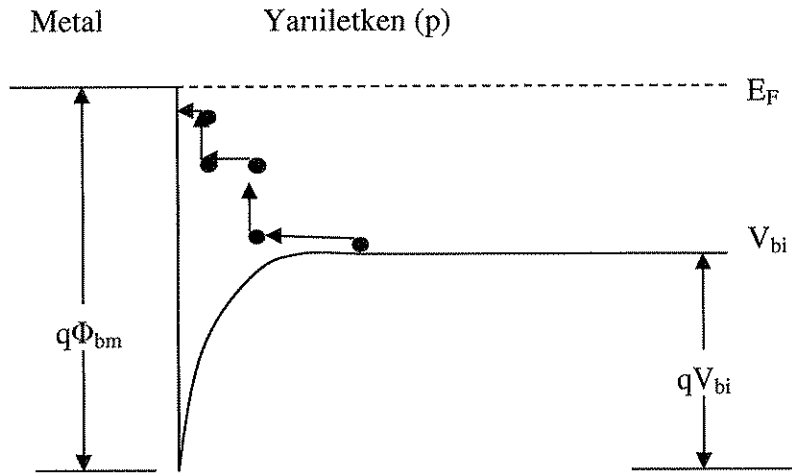
$\ln I$ - V eğrisinin eğimi sabit ve T 'den bağımsız olur bu durum alan emisyonu demektir. Yüksek sıcaklıklarda, ($E_{00} \ll kT$), $E_0 = kT$ olur. $\ln I$ - V eğrisinin eğimi q/kT olur ki, buda TE 'ye karşılık gelir. Orta sıcaklık değerleri için eğimi, q/nkT şeklinde yazabiliriz. Burada,

$$n = E_{00}/kT \left[\coth \left(\frac{E_{00}}{kT} \right) \right] \quad (2.20)$$

dir. TAE'nin diyod akımına katkısı, $E_{00} \cong kT$ olduğu zaman mümkündür. TAE'nin maksimum katkısı olduğu zaman ki E_m enerjisi,

$$E_m = qV_d \left[\cos \left(\frac{E_{00}}{kT} \right) \right]^2 \quad (2.21)$$

şeklindedir. Burada V_d , toplam band bükülme gerilimine karşılık gelir. E_m ise tüketim bölgesi kıyısında iletkenlik bandının altından ölçülür. Daha az katkılı yoğunluklarda TAE ihmal edilebilir.



Şekil 2.6. Metal/n-Yarıiletken kontaklarda çok katlı tünelleme modeline göre band diyagramı

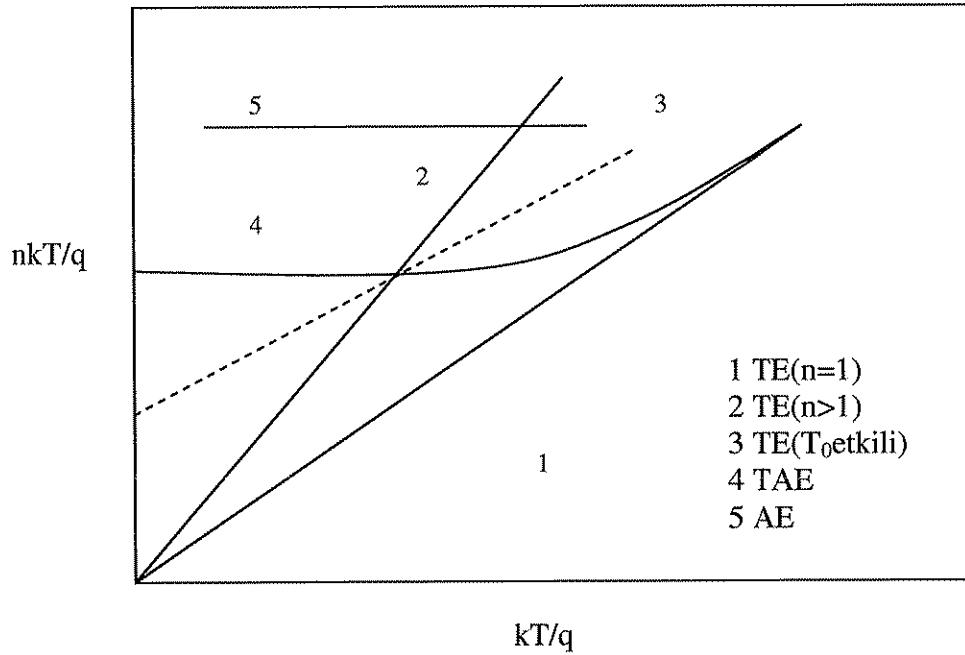
Çok katlı tünelleme için bir eklem, tüketim bölgesi boyunca yer alan tuzaklara sahip olan bir metal-yarıiletken kontak olarak tasvir edilir. p-n eklemünde, heterodiyodlarda, Schottky engelinde ve son zamanlarda yarıiletken kristallerde gözlenen bu durumda, tuzaklar boyunca tünel etkisi TE, TAE, ve AE ile kıyaslanabilir ölçüde baskın bir akım iletim mekanizmasıdır.

2.2.5. T_0 etkili akım iletimi

İdealite faktörünün 1'den büyük olması hayali kuvvet ya da arayüzey durumlarından ortaya çıkıyorsa n sıcaklıktan bağımsız olmalıdır. Fakat n'in 1'den büyük olması eğer termiyonik alan emisyonundan veya tüketim bölgesindeki rekombinasyon akımlarından kaynaklanıyorsa, idealite faktörü n sıcaklığa bağlıdır. T_0 etkili J-V karakteristiği,

$$J = A^{**} T^2 \exp \left[-\frac{q\phi_B}{k(T + T_0)} \right] \left\{ \exp \left[\frac{qV}{k(T + T_0)} \right] - 1 \right\} \quad (2.22)$$

şeklinde ifade edilir [11]. Burada T_0 geniş bir sıcaklık aralığında sıcaklık ve voltajdan bağımsız olan sabit bir parametredir. n 'in sıcaklığa bağımlılığı deneysel olarak $n = 1 + T_0/T$ olarak ifade edilir. Voltajın fonksiyonu olarak değişik akım-iletim mekanizmaları Şekil 2.7'de görüldüğü gibi olabilir. 1, 2, 3 eğrileri, TE teorisinin baskın olduğu mekanizmaları belirtir. Bunlar $n = 1$, $n > 1$ ve T_0 etkili durumlarına karşılık gelir. I-V eğrisi TAE ve V eğrisi AE iletim mekanizmalarının etkin olduğu durumları gösterir.



Şekil 2.7. Farklı akım iletim mekanizmalarını gösteren nkT/q - kT/q grafiği

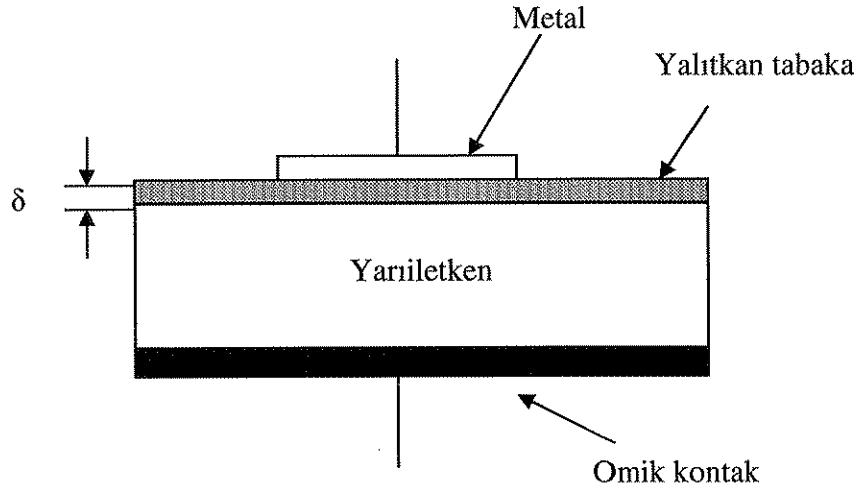
2.3. Metal-Yarıiletken Yapıların Fiziği

Metal ile yarıiletken arasında yalıtkan oksit tabakası doğal yolla oluşabileceği gibi deneysel yöntemlerle de oluşturulabilir. Doğal olarak oluşan oksit tabakası ile metal/yarıiletken yapı metal/yalıtkan/yarıiletken yapıya dönüşür [12]. MIS kontakların deneysel analizi yarıiletken yüzeyini anlamak için yararlıdır. Aradaki oksit tabakasının varlığı metali yarıiletken sistemden ayırır. Böylece yarıiletkendeki arayüzey durumlarının dolumu yarıiletkenin Fermi seviyesi ile belirlenir yani arayüzey durumları yarıiletken ile dengededir. Bir MIS yapıda metal-yalıtkan ve metal-yarıiletken arayüzeyi olmak üzere iki önemli arayüzey vardır.

2.3.1. İdeal MIS diyod

Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapı Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Burada δ yalıtkan tabakanın kalınlığı, V ise metal üzerine uygulanan voltajdır. Metal kısım omik kontakta göre pozitif olduğunda doğru beslem, metal kısım omik kontakta göre negatif olduğunda ise ters beslem oluşur.

İdeal MIS yapıların, $V=0$ durumunda enerji band diyagramı Şekil 2.9’da gösterilmiştir. İdeal bir MIS diyod aşağıdaki gibi tanımlanır.



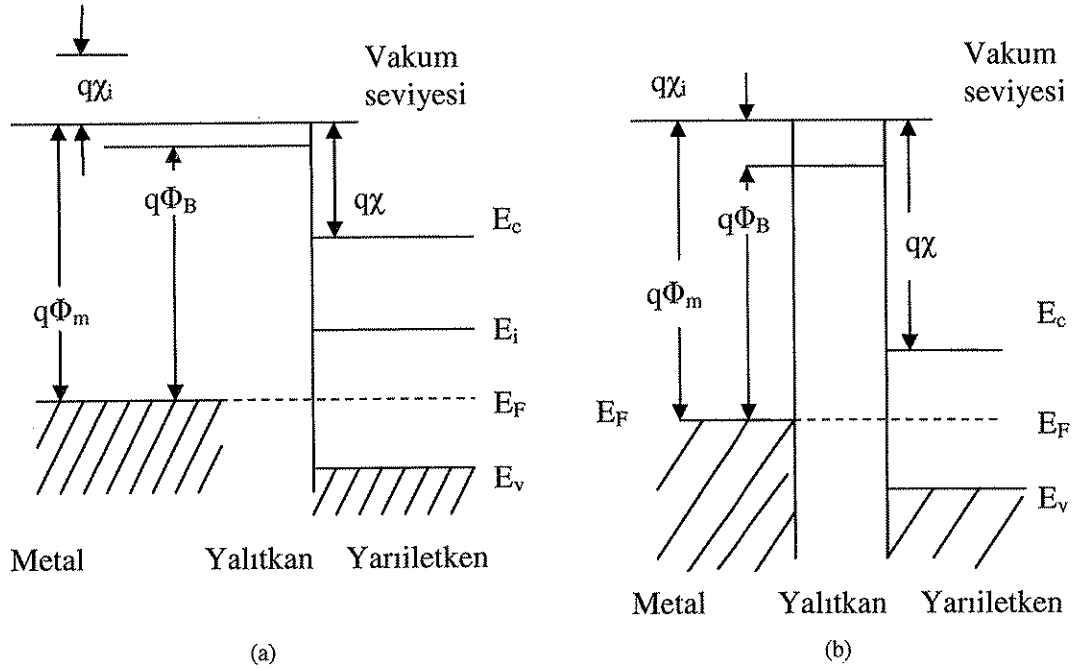
Şekil 2.8. Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) diyod

- Sıfır beslem voltajında, metal iş fonksiyonu Φ_m ile yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s veya iş fonksiyonu farkı Φ_{ms} sıfırdır.

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - (\chi_s + E_g/2q - \Phi_b) = 0 \quad \text{n-tipi için} \quad (2.24)$$

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - (\chi_s + E_g/2q + \Phi_b) = 0 \quad \text{p-tipi için} \quad (2.25)$$

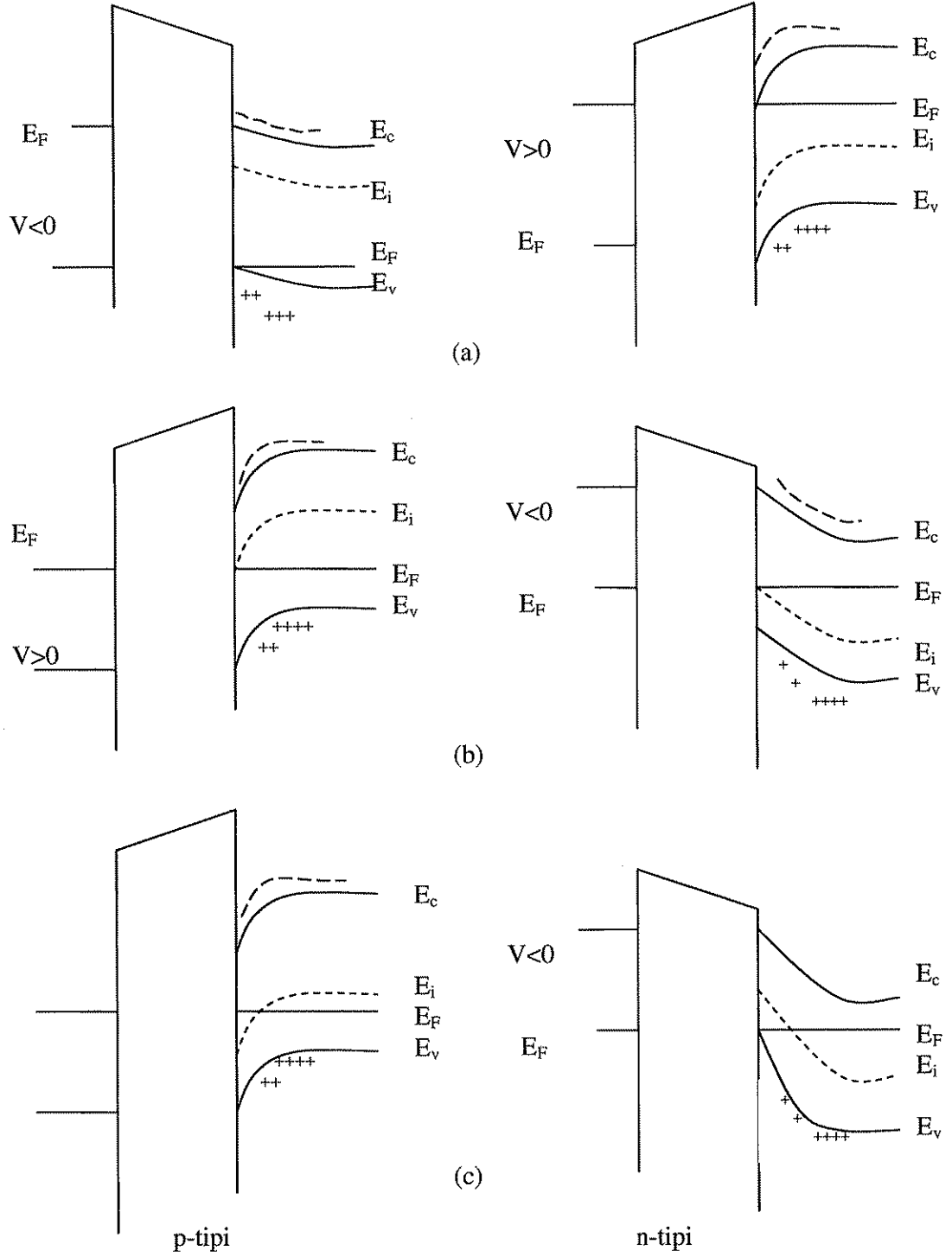
Burada χ_s yarıiletkenin elektron yakınlığı, E_g yasak enerji aralığı, Φ_b ise Fermi enerji seviyesi E_F ile saf Fermi seviyesi E_i arasındaki enerji farkıdır.



Şekil 2.9. $V=0$ durumunda ideal bir MIS diyodun enerji-band diyagramı a) p-tipi yarıiletken b) n-tipi yarıiletken

- Herhangi bir beslem altında yarıiletkende ve yalıtkana yakın metal yüzeyinde yükler mevcut olabilir fakat eşit ve zıt işaretlidir.
- D.C beslem voltaj altında yalıtkan içinden hiçbir akım geçmez veya yalıtkanın direnci sonsuzdur.

İdeal bir MIS diyoda ters beslem uygulandığında, yarıiletken yüzeyinde temel olarak üç durum mevcut olabilir. p-tipi yarıiletkenli MIS yapılarda metale negatif voltaj ($V < 0$) uygulandığında (Şekil 2.10) valans bandın tepesi yukarı doğru bükülür ve Fermi seviyesine yükselir. Yarıiletkendeki Fermi seviyesi sabit kalır. Taşıyıcı yoğunluğu üstel olarak enerji farkı ($E_F - E_v$)'ye bağlı kaldığından, bu band bükülmesi yarıiletken yakınında çoğunluk taşıyıcı olan deşiklerin yığılmasına sebep olur. Bu yığılma (accumulation) durumudur. p-tipi yarıiletkenli MIS yapılarda küçük bir pozitif voltaj ($V > 0$) uygulandığında bandlar aşağı doğru bükülür ve çoğunluk taşıyıcılar tüketilir (Şekil 2.10.b). Bu tüketim (depletion) bölgesidir. p-tipi yarıiletkenli MIS yapılara büyük bir pozitif voltaj uygulandığında ise, bandlar oldukça aşağı doğru bükülür öyle ki saf seviye E_i , yüzeyde Fermi seviyesi E_F 'nin üstüne çıkar.



Şekil 2.10. $V \neq 0$ durumunda ideal MIS diyodun enerji-band diyagramı.
 (a) akümülayon (b) tüketim (c) inversiyon (terslenim) durumları

Bu durumda yüzeydeki elektronların sayısı (azınlık taşıyıcılar) deşiklerden fazladır. Bu terslenim (inversiyon) bölgesidir. Benzer sonuçlar n-tipi yarıiletken içinde elde edilebilir.

2.3.2. MIS yapılarında akım-iletim mekanizması

İdeal MIS diyodta yalıtkan filmin iletkenliği sıfırdır. Fakat gerçekte MIS diyodlarında, yerleşmiş elektronik durumlar yarıiletken-yalıtkan yüzeyinde bulunur ve bu yüzden, diyod ideal durumdan farklılıklar gösterir. Bazı diyodlarda yalıtkan tabaka üzerinden akım geçer. Yeterli büyüklükte elektrik alan ve sıcaklık varsa yalıtkan tabaka iletkenlik gösterir. Metal-yarıiletken yapılarda akım-voltaj ilişkisi,

$$J_F = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV_F}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.26)$$

bağıntısı ile verilir. Burada,

$$J_0 = A^{**} T^2 \exp\left[\frac{-q\phi_B}{kT}\right] \quad (2.27)$$

ifadesiyle verilen J_0 doyma akım yoğunluğudur. A^{**} , Schottky engel alçalması dikkate alındığında Richardson sabiti, V_F doğru beslem gerilimidir. Eş. 2.27'deki Φ_B ise Φ_{Bn} veya Φ_{Bp} engel yüksekliğidir. Metal/yarıiletken yapılarda akım voltaj ilişkisini gösteren Eş. 2.26 ifadesinde $\ln J$ - V grafiğinin eğimi q/kT dir. Ancak metal ile yarıiletken arasında bir yalıtkan tabaka varsa doğru beslem altında bu yapılarda akım iletimi bu bağıntıda biraz farklı olur. Bu durumda $\ln J$ - V grafiğinin eğimi q/kT değerinden küçük olur hatta $q/2kT$ ya da daha küçük olabilir. MIS Schottky engelli yapılarda yalıtkan tabakanın etkisi Card, Rohederick [12] ve Fonash [13] tarafından araştırılmıştır. MIS yapılarda uygulanan doğru beslem geriliminin bir kısmı yarıiletken tüketim tabakasına düşerken bir kısmı da yalıtkan tabaka üzerine düşer. Bu da

$$V_F = V_{yi} + V_y \quad (2.28)$$

biçiminde ifade edilir. Burada V_{yi} , uygulanan V_F geriliminin yarıiletken üzerine düşen kısmı, V_y ise yalıtkan üzerine düşen kısımdır. V_F doğru beslem gerilimi altında metal/yalıtkan/n-CdTe yapılar için akım yoğunluğu azınlık taşıyıcı etkiler ihmal edilerek,

$$J_{Fn} = J_{sm}^{-e} - J_{ms}^{-e} \quad (2.29)$$

olarak ifade edilir. Burada J_{Fn} , doğru beslem altında metalden yarıiletkene geçen akımın yoğunluğudur. J_{sm}^{-e} , yarıiletkeniden metale geçen elektronların oluşturduğu akım yoğunluğudur. Şekil 2.11'de doğru beslem (V_F) altında metal/yalıtkan/n-CdTe yapısının enerji band diyagramı gösterilmiştir.

Doğru beslem V_F gerilimi altında metal/yalıtkan/p-yarıiletken için akım yoğunluğu ise,

$$J_{Fp} = J_{sm}^h - J_{ms}^h \quad (2.30)$$

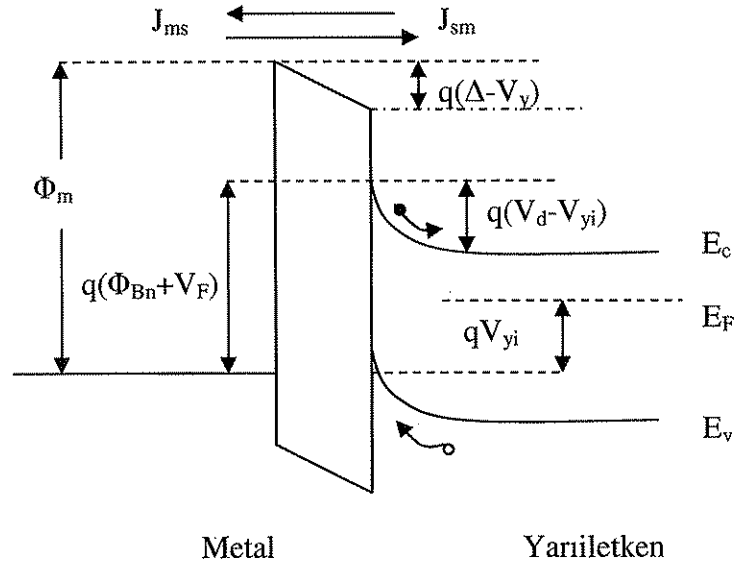
şeklinde verilir. Burada J_{ms}^h , metalden yarıiletkene, J_{sm}^h de yarıiletkeniden metale geçen deşikleri oluşturduğu akım yoğunluklarıdır. Şekil 2.12'de doğru beslem altında metal/yalıtkan/p-yarıiletken yapısının enerji band diyagramı gösterilmiştir. Doğru beslem V_F gerilimi altında metal/yalıtkan/p-yarıiletken için akım yoğunluğu ifadesi,

$$J_{Fp} = J_{sm}^h - J_{ms}^h = A * T^2 \left\{ \exp[\beta(-\phi_{Bp} + v_{yi})] - \exp[\beta(\phi_{Bp} - V_y)] \right\} \quad (2.31)$$

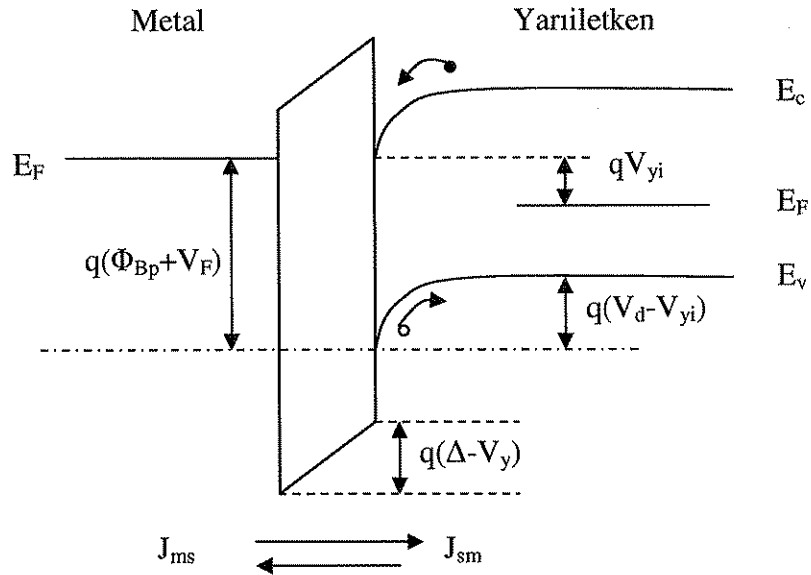
dir. Burada $\beta = q/kT$ dir. Bu ifade $\exp(-\beta(\Phi_{Bp} + V_y))$ parantezine alınırsa,

$$J_{Fp} = A * T^2 \exp(-\beta(-\Phi_{Bp} + V_y)) (\exp\beta(V_F - 1)) \quad (2.32)$$

bağıntısına dönüşür. Eğer metal ile yarıiletken arasında yalıtkan bir tabaka yoksa ($V_y=0$) Eş. 2.32 ile Eş. 2.26 aynı olur. Eş. 2.32'de görüldüğü gibi yalıtkan tabaka varlığı, J_F 'nin V_F 'ye bağıllığını azaltır. Yani yalıtkan tabakanın kalınlığı arttıkça $\ln J_F$ 'nin V_F 'ye göre grafiğinin eğimi β 'dan (q/kT) küçük olur.



Şekil 2.11. Metal/yalıtkan/n-CdTe yapısının enerji band diyagramı



Şekil 2.12. Metal/yalıtkan/p-CdTe yapısının enerji band diyagramı

Doğru beslem altında metal/yalıtkan/n-CdTe için akım yoğunluğu ifadesi

$V_F > 3kT/q$ için

$$J_{Fn} = J_{Fp} = J_0 \exp\left(\frac{qV_F}{nkT}\right) \quad (2.35)$$

ifadesi ile verilir. Burada J_0 doyum akım yoğunluğu olup,

$$J_0 = A * T^2 \exp\left[\frac{-q\phi_B}{kT}\right] \quad (2.36)$$

ile verilir ve Φ_B , n ve p-tipi MIS diyod için Schottky engel yüksekliği olup sırasıyla Φ_{Bn} ve Φ_{Bp} ’ ye karşılık gelir. $V_F > 3kT/q$ için Eş. 2.35 ve Eş. 2.36 ifadelerinin birbirine eşit olması için $V_F/n = V_F - V_y$ olması gerektiğinden, diyodun idealite faktörü $n = V_F / (V_F - V_y)$ olur. Bu ifadeden görüldüğü gibi yalıtkan tabaka kalınlığı ve V_F ’deki artış n ’i artırır. Bununla birlikte yalıtkan tabaka kalınlığı ince olan numuneler için n ’in V_F ile değişimi azalır. Arayüzeydeki tabakanın yeterince kalın olması durumunda (elektron geçiş katsayısı 1 değilse) ters doyum akımı, arayüzey olmadığı durumda ters doyum akımı ile arayüzey yalıtkanın geçiş katsayısının çarpımına eşittir. Yani; J_0 (yalıtkan) - $T(\delta)J_0$ ’dır. Burada J_0 (yalıtkan), kalınlığı δ olan bir arayüzey yalıtkan tabakasının varlığında ve $T(\delta)$ geçiş katsayısına sahip olması durumundaki ters doyma akımıdır. Doğru beslemde I-V karakteristikleri beslemin çoğu üzerinde çizgisel ise Eş. 2.36’da J_0 yerine J_0 (yalıtkan) yazılarak buradan etkin engel yüksekliği Φ_c hesaplanabilir. Yani,

$$T(\delta)J_0 = A * T^2 \exp\left[\frac{-q\phi_c}{kT}\right] \quad (2.37)$$

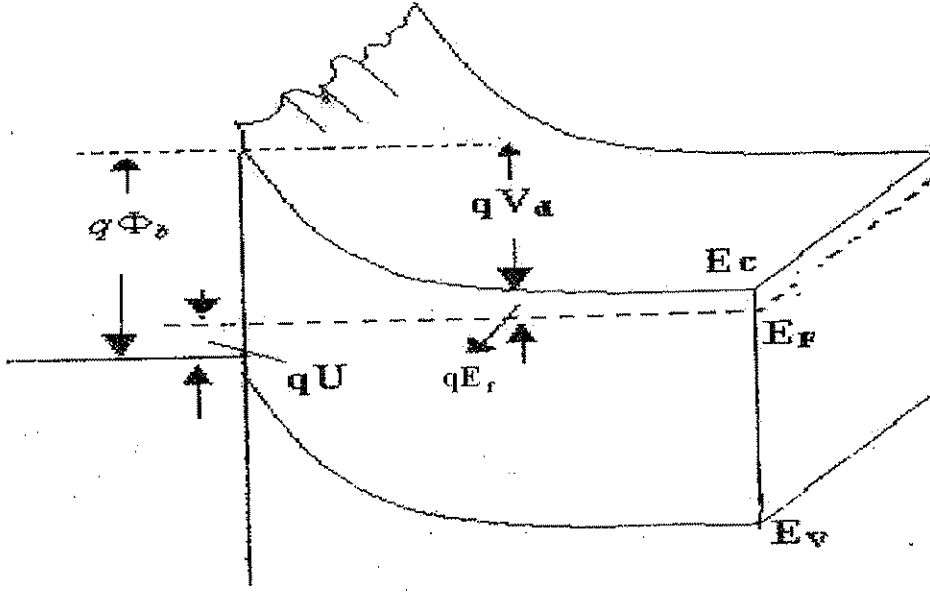
eşitliğinden Φ_c çekilirse,

$$\Phi_c = kT/q \left[\ln\left(A * \frac{T^2}{J_0}\right) \right] - kT/q [\ln T(\delta)] = \phi_B - \frac{kT}{q} [\ln T(\delta)] \quad (2.38)$$

bulunur. Böylece $T(\delta)$, 1'den küçük ise etkin engel yüksekliği (Φ_c) yalıtkan tabakanın olmadığı durumdaki Φ_B engel yüksekliğinden daha büyüktür.

2.4. Potansiyel Değişim Modeli

Schottky kontaklarda engel yüksekliği akım-voltaj, kapasite-voltaj ölçümleri için farklı sonuçlar verir. Schottky kontakların bölgesel homojensizlikler durumunda $n>1$ ve Φ_{bo}^j için sıcaklığa bağlılığı: bir metal ve yarıiletken arasındaki ara yüzey atomik olarak düz olmayıp biraz pürüzlü olduğundan dolayı kurulma voltajı (V_d) ve Schottky engelin Φ_b değişmesiyle engel yüksekliği şekil 2.10'de gösterildiği gibi homojensiz olur [14]. Metaldeki potansiyel değişmelerinin nedeni; atomik bozukluklar pürüzler ve temel sınırlamalardan başka metalin kalınlığından dolayı ara yüzeydeki pürüzlerin yanı sıra eğrinin yarıçapının daralmasıyla alan emisyonundan dolayı metaldeki difüzyondan etkili olan engel düşmesinden de kaynaklanabilir. Bu aynı zamanda ara yüzeydeki yarıiletken verici (donor) atomları arasındaki düzensiz uzaklıklardaki imaj kuvvetlerinden dolayı da olabilir. Çünkü ara yüzeydeki potansiyel dağılım verici atomları düzenli bir örgüden olmayıp düzensiz olarak dağılmışlardır. Katkı atomlarının bu etkisi Arnold-Hess ve Nixon-Davies tarafından incelenmiştir [21]. Potansiyel değişim modeli homojen olmayan Schottky kontaklar için daha önce yapılan çalışmalardan farklıdır. Bu konuda farklı engel yüksekliklerine sahip olan homojen ve homojen olmayan Schottky diyotları üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalardan Ohdamari ve Tu'nun modeli akım-voltaj ölçümlerinden daha yüksek olan sığa-voltaj ölçümlerindeki engel yüksekliğinin azaldığını açıklar. Bütün bu modellerin düşük ve yüksek engel bölgelerindeki durumu farklıdır; yani Schottky engellerin düzensiz olarak değiştiği kabul edilerek birbirinden ayrılmış yüksek ve düşük engellerin yüzey yük bölgelerinin genişlikleri farklıdır. Ayrıca Othomari ve Tu bir engel dağılımının yerine iki farklı engel değeri düşündüler.



Şekil 2.13. Homojen olmayan bir Schottky kontağın iki boyutlu diyagramı. V_d band bükülmesi Φ_b engel yüksekliği, ϕ_b^i akım-voltaj için ve ϕ_b^c ise sığa-voltaj için engel yüksekliği.

Ancak Freeouf ve arkadaşları tarafından farklı diyotlarda yapılan çalışmalar başarılı oldu. Freeouf ve arkadaşları sonsuz bir element meteryal analiz programını (FIELDAY) kullandılar ve yüzey yük bölgelerinde iki kontağın akım-voltaj ve sığa-voltaj eğrilerinde alan etkilerinin durumlarını incelediler. Toplam kontak alanının 1/8 ne sahip olan düşük bir engel kontak, toplam alandaki 1/24'ü boşluk olan ve toplam kontak alanının 5/6 sına sahip olan yüksek bir engel kontağın içine yerleştirerek ve toplam alanın genişliği 1/4 ve 8 μm arasında değişti. Sığa-voltaj ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliğinin akım-voltaj ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliğinden daha yüksek olduğunu simülasyonla sağladılar. Bu çalışmanın en ilginç sonuçları akım-voltaj ve sığa-voltaj eğrilerinin iki farklı engel alanında olmasıdır. Eğer düşük engel genişliği daha da küçülürse yüksek engelden olan kontaklar düşük engel metal seviyesinin altına ulaştığından dolayı toplam etkin engel alanı daha büyük olur. Bu yüzden düşük engel kontak etkili bir şekilde küçülür.

Homojen olmayan Schottky kontaklarının bütün bu önceki modellerin esas dezavantajı Schottky engel için iki farklı ve ayrı değer kontakların olmasıdır. Bu ifadeler ya farklı uzaysal dağılım ve homojen bariyerler üzerine temel edinmiştir yada sayısal modelleme gerektirir. Potansiyel değişim modeli için bu sınırlamaların olması; uzaysal engel dağılımlarına sahip olan Schottky kontakların iletim özelliklerinin sıcaklığa bağlılığının analitik bir tanımlanmasıdır.

2.4.1. Gaussian engel dağılımı

Potansiyel değişim modeli metal ile yarıiletken arasında ki arayüzeyde sürekli bir engel dağılımının olduğunu kabul eder. Bu model ile yüksek katkılı yüksek katkılı ara yüzey bölgesinin genişliğine göre oluşan band bükülmesi (V_d) ve Schottky engellerinin (Φ_b) değişimleri incelenir. Bu önerilen model belli sınırlamalara karşılık elektronik iletimi sağlamak için geliştirilen teoriye benzerdir. Burada önerilen model Schottky diyotlarında taşıma özelliklerini analiz etmek için tanımlanmıştır; model yalnız sığa ve akımlardan oluşan engel farkını değil aynı zamanda sıcaklığa bağımlılığının yanında idealite faktörlerinin neden $n>1$ olduğunda açıklar. Bu tanımlama analitiktir; bilgisayar similasyonu gerektirmez. Ortalama bir $\overline{V_d}$ durumunda standart sapmaya (σ_s) sahip bir Gaussian dağılımı $P(V_d)$ ile schottky kontakların metal-yarıiletken ara yüzeyde band bükülmesinin (V_d) uzaysal dağılımı,

$$P(V_d) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\overline{V_d} - V_d)^2}{2\sigma_s^2}} \quad (2.39)$$

ile verilir. Sonuç olarak band bükülmesi (V_d) ve Schottky engeli $\Phi_b = V_d + \xi + U$ şeklinde verilir.

Ortalama bir $\overline{\phi_b}$ durumunda bir engel dağılımına sahip ara yüzey içindeki bölgeye bağlıdır.

$$P(V_d) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\overline{\phi_b} - \phi_b)^2}{2\sigma_s^2}} \quad (2.40)$$

engel dağılımı normalize edilirse,

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(v_d) dv_d = \int_{-\infty}^{\infty} p(\phi_d) d\phi_d = 1 \quad (2.41)$$

olur.

2.4.2. Akım ve sığa için etkin potansiyel engel yüksekliği

Potansiyellerin uzaysal dağılımları, etkili sığa engellerin uzaysal dağılımlar ve dc akım ölçümlerinin uzaysal dağılımlarındaki farklılıklar, yüzey yük bölgesinin genişliğinin birim zamanda frekansa bağlı olarak sığa ve akım arasındaki bağıntı,

$$C = \frac{1}{i\omega} \frac{dE}{dt} \quad \text{dır. Bu genişlikler metal-yarıiletken arayüzeyde olan elektrik alana}$$

bağlıdır. Metal-yarıiletken ara yüzeyde kısa dalga boylu potansiyel değişmeler yüzey yük bölgesinin dışında görünür. Sonuçta, sığanın yalnız $\bar{v}_d$ ve $\bar{\phi}$ değerlerine bağlı olması beklenilir; sığa yüzey yük genişliğinden daha düşük olan uzun bir scala üzerinde potansiyel değişmelere bağlı değildir. Fakat arayüzeye karşılık gelen dc akımı arayüzeyde engel dağılımına exponansiyel olarak etkili bir şekilde bağlıdır. Engellerdeki herhangi bir uzaysal değişme minimum engelden akım akışına sebep olur. Böylece, akım-voltaj ölçümleri ile tanımlanan Schottky engel değerleri, sığa-voltaj ölçümleri ile tanımlanan Schottky engel değerlerinden daha düşük olması beklenilir.

Homojen olmayan Schottky kontak yoluyla kontrol edilen net akım yoğunluğu $J = J_{sm} - J_{ms}$ etkili bant bükülmesi (V_d^j) ve engel (ϕ_b^j) için homojen kontakta nitelikli bir açıklama termoiyonik emisyon teorisi yardımıyla elde edilebilir. Metalden yarıiletken band bükülmesi V_d ve J_{ms} ye karşılık gelen yarıiletken metale (J_{sm}) akım yoğunluğu;

$$J_{sm} = A^* T^2 e^{-q\phi_b/kT - qV_d/kT} \quad (2.42)$$

$$J_{ms} = A^* T^2 e^{-\Phi_b/kT} \quad (2.43)$$

yazılabilir. Potansiyellerin dağılımı $P(V_d)$ için, bütün potansiyeller üzerinde J_{sm} yi entegre edersek;

$$J_{sm} = A * T^2 e^{-q\bar{\xi}/kT} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-qV_d/kT} P(V_d) dV_d \quad (2.44)$$

bulunur. Yarıiletken den metale J_{sm} akımı için bant bükülmesi V_d^j ise,

$$V_d^j = \overline{V_d} - \frac{\sigma_s^2}{2kT/q} \quad (2.45)$$

yazılabilir. Metalden yarıiletkene akım yoğunluğu J_{sm} bilindiği gibi,

$$J_{sm} = A * T^2 e^{-q\bar{\xi}/kT - qV_d^j/kT} \quad (2.46)$$

olur ve benzer biçimde J_{ms} için Eş. 2.43' ün integrasyonu alınır,

$$\Phi_b^j = \overline{\Phi_b} - \frac{\sigma_s^2}{2kT/q} \quad (2.47)$$

olur. Bu ifadelerden genel termiyonik emisyon teorisi ile potansiyel değişimlerin neticesinde akım yoğunluğu

$$J = A * T^2 e^{-q\Phi_b^j(U,T)/kT} (e^{qU/kT} - 1) \quad (2.48)$$

Burada Φ_b^j engel yüksekliğidir ve aynı zamanda Φ_b^j nin daima $\overline{\Phi_b}$ engelinden daha büyük olduğunu gösterir. Φ_b^c bariyeri, sığa (C) için etkin bariyerdir. Sığanın yalnızca band bükülmesi $\overline{V_d}$ ye ve engel dağılımının $P(\Phi_b)$ standart sapmasına σ_s bağlı olduğunu matematiksel olarak sağlar,

$$V_d^c = \overline{V_d} \text{ ve } \Phi_b^c = \overline{\Phi_b} \quad (2.49)$$

Burada sığa engelini Φ_b^c nin $\overline{\Phi_b}$ ye eşit olduğu anlamına gelir.

2.4.3. Sıcaklığa bağlı potansiyel engel yüksekliği

Eş. 2.47 ve Eş. 2.49 uzaysal homojen olmayan modelinin temel denklemleridir; bu denklemler arasındaki ilişki sıcaklık (T) ve doğru beslem voltajına bağlı olarak, akım-voltaj ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği (Φ_b^j), sığa-voltaj ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği (Φ_b^c), ortalama Schottky engel yüksekliği ($\overline{\Phi}$) ve standart sapma (σ_s) değerleri arasındaki bağıntıyı ifade eder. Bu denklemler, aynı zamanda akım-voltaj ve sığa-voltaj karakteristiklerinden hesaplanan engel yüksekliklerin farklı olduğunu gösterir. Ayrıca, gerilim altında engel dağılımının değiştiği dikkate alındığı durumda idealite faktörünü açıklamaya izin verir. Potansiyel engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı değişimi Eş. 2.47 teki gibi ifade edilebilir. Her sıcaklık için akım-voltaj eğrilerinin sıfır besleme fit edilmesiyle bulunan I_0 doyum akımlarından hesaplanan potansiyel engel yüksekliklerinin

($\Phi_b(I-V) = \Phi_b^j$), $1/T$ 'e karşı grafiği lineer bir doğruyu verir. Bu doğrunun eğimi bize $q\sigma_s^2/2k$ yi verir ve bu değerden standart sapma σ_s elde edilir. Bu lineer doğrunun potansiyel engel yüksekliğini kestiği nokta ise bize ortalama engel yüksekliğini ($\overline{\Phi}_b$) verir. Bu standart sapma ile ortalama engel yüksekliği Eş. 2.49'da yerine yazılırsa, uzaysal homojen olmayan potansiyel engelleri için Gaussian dağılımı elde edilebilir. Standart sapmanın (σ_s) sıcaklığa bağlı ifadesi;

$$\sigma_s^2(T) = \sigma_s^2(T = 0) + \alpha_\sigma T \quad (2.50)$$

şeklinde verilir. Sığa-voltaj ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği (Φ_b^c), ile doğru beslem altında elde edilen akım-voltaj ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği (Φ_b^j) arasındaki farkın (Φ_b^c)-(Φ_b^j) nın $1/T$ 'e karşı grafiği lineer bir doğru verir. Bu doğrunun eğimi $q\sigma_0^2/2k$ yi verir y eksenini kestiği nokta ise $q\sigma_0^2/2k$ yi verir. Aynı zamanda ortalama engel yüksekliğinin ($\overline{\Phi}_b$) sıcaklığa bağlı değişimi,

$$\overline{\phi}_b = \overline{\phi}_b(T=0) + \alpha \overline{\phi} T \quad (2.51)$$

verilir bu da yaklaşık olarak lineer bir doğrudur.

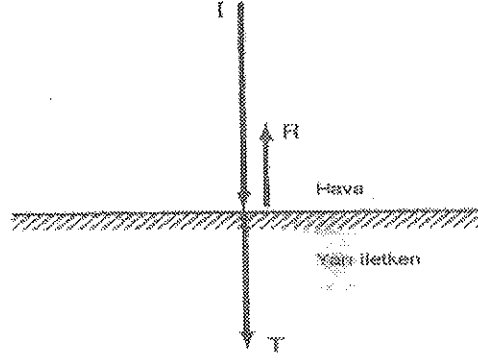
2.4.4 İdealite faktörünün voltaj ve sıcaklığa bağlılığı

Termiyonik emisyon teorisine göre, yarılogaritmik akım-voltaj eğrilerinin eğiminden hesaplanan idealite faktörleri genelde $n > 1$ dir. Dolayısıyla termiyonik emisyon teorisine göre hesaplanan potansiyel engel yüksekliği, artan sıcaklıkla artar. Bu durum termiyonik emisyon teorisinden sapmanın da bir göstergesidir. İdealite faktörlerinin $n > 1$ olmasının birkaç nedeni vardır. Birincisi, metal ve yarıiletken arasındaki ince oksit tabakanın varlığıdır. İkincisi, yüksek katkılı yarıiletkenlerde veya yeterince düşük sıcaklıklarda tünelleme akımıdır (termiyonik alan emisyonu ve alan emisyonu). Üçüncüsü, arayüzeyde elektrik alandan dolayı hayali Schottky engel alçalmasıdır ($\Delta\Phi_b$). Dördüncüsü, uzay yük bölgesinde oluşma-yeniden birleşme (generation/recombination) akımlarıdır. Bu dört model Schottky kontaklarının aşırı durumlarını (ara yüzey tabaka, yüksek katkılanma, yüksek elektrik alan, uzay yük bölgesindeki tuzaklar) ve metal ile yarıiletken arasındaki arayüzeyin atomik olarak tam olarak düz olmadığı ve genelde uzaysal bir homojensizliğe sahip olduğunu gösterir.

2.5. Işığın Yarıiletkenle Etkileşmesi

Metal/CdTe arayüzeyler termal görüntüleme sistemlerindeki sensör ve dedektörler (Chann and Kubar), güneş pilleri (Dharmadasa 1982) gibi optoelektronik aygıtlarda önemli bir rol oynarlar [22-24] . Bu arayüzeylerinin özelliklerinin iyi bir şekilde anlaşılması veya ortaya koyulması bu yarıiletken materyallere dayalı cihazların pratikte yaygın halde kullanılır hale gelmesi için önemlidir.

Şekil 2.14'deki gibi güneş ışınları yatay duran bir yarıiletken üzerine normal olarak gelsin. Gelen ışınımın (R) kadarı geriye yansır, geri kalanı (T) ise yarıiletken içine girer. Yarıiletken içine giren ışınım eğer ışınımın enerjisi $h\nu \geq E_g$ ise, elektron-deşik çiftleri oluşturarak yarıiletken tarafından soğurulur. Eğer $h\nu < E_g$ ise ışınım enerjisi yarıiletken atomlarına aktararak yarı iletkenin ısınmasına neden olarak yok olurlar.



Şekil 2.14. Bir yarıiletken üzerine gelen tek renkli bir ışınım.

Bir soğurucu malzemenin kırılma indisi $n_c = n - ik$ olarak verilir. k 'ya sönüm katsayısı denilmektedir. Bir soğurucu yüzeyine dik olarak gelen ışınımın yansımaları

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (2.52)$$

ile verilir.

Yarıiletken içine giren ışınımın şiddeti soğurulmalar nedeniyle azalır. Belli bir dalga boyunda ışığın soğurulması ışığın şiddeti (foton akısı=birim yüzeye birim zamanda gelen foton sayısı) ile orantılıdır ve yarı iletkende foton akısı (ϕ)

$$\phi(x) = \phi(x_0)e^{-\alpha(x-x_0)} \quad (2.53)$$

ile verilir. Dalga boyuna bağlı olan α 'ya soğurma katsayısı denilmektedir. α , foton akısının ne kadar malzeme içine gireceği ile ilgili bir parametre olduğundan, ışığı soğuran malzemeler için önemlidir.

α ile k birbirleriyle ilişkilidir. Işınımın ilgili elektrik alanı bir düzlem dalga olarak

$$E = E_0 e^{i2\pi v(t - \frac{x}{v})} \quad (2.54)$$

ile gösterilsin.

Dalganın yayılma hızı v ile ışık hızı c ve kırılma indisi n_c arasında

$$v = \frac{c}{\hat{n}} \quad \text{veya} \quad \frac{1}{V} = \frac{\hat{n}}{c} - \frac{i\hat{k}}{c} \quad (2.55)$$

olduğundan Eş. 2.54,

$$E = E_o e^{i2\pi vt} e^{-\left(\frac{i2\pi xnv}{c}\right)} e^{-\left(\frac{-2\pi vkx}{c}\right)} \quad (2.56)$$

olur. Eş. 2.56'deki son terim sönüm çarpanıdır. Işınımın gücü, elektrik alanın karesiyle azaldığından Eş. 2.56'nin karesi alınarak

$$E^2 = E_o^2 e^{\frac{-4\pi vk}{c}x} \quad (2.57)$$

bulunur. Eş. 2.57 ile Eş. 2.53'leri karşılaştırılarak

$$\alpha = \frac{4\pi v\hat{k}}{c} \quad (2.58)$$

elde edilir. v ışınımın frekansıdır.

2.6 Işığın Soğurulması

2.6.1. Doğrudan band aralıklı yarıiletken

Doğrudan band aralıklı bir yarıiletkenin şematik enerji-momentum ilişkisi (band yapısı) şekil 2.15'te gösterilmiştir. Elektronun valans bandından iletim bandına geçişinde ($h\nu$ enerjili foton soğurulmasıyla)

$$E_f - E_i = h\nu \quad (2.59)$$

eşitliği sağlanır (enerjinin korunumu). Elektronun bu geçişinde momentum veya dalga vektörü de korunur. Elektron ve deşğin bandlardaki enerjileri sırasıyla

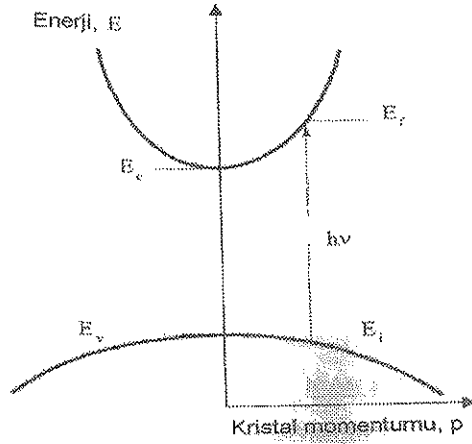
$$E_f - E_c = \frac{p^2}{2m_e^*} \quad \text{ve} \quad E_v - E_i = \frac{p^2}{2m_h^*} \quad (2.60)$$

'dir.

Dolayısıyla doğrudan soğurma

$$h\nu - E_g = \frac{p^2}{2} \left(\frac{1}{m_e} + \frac{1}{m_h} \right) \quad (2.61)$$

eşitliği ile verilen kristal momentumunun özel bir değerinde olmaktadır.



Şekil 2.15. Doğrudan band aralıklı bir yarıiletkeninde bir fotonun soğurulması

Bir fotonun soğurulması hem fotonun enerjisine hem de elektronların bandlardaki yoğunluğuna bağlıdır. Doğrudan band aralıklı bir yarıiletken için soğurma katsayısı teorik olarak

$$\propto (h\nu) \approx A^* (h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (2.62)$$

eşitliği ile verilmektedir. Eş. 2.62'de $\propto (cm^{-1})$ olarak alındığında,

$$A^* = 2 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1} (\text{eV})^{\frac{-1}{2}}$$

olan bir sabit olup $h\nu$ ve E_g (eV) olarak alınır.

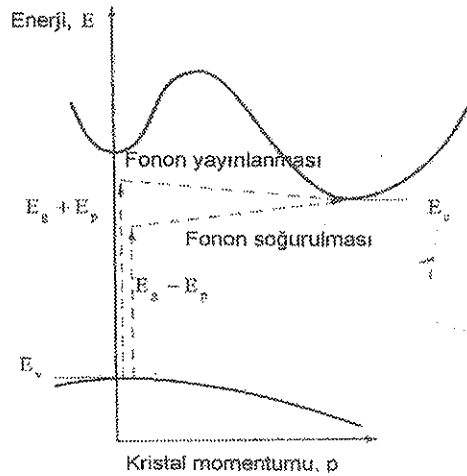
2.6.2. Dolaylı band aralıklı yarıiletkenler

Bu yarıiletkenlerde valans bandı kenarı ile iletim bandı kenarı aynı kristal momentumunda bir elektronu valans bandından iletim bandına geçirmek için fonon (titreşim kuantumu) denilen bir parçacığa gerek olur (lineer momentumun korunumu için). Dolaylı soğurma için enerjinin ve dalga vektörünün korunum şartları,

$$h\nu = E_g - E_p \quad (\text{fonon soğurulmasında}) \quad (2.63)$$

$$h\nu = E_g + E_p \quad (\text{fonon salımında}) \quad (2.64)$$

olur. E_p , $\vec{k}_p$ fononun enerjisi ve dalga vektörü, $\vec{k}$ fotonun dalga vektörü, $\vec{k}_c$ ise iletim bandı kenarına karşılık gelen dalga vektörüdür. Dolaylı soğurmada fazlalık bir parçacık gerektiğinden bu soğurma olasılığı doğrudan soğurmaya göre düşük olasılıklıdır.

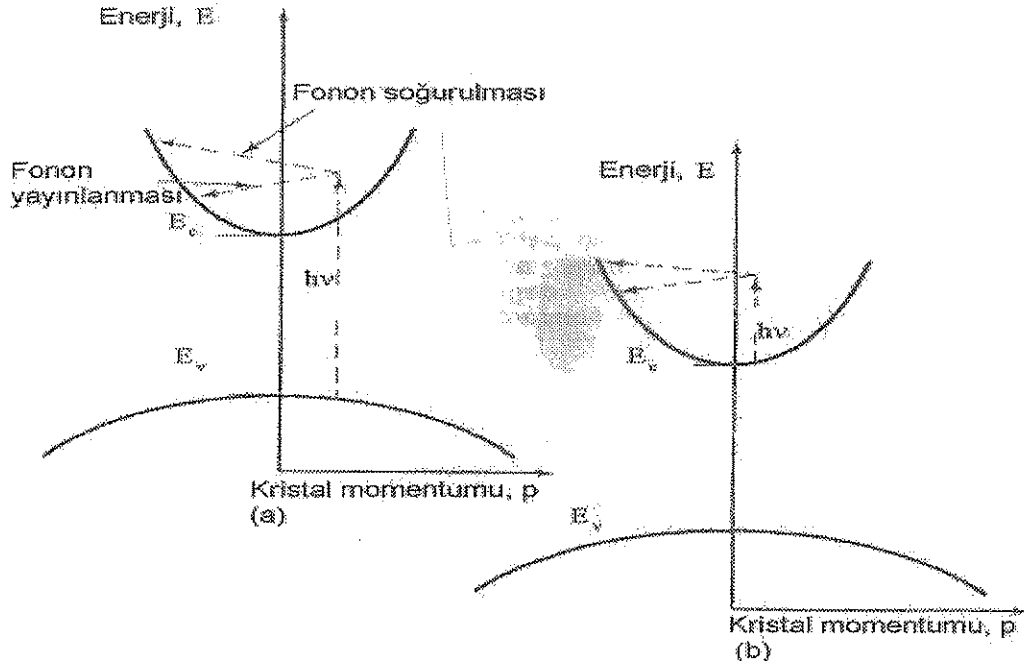


Şekil 2.16. Dolaylı band aralıklı bir yarıiletken de fonon yayınlama veya soğurma yoluyla fotonların soğurulması

2.6.3. Diğer soğurmalar

Doğrudan band aralıklı yarıiletkenlerde, Şekil 2.17.a'da belirtildiği gibi fonon soğurulması veya yayınlamasıyla iki adımlı fonon soğurulması olabilir. Yüksek foton enerjilerinde dolaylı band aralıklı yarıiletkenlerde doğrudan soğurulma (bir adımlı soğurulma) oluşabilir. Uzun dalga boylarında etkili olan foton soğurulması bir

elektronun fonon soğurma ve yayınlanmayla, elektron-deşik oluşturmaksızın, daha yüksek enerji düzeyine yükselmesiyle olabilir (Şekil 2.17.b). Bunlardan başka fotonların soğurulmasına, yasak enerji aralığına safsızlıklarca sokulan enerji düzeyleriyle yarıiletkenin izinli bandları arasındaki geçişler neden olabilir. Franz-Keldsyh olayı (elektrik alanı etkisinde soğurma kenarının küçük enerjiye doğru kayması) ve aşırı katkılama, yasak enerji aralığının küçülmesine neden olduğundan, foton soğurulmasını etkiler.



Şekil 2.17. Doğrudan band aralıklı bir yarıiletkende iki adımlı foton soğurulması.

2.7. Birleşme Olayları

Bir yarıiletken üzerine uygun dalga boyunda ışınım geldiğinde, elektronlar ve deşikler oluştuğundan, yarıiletkendeki yük taşıyıcı konsantrasyonları karanlıktaki yük taşıyıcı konsantrasyonlarından daha fazla olur. Yarıiletken üzerine gelen ışınım kaldırıldığında ışınım altında oluşan bir ek yük taşıyıcı konsantrasyonları denge değerlerine döner. Yük taşıyıcı konsantrasyonlarının denge konsantrasyonlarına dönmesi birleşme yoluyla olmaktadır.

2.7.1. Işıyıcı birleşme

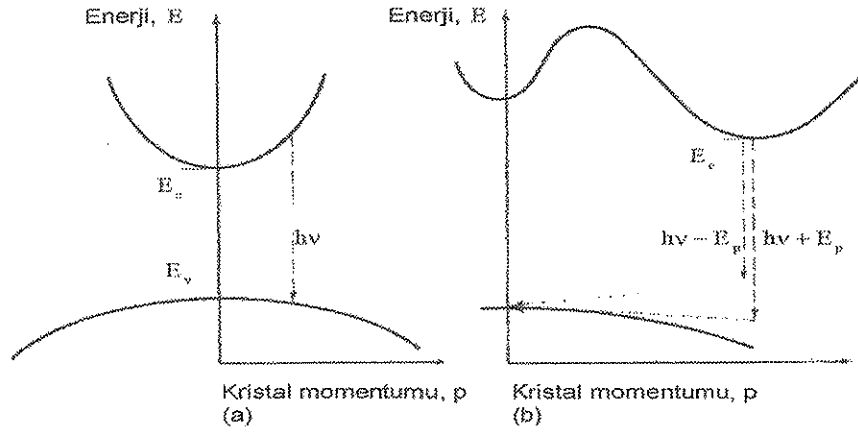
Işıyıcı birleşme soğurmanın tam tersidir. Daha yukarı enerji düzeyinde bulunan bir elektron daha aşağı enerji düzeyine ışınım yayınlarak döner. Işınım soğurulmasında etkili olan bütün olayların ışıyıcı birleşme karşılığı vardır (Şekil 2.18). Toplam ışıyıcı birleşme hızı R_R (elektron ve deşik konsantrasyonlarıyla orantılı)

$$R_R = Bnp \quad (2.65)$$

ile verilir. B ile verilen bir yarıiletken için sabittir. Soğurma ve ışıyıcı birleşme birbiriyle ilişkili olduğundan B yarıiletkenin soğurma katsayısından hesaplanabilir.

Yaratıcı dış etkenler olmadığından net ışıyıcı birleşme hızı U_R

$$U_R = B(np - n_i^2) \quad (2.66)$$



Şekil 2.18. a) Doğrudan band aralıklı, b) Dolaylı band aralıklı, yarıiletkenlerde ışıyıcı birleşmeler.

Her birleşme olayı için

$$\tau_e = \frac{\Delta n}{U} \quad (2.67)$$

$$\tau_h = \frac{\Delta p}{U} \quad (2.68)$$

ile verilen yük taşıyıcı ömrü tanımlanabilir. U net birleşme hızı, Δn ve Δp sırasıyla elektron ve deşik konsantrasyonlarının denge konsantrasyonlarından (n_o, p_o) farklıdır. $\Delta n = \Delta p$ olduğundan ışıyıcı birleşme ömrü

$$\tau = \frac{n_o p_o}{B n_i^2 (n_o + p_o)} \quad (2.69)$$

ile verilir. Doğrudan band aralıklı yarıiletkenlerdeki yük taşıyıcılarının ışıyıcı birleşme ömürleri dolaylı band aralıklı yarıiletkenlerdeki yük taşıyıcılarındakine göre oldukça küçüktür.

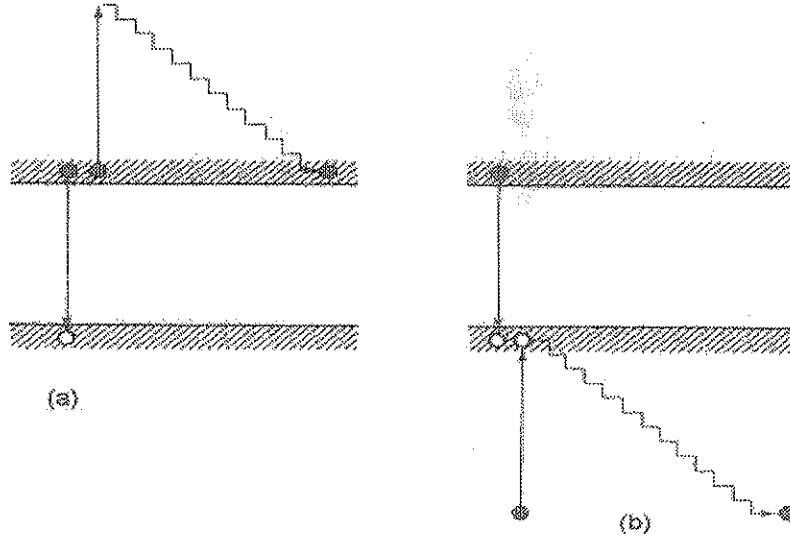
2.7.2. Auger birleşmesi

Auger birleşmesi olayında elektron bir deşikle birleştiğinde ortaya çıkan enerji valans iletim bandındaki diğer bir elektrona, ısıtım yayınlanmaksızın, aktarılır (Şekil 2.19). İkinci elektron da ilk enerji düzeyine fononlar yayınlanarak döner. Auger olayı ile ilgili ömür süresi

$$\frac{1}{\tau} = C_{np} + D_n^2 \quad (\text{n-tipi yarıiletkenler için}) \quad (2.70)$$

$$\frac{1}{\tau} = C_{np} + D_p^2 \quad (\text{p-tipi yarıiletkenler için}) \quad (2.71)$$

eşitlikleri ile verilir. Eşitliklerin ilk terimi azınlık yük taşıyıcı uyarılmalarını, ikinci terimi ise çoğunluk yük taşıyıcı uyarılmalarını anlatır (Bir n-tipi yarıiletkende elektronlar çoğunluk yük taşıyıcıları, deşikler azınlık yük taşıyıcıları olmakta, bir p-tipi yarıiletkende ise deşikler çoğunluk yük taşıyıcıları, elektronlar azınlık yük taşıyıcılarıdır). Auger birleşmesi yüksek katkılı malzemelerde, bu eşitliklerdeki ikinci terim nedeniyle etkilidir.



Şekil 2.19. Auger birleşmesinde ortaya çıkan enerji a) iletim bandında, b) valans bandında, bir elektrona verir.

2.7.3. Tuzaklar yoluyla birleşme

Yarıiletkenin yasak enerji aralığına safsızlıklar ve bozukluklar tarafından sokulan enerji düzeyleri iki adımlı birleşmede çok etkilidirler. Bu iki adımlı birleşme önce elektron iletim bandından yasak enerji aralığındaki enerji düzeyine, bu enerji düzeyinden de valans bandına düşerek bir deşigi yok eder (Şekil 2.20.a).

Tuzaklar yoluyla birleşme net birleşme hızı

$$U_T = \frac{np - n_i^2}{\tau_{ho}(n + n_1) + \tau_{eo}(p + p_1)} \quad (2.72)$$

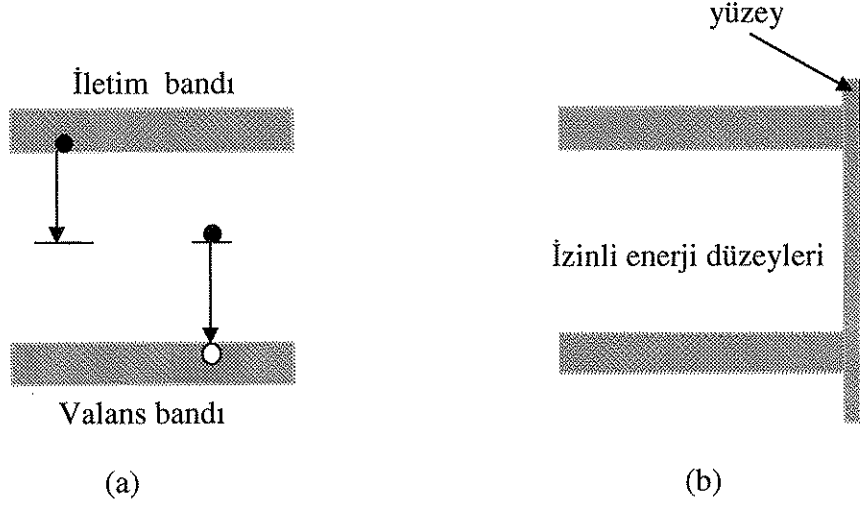
ile verilir. τ_{ho} ve τ_{eo} ömür parametreleri olup tuzanın tipine ve tuzak yoğunluğuna bağlıdır. n_1 , p_1 parametreleri

$$n_1 = N_c e^{\frac{(E_t - E_c)}{kT}} \quad (2.73)$$

$$n_1 p_1 = n_i^2 \quad (2.74)$$

bağıntıları ile verilir. E_t tuzak enerji düzeyidir. $\tau_{eo} \approx \tau_{ho}$ ise U_T , $n_1 \approx p_1$ olduğunda maksimum olur. Bu durum safsızlık veya bozukluk düzeyleri yasak enerji aralığı

ortası yakınında olduğunda meydana gelir. Bu yüzden yasak enerji aralığı ortasına yakın yerlere enerji düzeyleri sokan safsızlıklar etkili tuzak yoluyla birleşme merkezi olurlar.



Şekil 2.20. Bir yarıiletkenin yasak enerji aralığında bulunan, a) bir tuzak düzeyiyle iki adımlı birleşme, b) izinli yüzey durumları.

3. DENEYSEL YÖNTEM

3.1. MIS Yapıların Oluşturulması

3.1.1. Kristal temizleme

İyi bir metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) diyod yapımı için kaliteli ve yüzeyi çok iyi temizlenmiş kristaller kullanılmalıdır. Kullanılan kristaller yurt dışından CrysTec firmasından, fabrikasyon olarak bir yüzeyi parlatılmış halde satın alındı. Diyot yapımında (111) doğrultusunda büyütülmüş 10x10x0,5 mm boyutlu n-tipi CdTe kristali kullanıldı. Kristal yüzeyleri üzerindeki organik ve diğer ağır metal kirlerini temizlemek ve yüzeydeki pürüzleri ortadan kaldırmak için yarıiletken kristal kimyasal olarak ultrasonik banyoda farklı aşamalardan geçirilerek temizlendi.

Temizlemede kullanılan deiyonize su (18,3 MΩ) İnnovation firmasından temin edilen Pure Water System marka aletten elde edildi.

Numune ve deneysel araçların temizliği iyi diyot oluşturmada çok önemli unsurlar olduğu için tüm kimyasal temizlemeler titizlikle gerçekleştirildi. Temizleme işlemi aşağıdaki sıraya göre gerçekleştirildi:

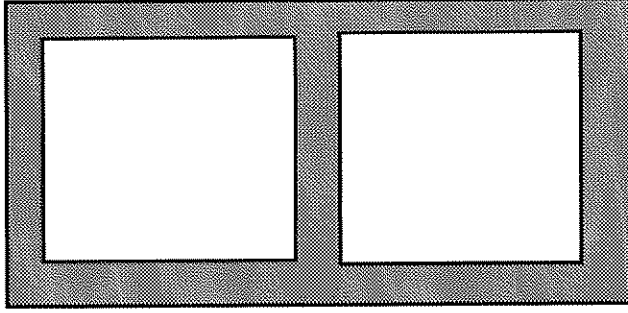
1. Temizleme işlemlerinde kullanılacak tüm beherler, tutucular, DIW (de iyonize su 18 MΩ) ile temizlenip yüksek sıcaklıktaki fırında kurutularak temizlendi.
2. Ankara Ostim Sanayi Sitesinde lazer kesici ile hazırlatılan paslanmaz çelik malzemeli maskeler, numune tutucu cımbız ve buharlaştırılacak saf metal çubuklar (Au) sırasıyla aşağıdaki temizleme işlemine tabi tutuldu;
 - a. Triklor Etilen ile ultrasonik banyoda 5 dakika yıkandı.
 - b. DIW ile durulandı.
 - c. Aseton ile ultrasonik banyoda 5 dakika yıkandı.
 - d. DIW ile durulandı.

- e. Metanol ile ultrasonik banyoda 5 dakika yıkandı.
 - f. DIW ile durulandı.
 - g. Yüksek saflıktaki N_2 gazı ile numune tutucu cımbız, maskeler ve metaller kurutuldu.
3. n-CdTe kristalin temizliği aşağıdaki gibi yapıldı;
- a. Triklor Etilen ile ultrasonik banyoda 5 dakika yıkandı.
 - b. DIW ile durulandı.
 - c. Aseton ile ultrasonik banyoda 5 dakika yıkandı.
 - d. DIW ile durulandı.
 - e. Metanol ile ultrasonik banyoda 5 dakika yıkandı.
 - f. DIW ile durulandı.
 - g. Yüksek saflıktaki N_2 gazı ile numune kurutuldu.

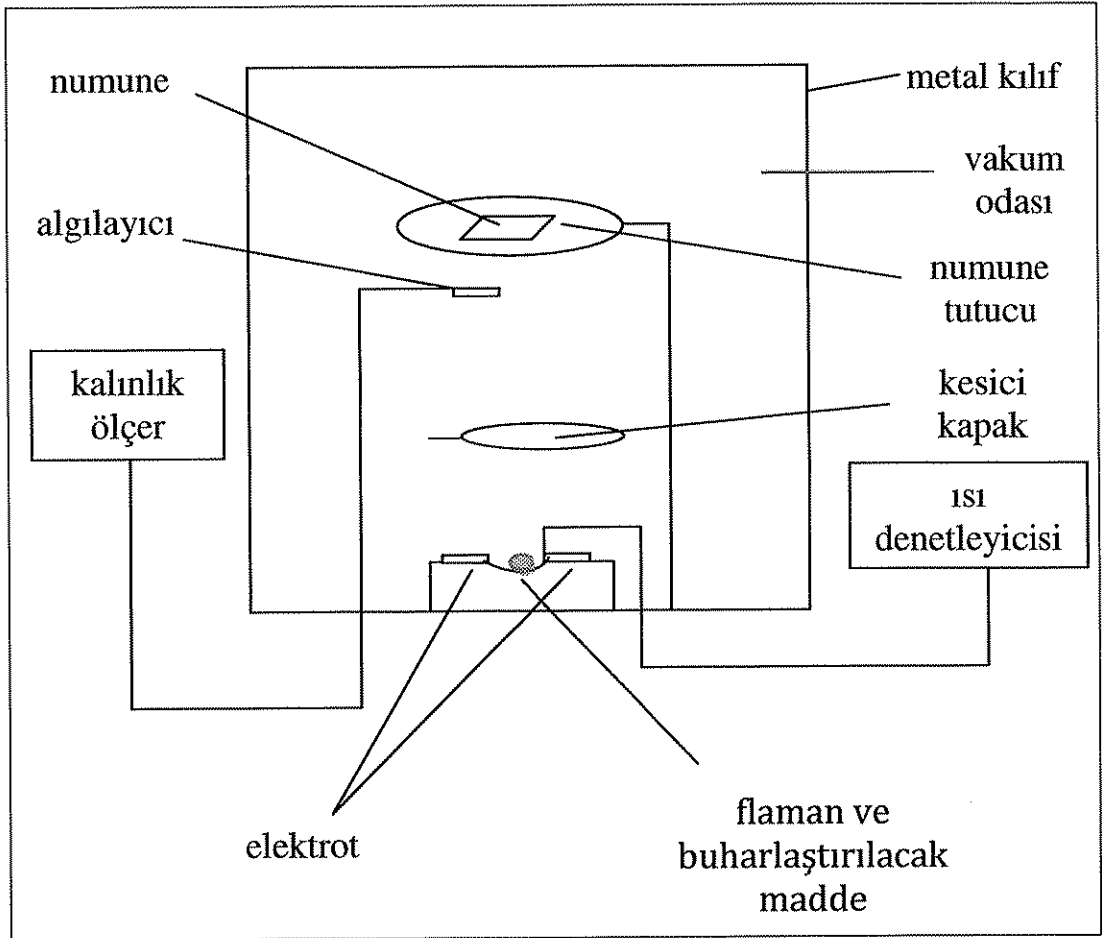
3.1.2. Omik kontağın oluşturulması

n-CdTe yarıiletken kristali üzerinde omik ve doğrultucu kontaklar Gazi Üniversitesi Fizik Bölümü İleri Araştırma Laboratuvarında hazırlandı. Yapıların hazırlanması için kullanılan düzenek basitçe Şekil 3.2’de şematik olarak gösterilmiştir. Flaman (tungsten) ve ince bir paslanmaz çelik levhadan hazırlanan maskeler kimyasal olarak ultrasonik banyoda iyice temizlendi. Temizleme işlemi, karbon-tetraklorür, triklor-etilen ve aseton içerisinde 5 dakikalık süreler ile yapıldı ve daha sonra de-iyonize su ile iyice durulandı. Omik kontağı oluşturmak için kimyasal olarak temizlenen yarıiletkenin mat yüzeyi aşağı gelecek şekilde maske üzerine yerleştirildi ve hemen vakumlama işlemine geçildi. Vakum $\approx 1,3 \cdot 10^{-7}$ mbar’a ulaştığında, flamanların biri üzerinden akım geçirilerek (≈ 35 Amper) %99,999’luk saflığa sahip kimyasal olarak temizlenmiş altın metal parçacıkları buharlaştırıldı. Bu sırada numune sıcaklığı 400 °C tutuldu. Yarıiletkenin mat olan yüzeyine 1508 Å altın kaplama işleminden

sonra numune aynı basınç altında 3 dakika 450 °C'de tutularak altın film n-CdTe kristal içerisine çöktürüldü ve omik kontak oluşması sağlandı. Daha sonra yine aynı yüzeye 1508 Å Au buharlaştırılarak kontak alma yüzeyi hazırlandı ($\approx 1,3 \cdot 10^{-7}$ mbar basınçta).



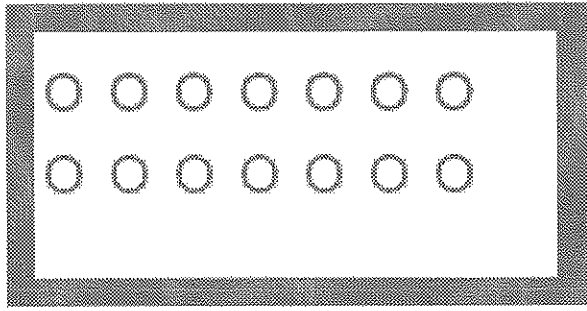
Şekil 3.1. Omik kontak maskesi



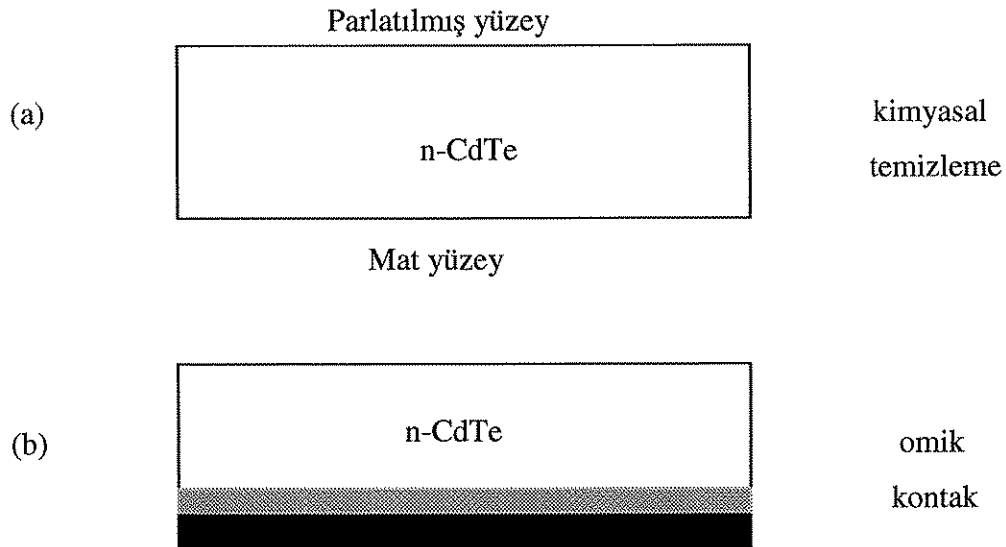
Şekil 3.2. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulmada kullanılan buharlaştırma sistemi

3.1.3. Doğrultucu kontağın oluşturulması

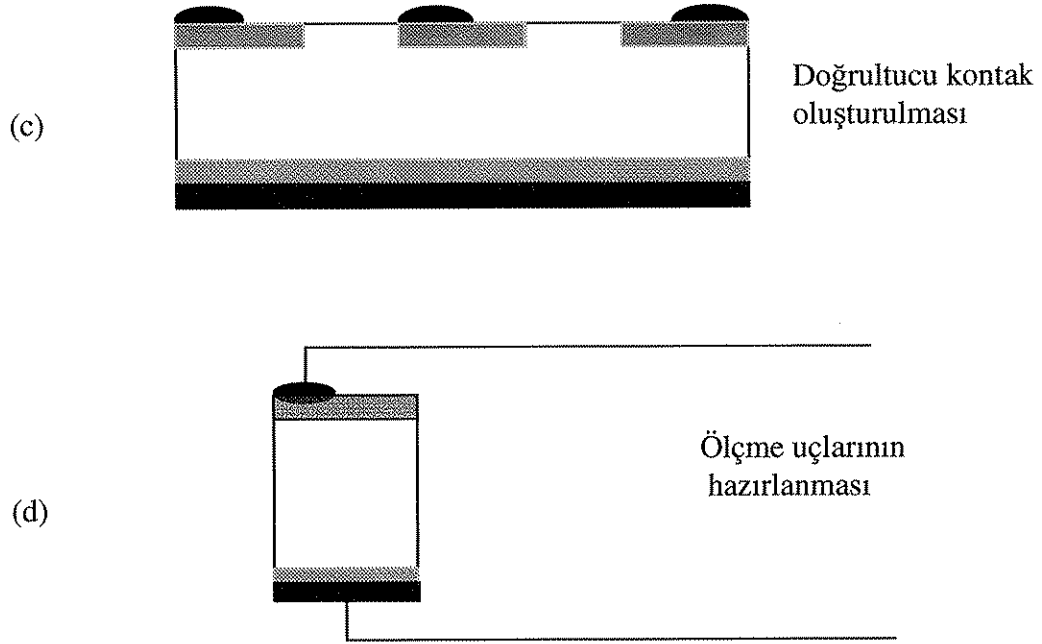
n-CdTe kristalin parlatılmış yüzeyi, 2,5 mm çaplı delikler açılmış olan paslanmaz çelik maske (Şekil 3.3) üzerine yerleştirildi. Flaman üzerine konulan kimyasal olarak temizlenen altın (Au) metal parçası, yaklaşık $2,9 \cdot 10^{-8}$ mbar vakumda buharlaştırılarak kristalin parlak yüzeyine küçük dairecikler (2,5 mm çaplı) şeklinde 100 Å kalınlığında altın kaplanması sağlandı. Bu 2,5 mm çaplı doğrultucu kontaklar üzerine, çemberin bir tarafına degecek şekilde 1 mm çaplı maskeler yerleştirildi ve 1000 Å kalınlığında Au film tabakası oluşturuldu. Bu son işlem elektriksel ölçüm uçları ile kontak yapmak amacıyla yapıldı. Böylece Au/n-CdTe Schottky diyotlar elde edildi. Diyotların hazırlanış şeması Şekil 3.5’de verilmiştir.



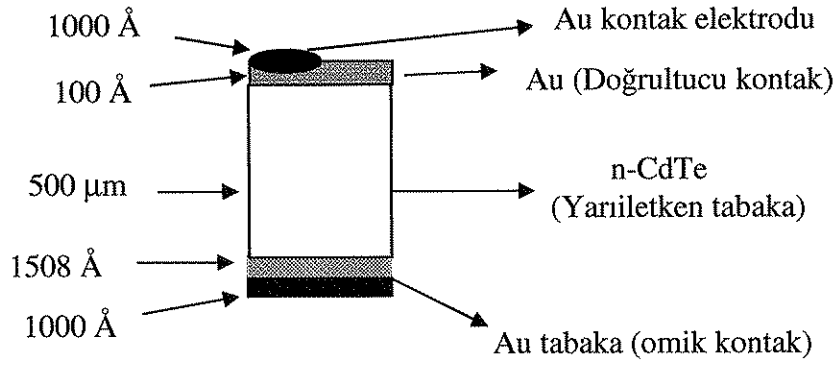
Şekil 3.3. Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan maske



Şekil 3.4. Au/n-CdTe diyodun hazırlanış sırası



Şekil 3.4. Au/n-CdTe diyodun hazırlanış sırası a) kimyasal temizleme, b) omik kontak, c) doğrultucu kontak oluşturulması, d) ölçme uçlarının hazırlanması

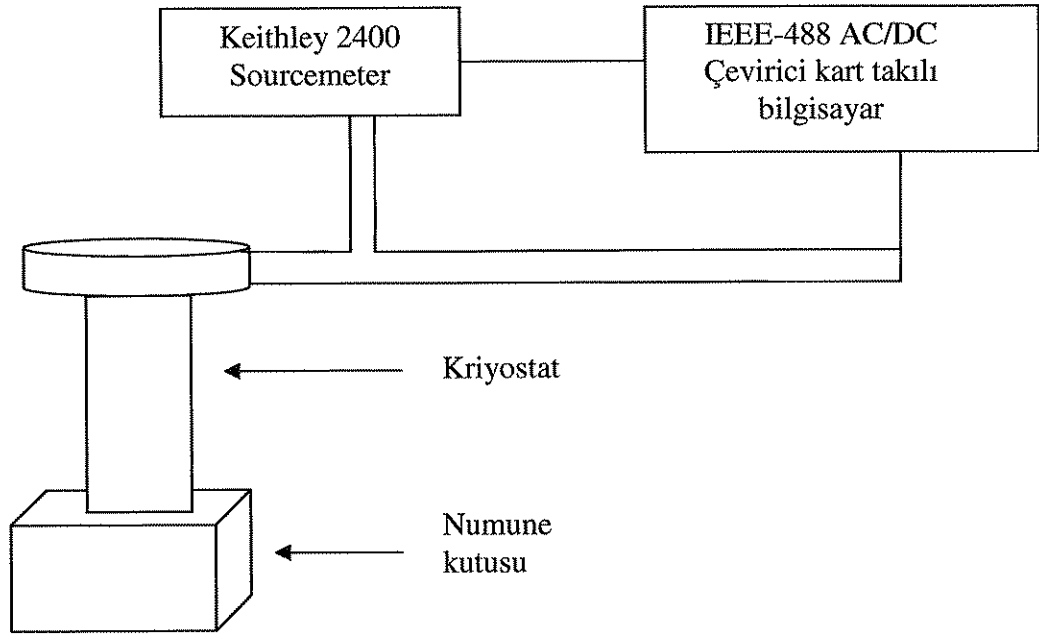


Şekil 3.5. Au/n-CdTe diyodunun şematik gösterimi

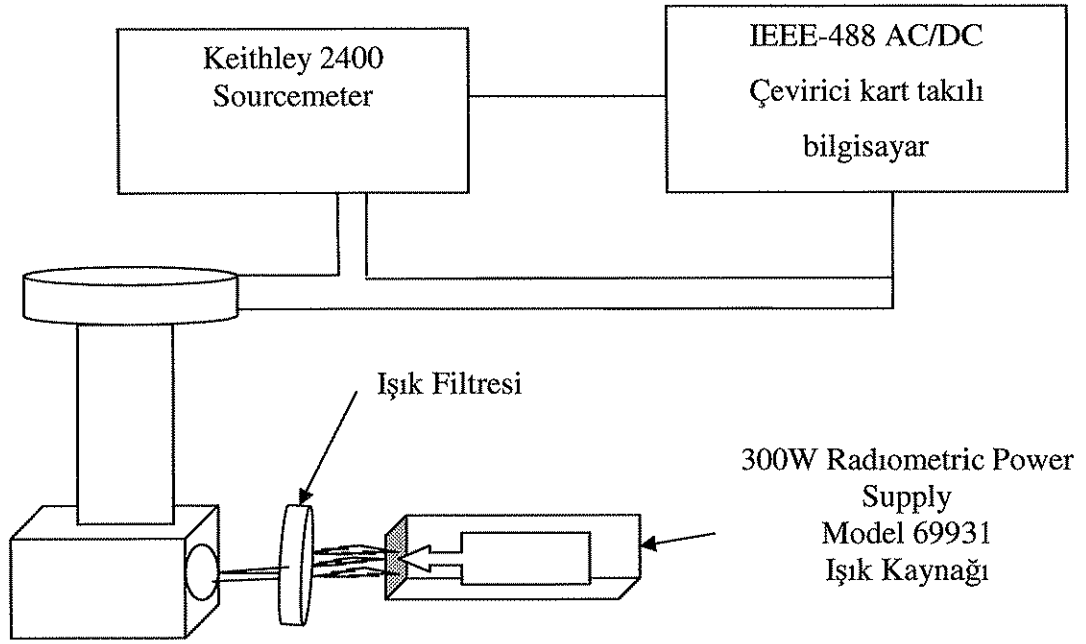
3.2. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri

3.2.1. Akım-Voltaj (I-V) ölçüm düzeneği

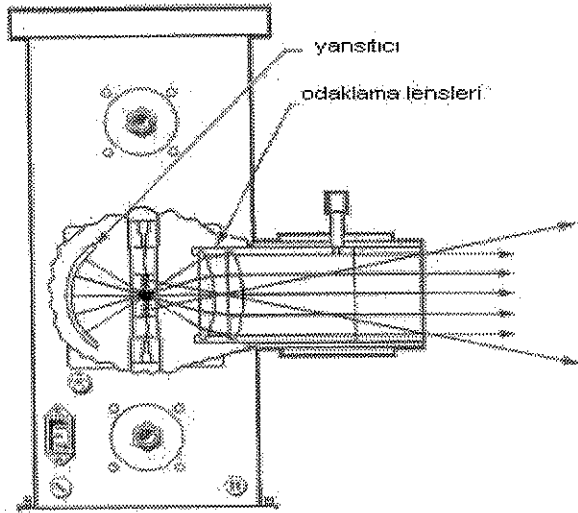
Fiziksel karakterlerin ölçülmesi, Gazi Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü İleri Katıhal Laboratuvarında yapıldı. Akım-voltaj (I-V) ölçümleri için Keithley 2400 Sourcemeter kullanıldı. Ölçümler Hawlett Packard bilgisayarına takılan bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirildi. Akım-voltaj (I-V) ölçümlerinin yapıldığı düzenek Şekil 3.6.a ve Şekil 3.6.b' de gösterilmiştir. Farklı ışık şiddetlerinde ve farklı ışık frekanslarında akım-voltaj ölçümleri için kullanılan sistemin şematik şekli Şekil 3.7'de verilmiştir. Bu ölçümlerde 300 W Radiometric Power Supply Model 69931 ışık kaynağı kullanılmıştır. Üretilen Au/n-CdTe yapıların frekansa bağlı I-V ölçümleri için; Kullanılan Newport Experience Solutions Firmasından temin edilen renkli cam filtrelerin (color glass filter) dalga boyları beyaz filtre ($300\text{ nm} < \lambda < 900\text{ nm}$), kırmızı filtre ($600\text{ nm} < \lambda$), koyu kırmızı filtre ($300\text{ nm} < \lambda < 400\text{ nm}$), sarı filtre ($400\text{ nm} < \lambda$), siyah filtre ($800\text{ nm} < \lambda$), turuncu filtre ($700\text{ nm} < \lambda$), yeşil filtre ($400\text{ nm} < \lambda < 700\text{ nm}$) sahiptir.



Şekil 3.6.a. Akım-voltaj ölçümleri için kullanılan düzenek



Şekil 3.6.b. Farklı ışık filtreleri ile akım-voltaj ölçümleri için kullanılan düzenek



Şekil 3.7. Işık kaynağının şeması

4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Giriş

Bu bölümde, Au/n-CdTe yapıların 150-350 K sıcaklık aralığında, karanlıkta altı farklı sıcaklıkta akım-voltaj (I-V) ölçümlerinden elde edilen sonuçlar verildi. Değişik sıcaklık aralığındaki akım-voltaj (I-V) ölçümlerinden yararlanılarak diyoda ait; idealite faktörü n , doyma akımı I_0 , Schotkky engel yüksekliği Φ_{B0} bulundu. Ayrıca, oda sıcaklığında, farklı dalga boylarına sahip ışık filtreleri kullanılarak akım-voltaj (I-V) ölçümlerinden Au/n-CdTe yapının yukarıda belirtilen parametreleri belirlendi ve bunlar tablolar halinde verildi.

4.2. Değişik Sıcaklıklar İçin Akım-Voltaj (I-V) Karakteristikleri

MIS diyotların fiziksel parametreleri ve akım iletim mekanizmaları ile ilgili çalışmalar optoelektronik ve yüksek frekans uygulamalarında büyük önem taşır. Metal ve yarıiletken arasında oluşmuş olan bu tabaka I-V karakteristiğine ilişkin yapısal parametreleri etkiler. Bu yapılarda termiyonik emisyon (TE), difüzyon, termiyonik emisyon-difüzyon, T_0 etkili iletim, termiyonik alan emisyonu (TAE), alan emisyonu (AE), çok katlı tünelleme, azınlık taşıyıcı enjeksiyonu, oluşum-yeniden birleşme gibi değişik akım mekanizmaları etkili olabilir. Belirli bir sıcaklıkta tüm gerilim aralığında tek bir akım iletim mekanizması baskın olabileceği gibi, aynı anda iki veya daha fazla akım iletim mekanizması da baskın olabilir. Bu yüzden elde edilen karakteristiklerin açıklanması oldukça karmaşık olabilir. Yüzeyin hazırlık işlemleri (temizliği), metalden yarıiletken engel yüksekliği, yarıiletkenin safsızlık yoğunluğu, sıcaklık, voltaj gibi birçok parametre; baskın akım iletim mekanizmasını etkileyen faktörlerdendir. Bu çalışmada diyotun, akım-voltaj (I-V) karakteristiğinin ve bazı fiziksel parametrelerinin sıcaklığa bağlı grafikleri örnek olarak verildi.

Diyodun 150K-350K sıcaklık aralığındaki doğru beslem akım-voltaj karakteristiği Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

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

ile verilir. Burada V_D diyot üzerine düşen gerilim, k Boltzmann sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklık ve I_0 doyma akımı olup,

$$I_0 = AA^*T^2 \exp \left[\frac{-q}{kT} \phi_B \right] \quad (4.2)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada ϕ_B potansiyel engel yüksekliği, A diyod alanı ve A^* Richardson sabitidir. Diyotlardaki I-V karakteristiği gerçekte Eş. 4.1'deki ideal durumu sağlamaz. Bu durumda diyot için akım ifadesi,

$$I = I_0 \exp \left(\frac{qV_D}{nkT} \right) \left[1 - \exp \left(\frac{-q}{kT} V_D \right) \right] \quad (4.3)$$

şeklinde dir. Burada n , idealite faktörüdür. İdealite faktörü sıcaklığa ve uygulanan gerilime bağlıdır ve değeri 1'den büyük olmalıdır. İdealite faktörünün 1'den büyük olmasının bir çok nedeni vardır. Bunlardan en önemlisi ϕ_B 'nin voltaja bağlı olmasıdır. Eş. 4.3 ifadesi

$V > 3kT/q$ için,

$$I = I_0 \exp \left(\frac{q}{nkT} V_D \right) \quad (4.4)$$

şeklinde verilir. $\ln I$ 'nin V 'ye göre grafiğinin bir doğru olması beklenir. Eğer grafik doğrusal değilse, idealite faktörü büyüktür ve diyod ideallikten uzaktır. Bunun sebebi, arayüzeydeki atomik homojensizliklere bağlanabilir. İdeal Schottky diyodları için verilen Eş. 4.4 ifadesi MIS diyodlarda çizilen $\ln I$ - V grafiğinin doğrusal bölgesinin incelenmesinde kullanılabilir. Eş. 4.4 ifadesinin her iki tarafının $\ln$ 'i alınırsa;

$$\ln I = \ln I_0 + \frac{q}{nkT} V_D \quad (4.5)$$

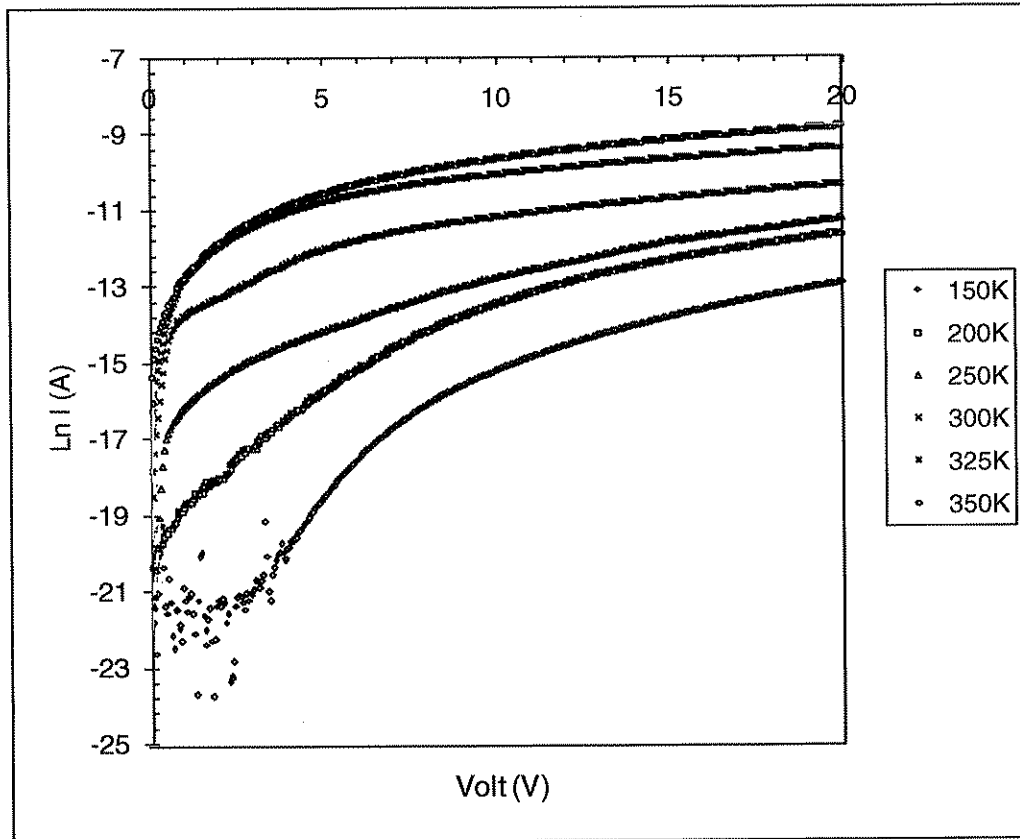
olur ve bu doğrunun eğiminden idealite faktörü hesaplanabilir. Bu denklemde $\ln I$ - V grafiğinin lineer bölgesinin eğimi $m = q/nkT$ ifadesini verir. Buradan,

$$n = \left(\frac{q}{mkT} \right) \quad (4.6)$$

elde edilir. I_0 doyma akımı değeri de, $\ln I$ - V grafiğinin lineer bölgesinin uzantısının $\ln I$ eksenini kestiği noktadan bulunabilir. Bu I_0 değeri kullanılarak;

$$\Phi_B(I-V) = \frac{kt}{q} \ln \left(\frac{AA^* T^2}{I_0} \right) \quad (4.7)$$

eşitliği yardımıyla potansiyel engel yüksekliği $\Phi_B(I-V)$ değeri hesaplanabilir. Bu diyodun her sıcaklık için $\ln I$ - V eğrisinden elde edilen doyma akımı (I_0), idealite faktörü (n), ve potansiyel engel yüksekliği $\Phi_B(I-V)$ değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.1’e bakılacak olursa her bir sıcaklık için lineer bölgenin eğiminin farklı olduğu görülmektedir. Dolayısı ile hesaplanan idealite faktörleri de sabit kalmayıp değişen sıcaklıkla beraber değişmektedir.



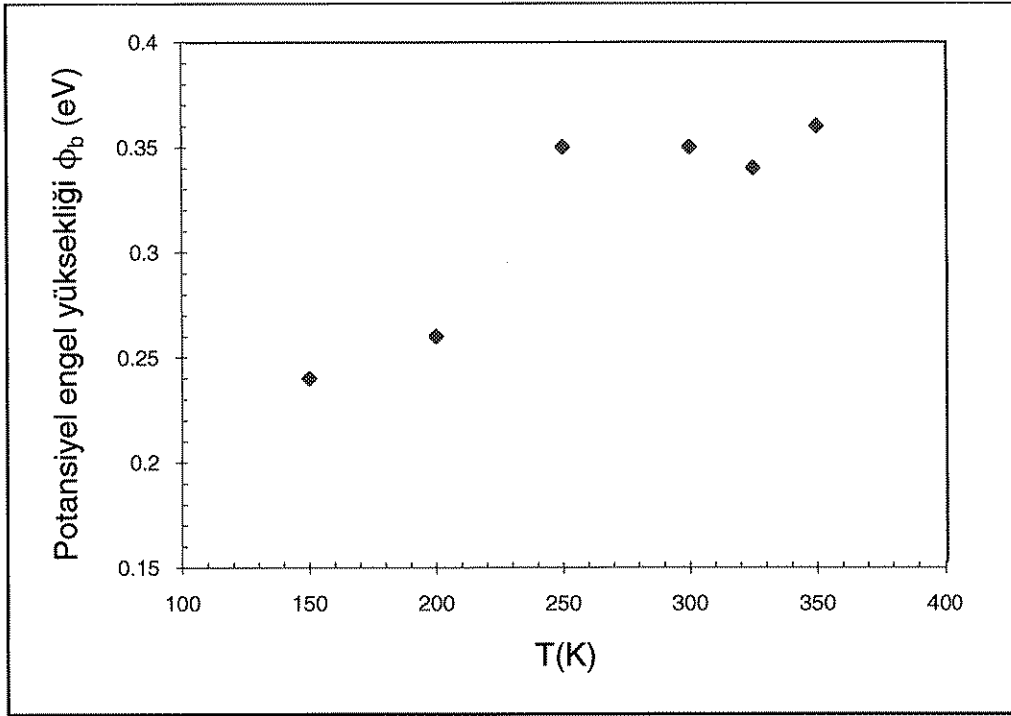
Şekil 4.1. Au/n-CdTe yapının karanlıkta 150-350 K sıcaklık aralığındaki akım-voltaj karakteristikleri

$\ln I-V$ grafiklerinden yapılan hesaplamalarda idealite faktörünün 1'den büyük ve idealite faktörünün sıcaklığa bağlı olarak azalmaktadır [15].

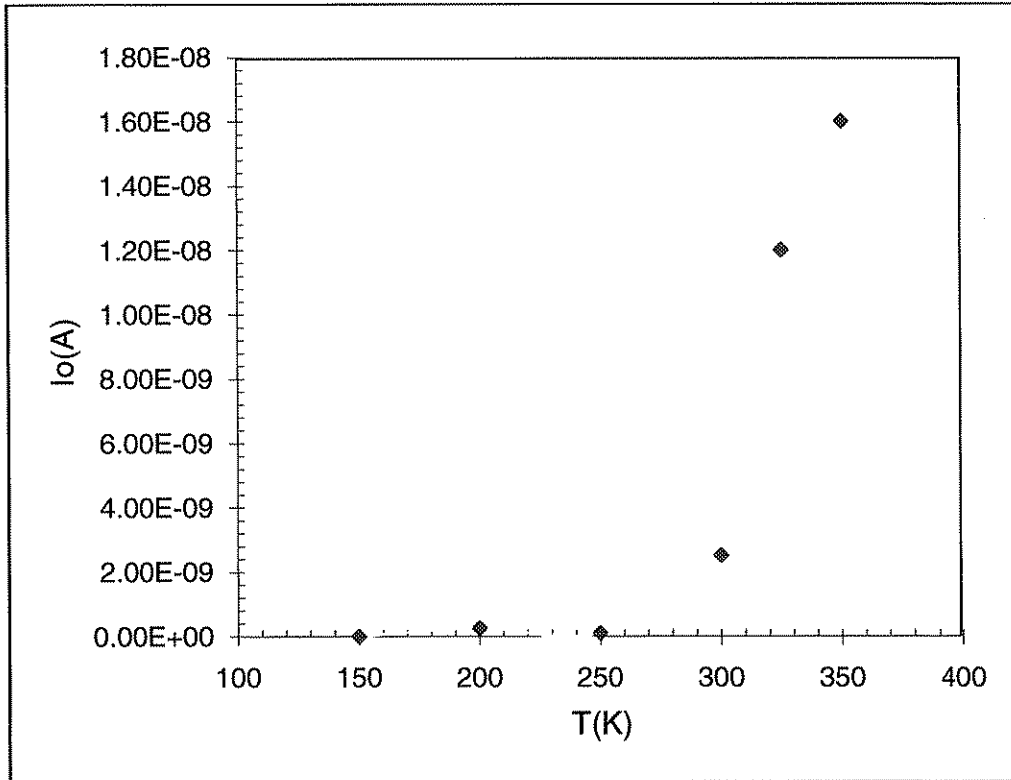
Çizelge 4.1. Diyodun değişik sıcaklıklardaki akım – voltaj karakteristiğinden elde edilen; idealite faktörü, doyum akımı, potansiyel engel yüksekliği

T(K)	n	$I_0(A)$	$\Phi_B(I-V) (eV)$
150	3,29	5,35E-12	0,24
200	3,23	2,68E-10	0,26
250	3,07	1,1E-10	0,35
300	2,49	2,52E-9	0,35
325	1,75	1,2E-8	0,34
350	1,51	1,6E-8	0,36

Diyodun engel yüksekliğinin (Φ_B) sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 4.2'de verilmiştir. Görüldüğü gibi sıcaklık arttıkça engel yüksekliği artmaktadır. Şekil 4.3'de ise diyodun doyma akımının sıcaklığa göre değişimi verilmiştir. Grafikten doyma akımının sıcaklıkla lineer artmadığı görülmektedir.

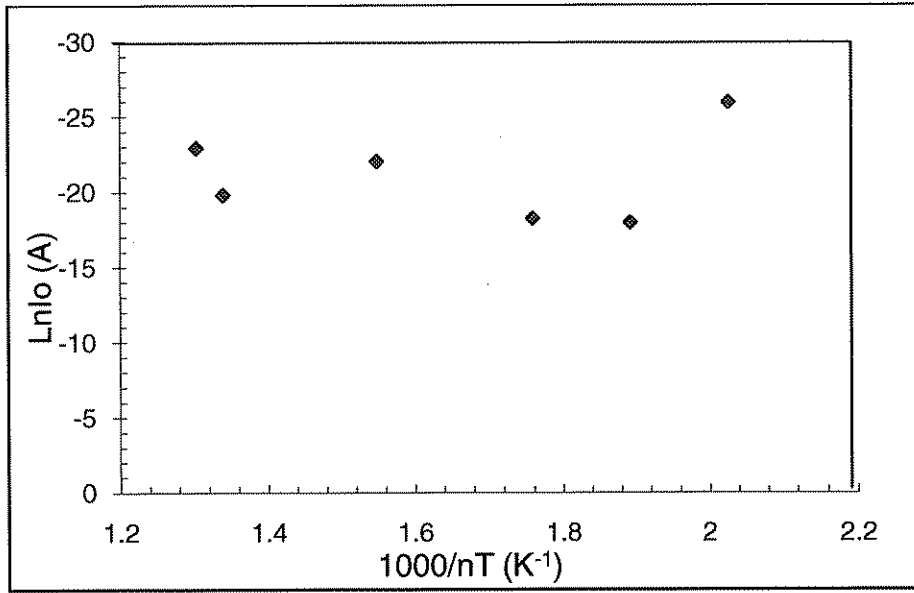


Şekil 4.2. Diyodun engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı değişimi

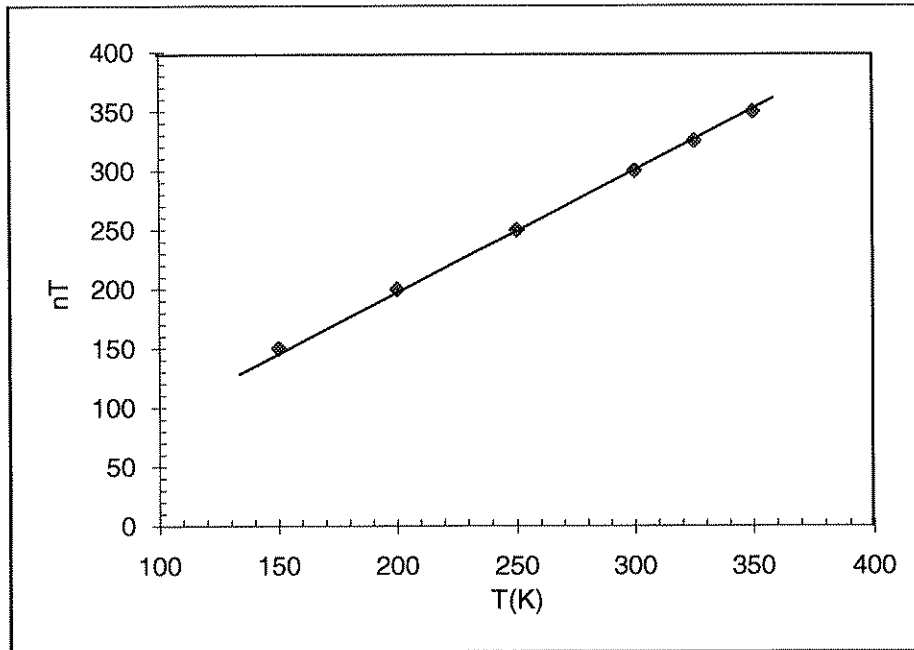


Şekil 4.3. Diyodun doyma akımının sıcaklığa bağlı değişimi

Şekil 4.4’de diyodun $\ln I_0 - 1000/nT$ grafiği verilmiştir. Grafiğin çizgisel olmadığı görülmektedir, bu; diyodumuz için termiyonik alan emisyonunun (TAE) geçerli bir akım iletim mekanizması olmadığını gösterir. Şekil 4.5’de diyodun sıcaklığa bağlı nT değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi nT ’nin sıcaklıkla değişimi grafiğinde lineerlik söz konusudur.



Şekil 4.4. Diyodun $\ln(I_0) - 1000/nT$ değişimi

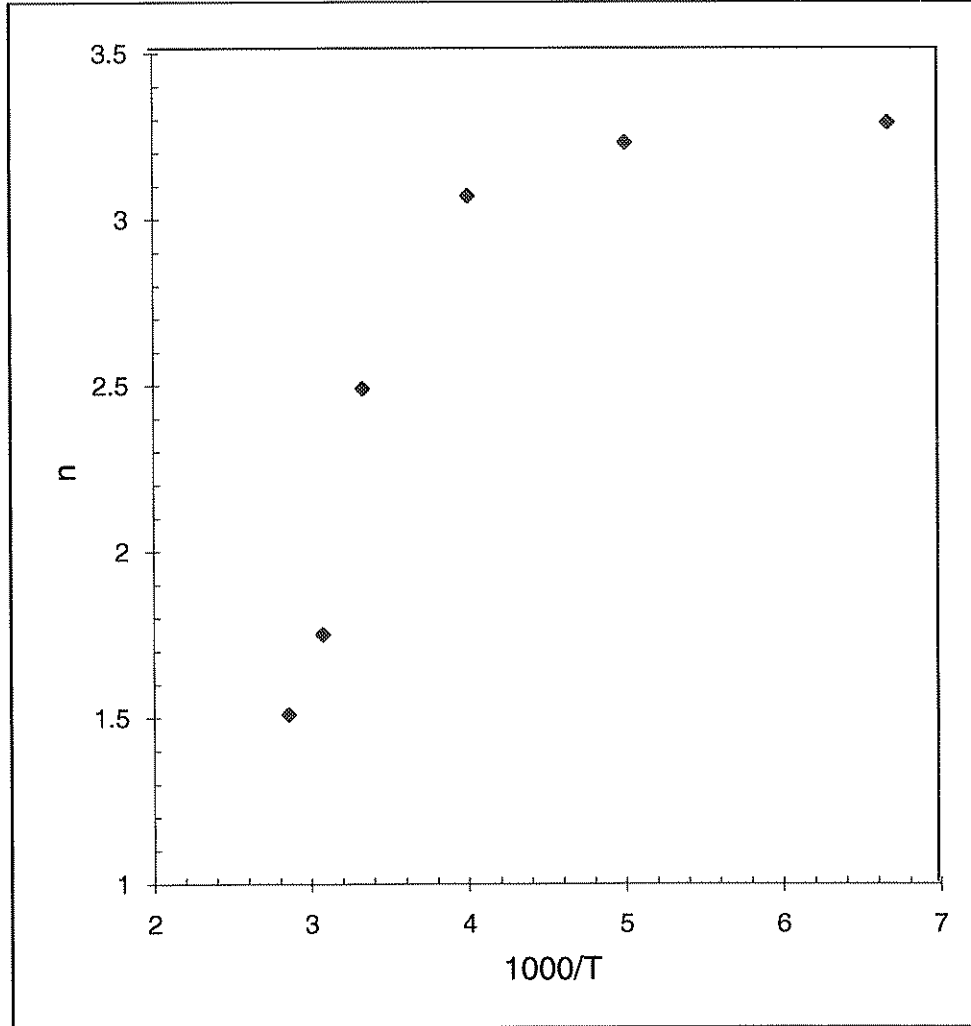


Şekil 4.5. Diyodun sıcaklığa bağlı nT değişimi

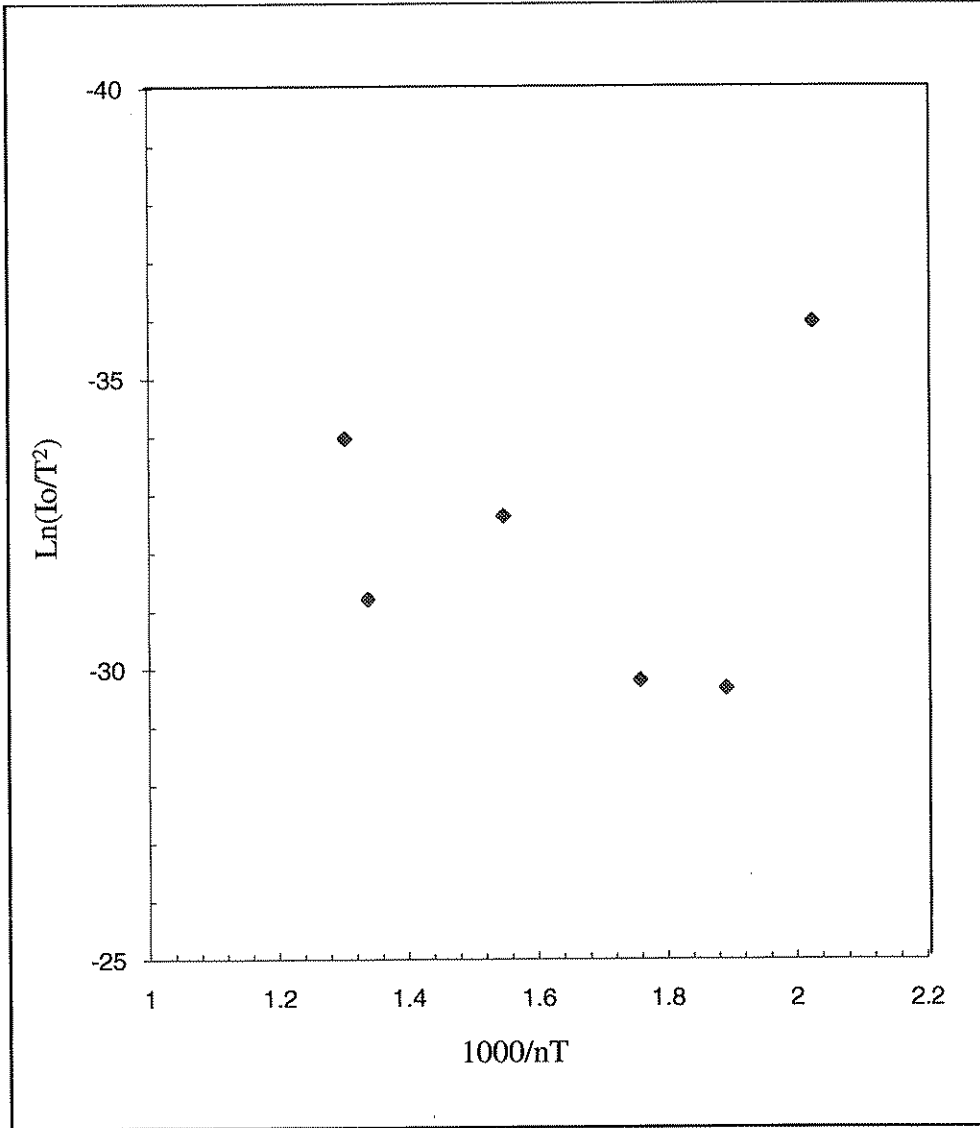
Çizelge 4.1 ve Şekil 4.6'da görüldüğü gibi idealite faktörü artan sıcaklıkla azalmaktadır ve n sıcaklığın tersi ile,

$$n(T) = n_0 + T_0/T \quad (4.8)$$

bağıntısına göre değişmektedir. Şekil 4.6'daki doğrunun eğiminden T_0 , n eksenini kestiği noktadan n_0 katsayıları bulundu. Bu Au/n-CdTe yapı için $T_0 = 300$ K de $n_0 = 2,49$ bulundu.



Şekil 4.6. Diyodun n - $1000/T$ değişimi



Şekil 4.7. Diyodun $\text{Ln}(I_0/T^2)$ - $1000/nT$ değişimi

Diyod için Şekil 4.7’de gösterilen $\text{Ln}(I_0/T^2)$ - $1000/nT$ eğrisinin çizgisel olmadığından dolayı çok katlı tünellemeden bahsetmek yanlış olur. Bu nedenle çeşitli tünelleme ile ilgili parametreler hesaplanamamıştır.

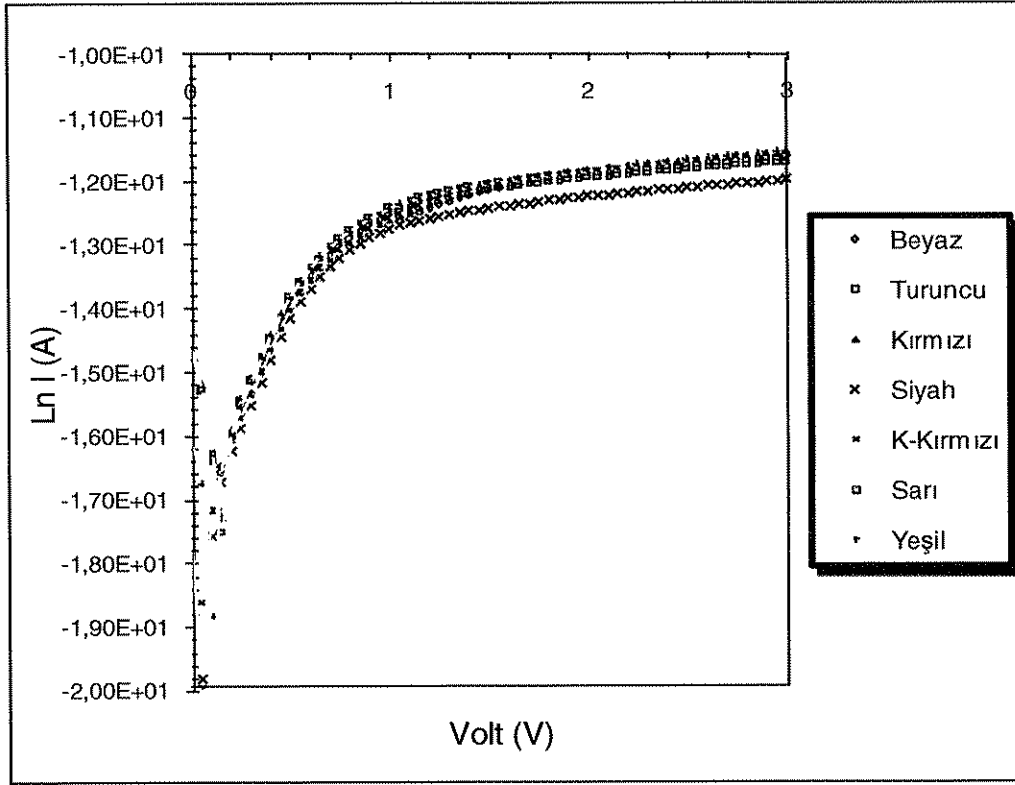
4.3. Işık Şiddetine ve Farklı Dalga Boylarındaki Filtrelere Bağlı Akım-Voltaj

(I-V) Karakteristikleri

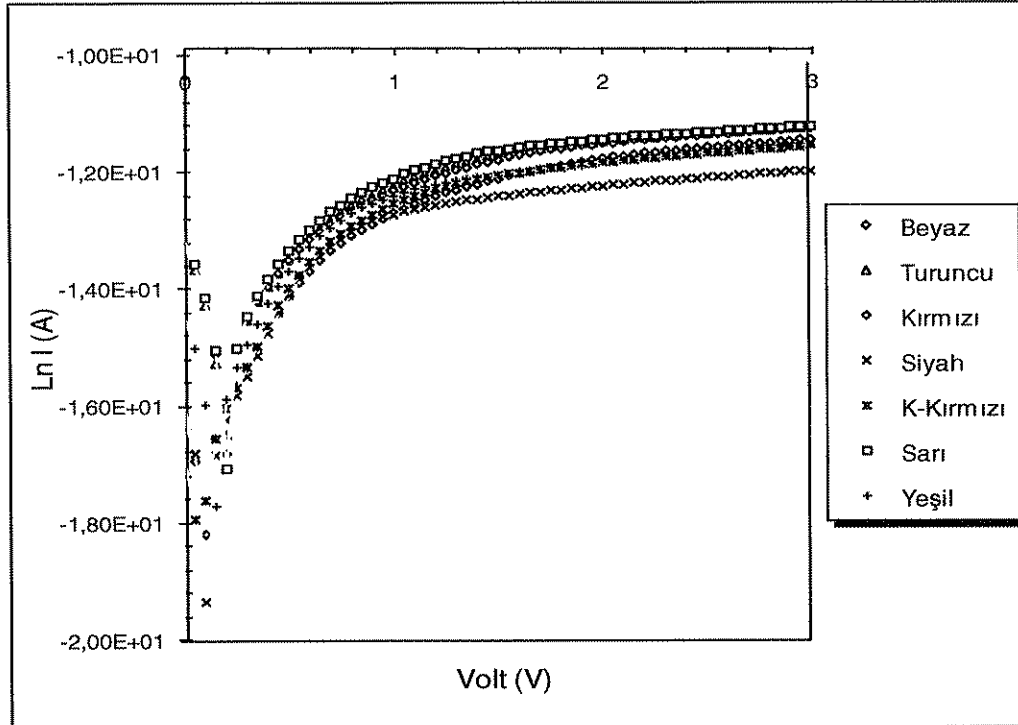
Bu deneysel çalışmada, hazırlanan Au/n-CdTe yapının, Newport Firmasının Oriel Üretimin 300W Radyometrik Güç Kaynağı Model 69931 ışık kaynağından çıkan farklı ışık güçleri için yedi farklı dalga boyuna sahip ışık filtreleri kullanılarak oda sıcaklığında akım-voltaj ölçümleri yapıldı. Kullanılan Newport Experience Solutions Firmasından temin edilen renkli cam filtrelerin (color glass filter) dalga boyları beyaz filtre ($300 \text{ nm} < \lambda < 900 \text{ nm}$), kırmızı filtre ($600 \text{ nm} < \lambda$), koyu kırmızı filtre ($300 \text{ nm} < \lambda < 400 \text{ nm}$), sarı filtre ($400 \text{ nm} < \lambda$), siyah filtre ($800 \text{ nm} < \lambda$), turuncu filtre ($700 \text{ nm} < \lambda$), yeşil filtre ($400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$) sahiptir. Elde edilen verilerden akım-voltaj ile ilgili grafikler 5 watt için Şekil 4.8, 10 watt için Şekil 4.9, 20 watt için Şekil 4.10, 40 watt için Şekil 4.11, 60 watt için Şekil 4.12, 80 watt için Şekil 4.13, 100 watt için Şekil 4.14, 150 watt için Şekil 4.15, 200 watt için Şekil 4.16 ve 250 watt için ise Şekil 4.17 verildi.

Aynı numunelerin her bir filtre için farklı ışık güçlerindeki akım-voltaj ölçümleri yapılarak grafikleri beyaz filtre ($300 \text{ nm} < \lambda < 900 \text{ nm}$) için Şekil 4.18, kırmızı filtre ($600 \text{ nm} < \lambda$) için Şekil 4.19, koyu kırmızı filtre ($300 \text{ nm} < \lambda < 400 \text{ nm}$) için Şekil 4.20, sarı filtre ($400 \text{ nm} < \lambda$) için Şekil 4.21, siyah filtre ($800 \text{ nm} < \lambda$) için Şekil 4.22, turuncu filtre ($700 \text{ nm} < \lambda$) için Şekil 4.23, yeşil filtre ($400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$) için Şekil 4.24 ile verildi. Her bir ışık filtresi için hesaplanan idealite faktörleri ve engel yükseklikleri çizelgeler halinde verildi (Çizelge 4.2-Çizelge 4.8).

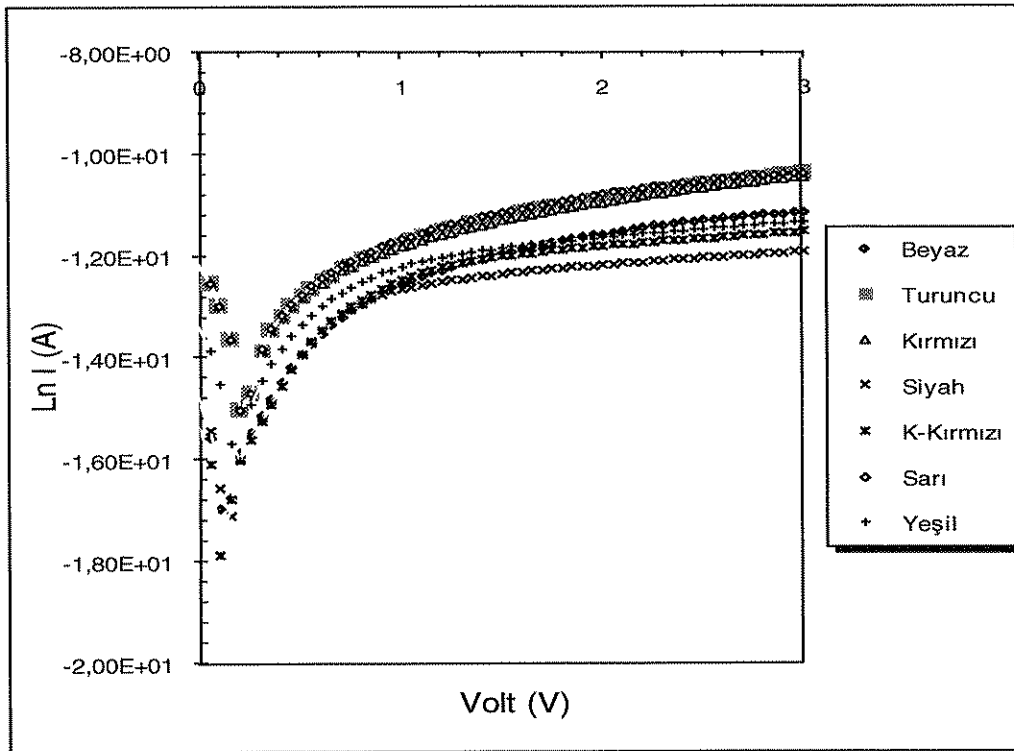
Bu numunelerin oda sıcaklığında, farklı dalga boylarına sahip tüm filtreler için idealite faktörü(n)-ışık kaynağı çıkış gücü(P) karakteristikleri toplu halde çizildi (Şekil 4.25). Farklı dalga boylarına sahip tüm filtrelerdeki voltajlara göre idealite faktörleri çizelge halinde verildi (Çizelge 4.9). Farklı dalga boylarına sahip tüm filtreler için potansiyel engel yüksekliği(Φ_B)-ışık kaynağı çıkış gücü(P) karakteristikleri toplu halde çizildi (Şekil 4.26). Farklı dalga boylarına sahip tüm filtrelerdeki ışık kaynağının çıkış güçlerine bağlı potansiyel engel yükseklikleri çizelge halinde verildi (Çizelge 4.10).



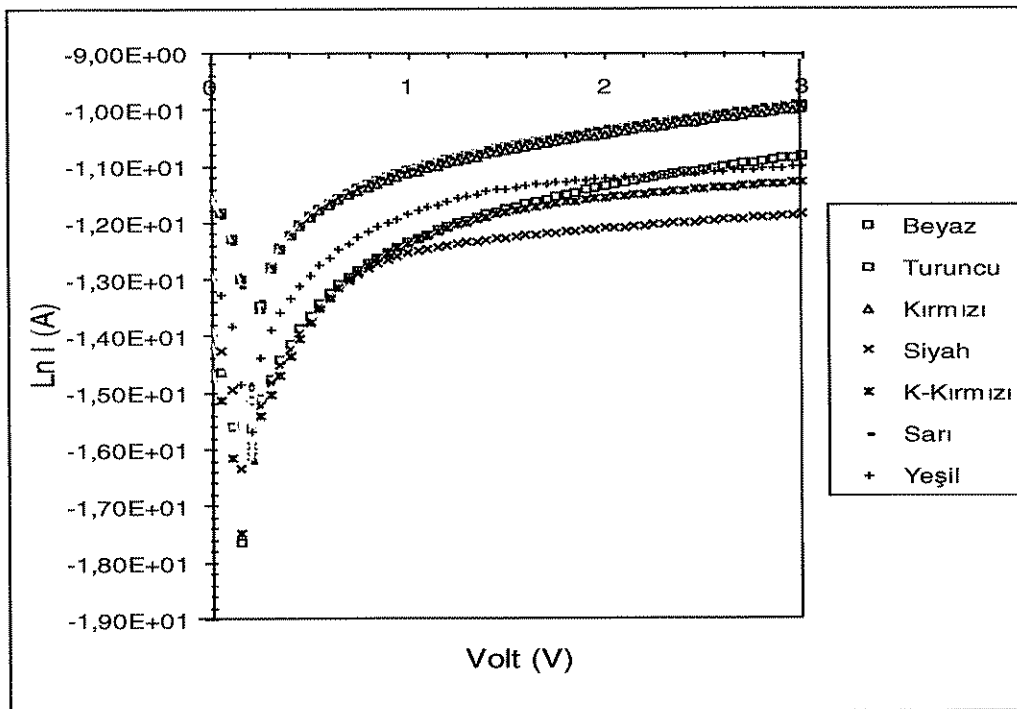
Şekil 4.8. Au/n-CdTe yapının oda sıcaklığında 5 watt cihaz çıkış gücü için akım-voltaj karakteristikleri



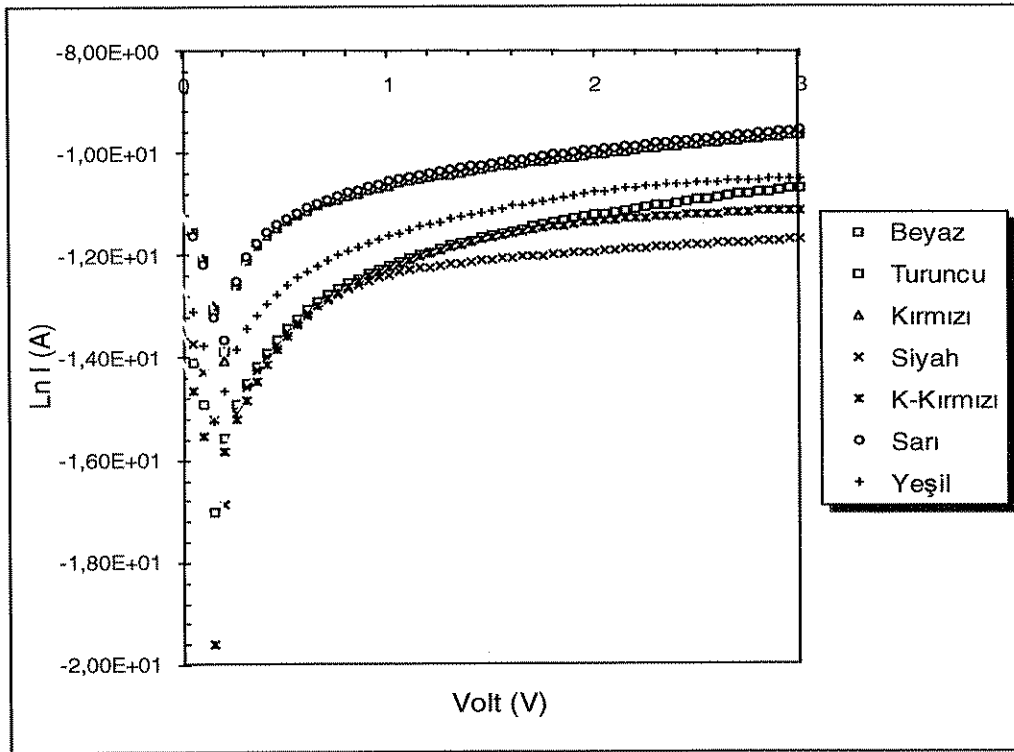
Şekil 4.9. Au/n-CdTe yapının oda sıcaklığında 10 watt cihaz çıkış gücü için akım-voltaj karakteristikleri



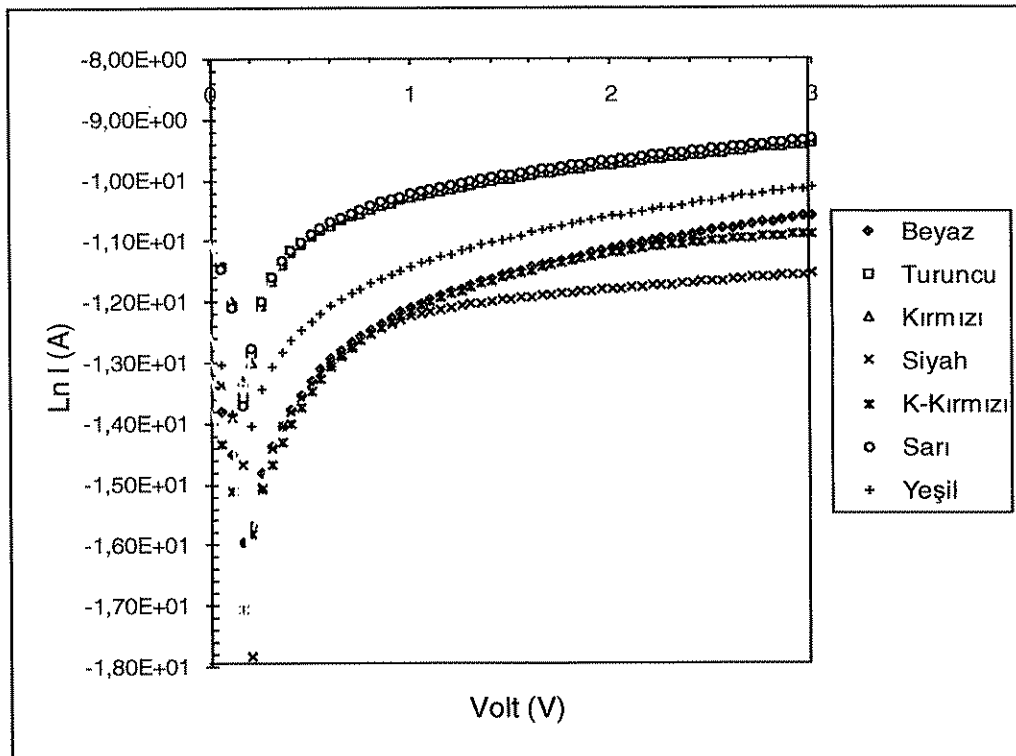
Şekil 4.10. Au/n-CdTe yapının oda sıcaklığında 20 watt cihaz çıkış gücü için akım-voltaj karakteristikleri



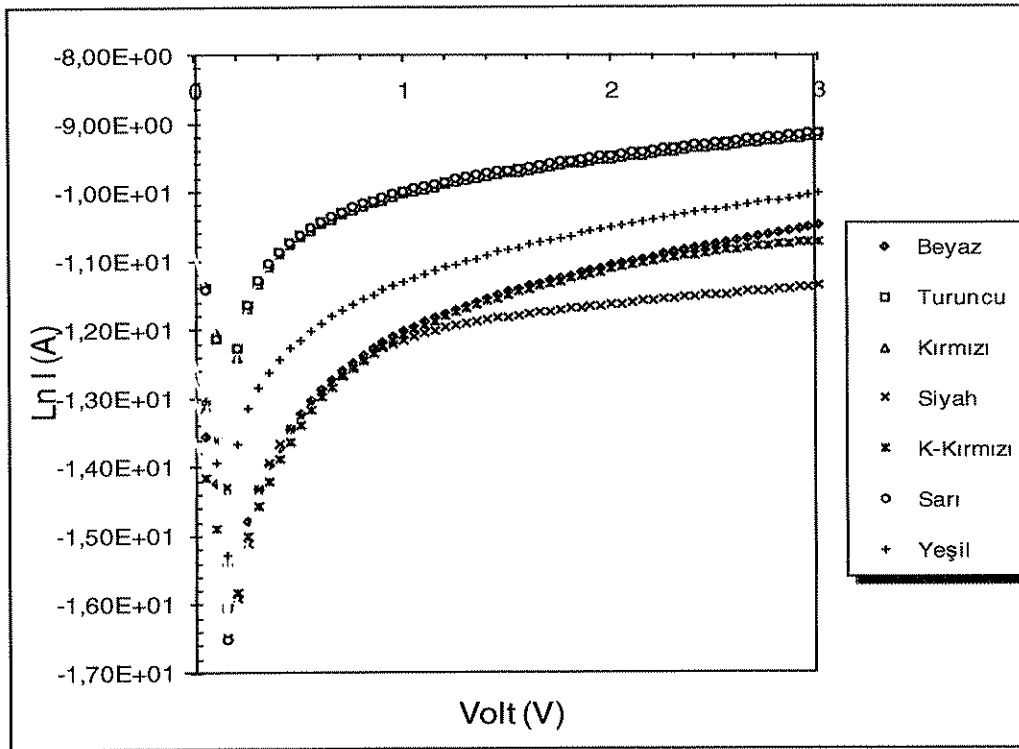
Şekil 4.11. Au/n-CdTe yapının oda sıcaklığında 40 watt cihaz çıkış gücü için akım-voltaj karakteristikleri



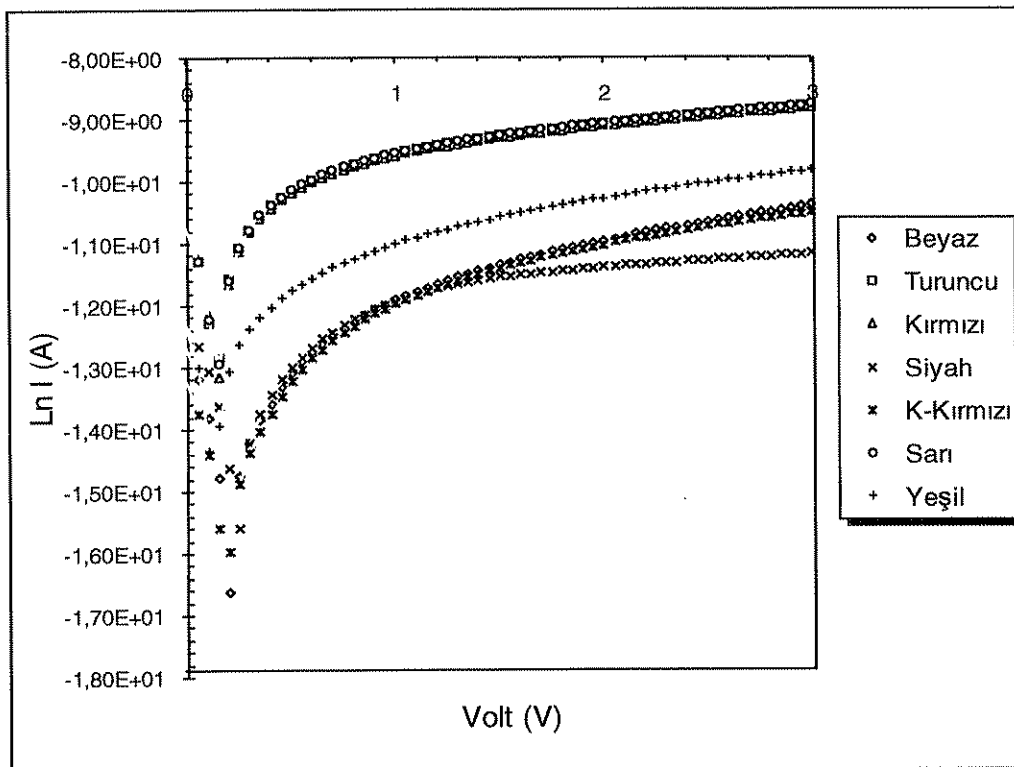
Şekil 4.12. Au/n-CdTe yapının oda sıcaklığında 60 watt cihaz çıkış gücü için akım-voltaj karakteristikleri



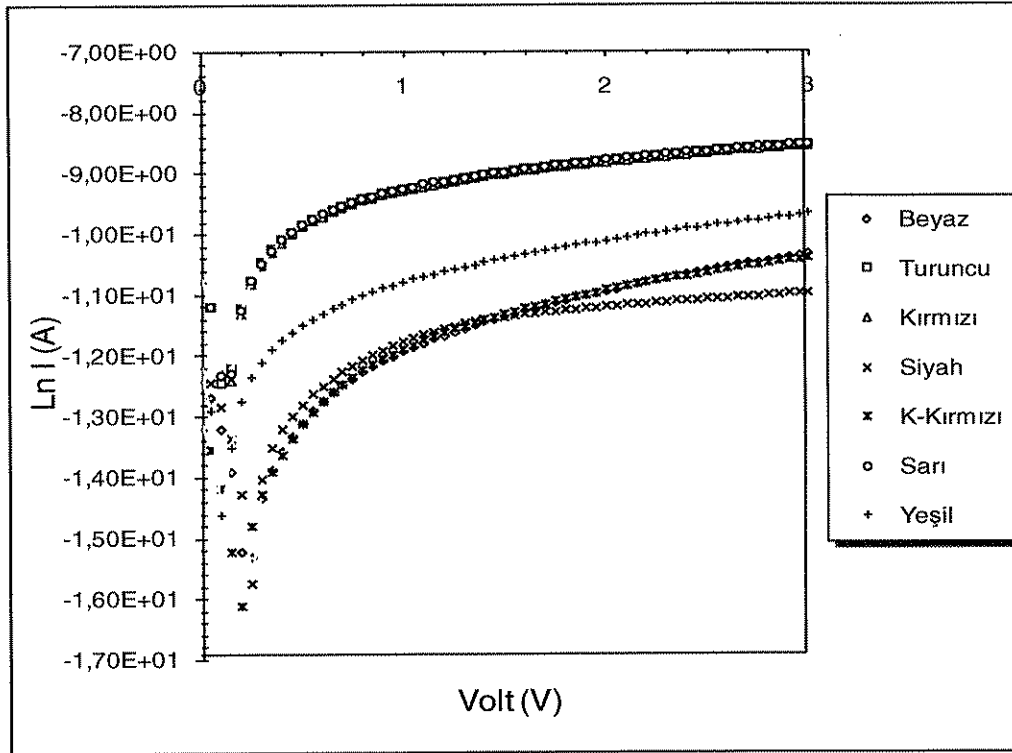
Şekil 4.13. Au/n-CdTe yapının oda sıcaklığında 80 watt cihaz çıkış gücü için akım-voltaj karakteristikleri



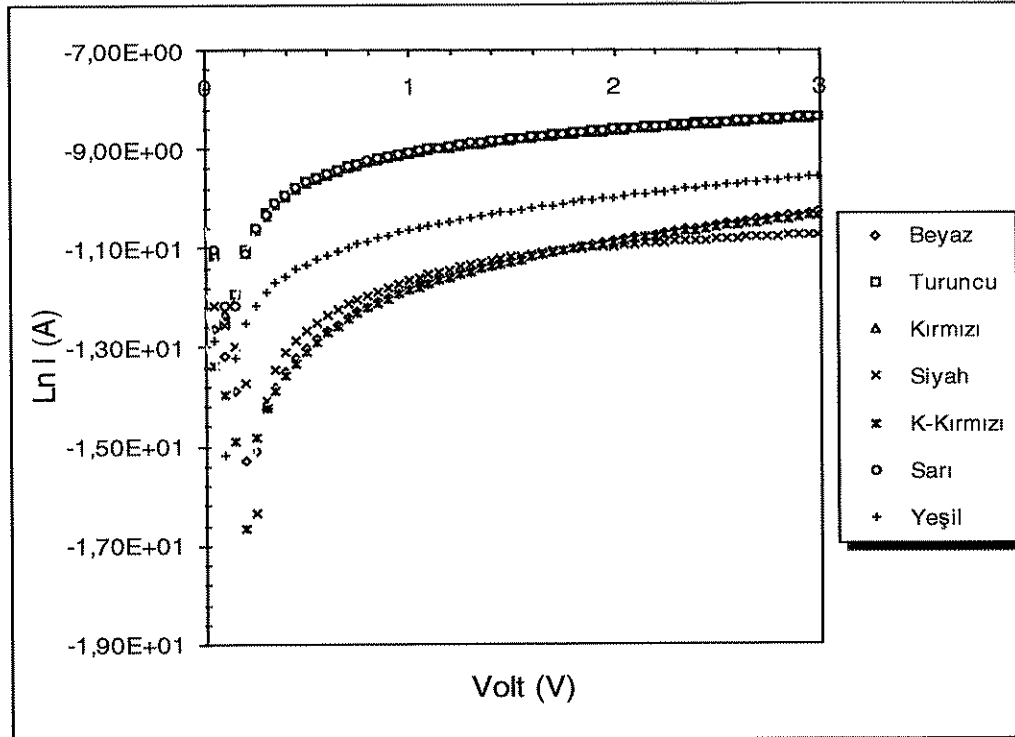
Şekil 4.14. Au/n-CdTe yapının oda sıcaklığında 100 watt cihaz çıkış gücü için akım-voltaj karakteristikleri



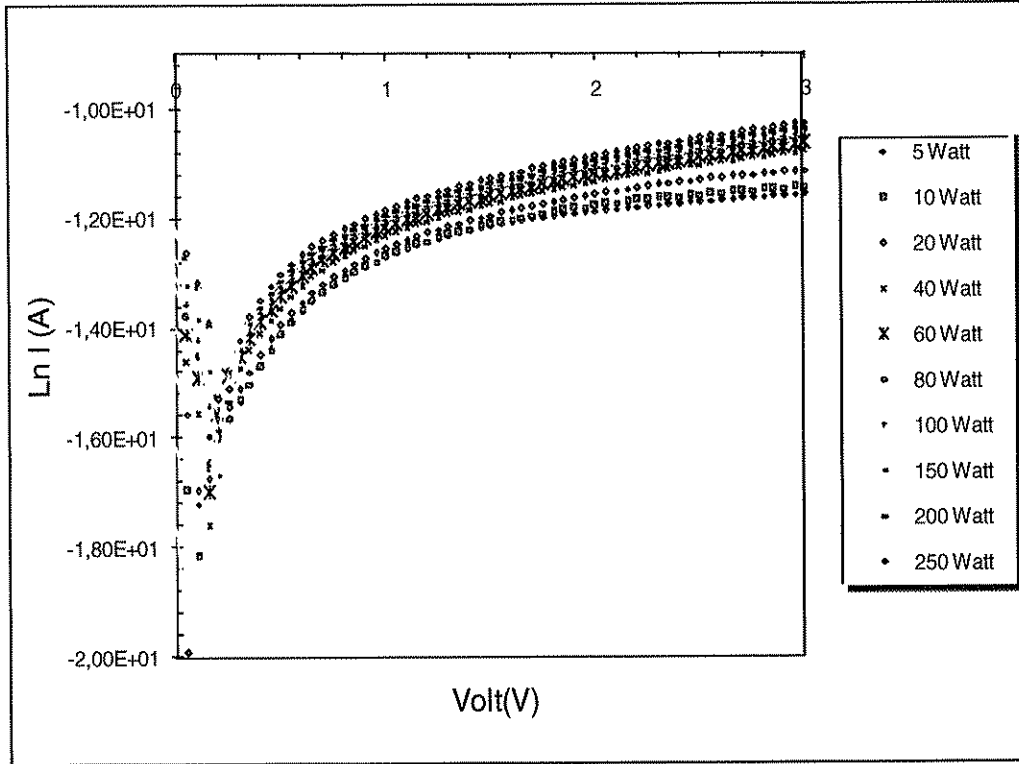
Şekil 4.15. Au/n-CdTe yapının oda sıcaklığında 150 watt cihaz çıkış gücü için akım-voltaj karakteristikleri



Şekil 4.16. Au/n-CdTe yapının oda sıcaklığında 200 watt cihaz çıkış gücü için akım-voltaj karakteristikleri



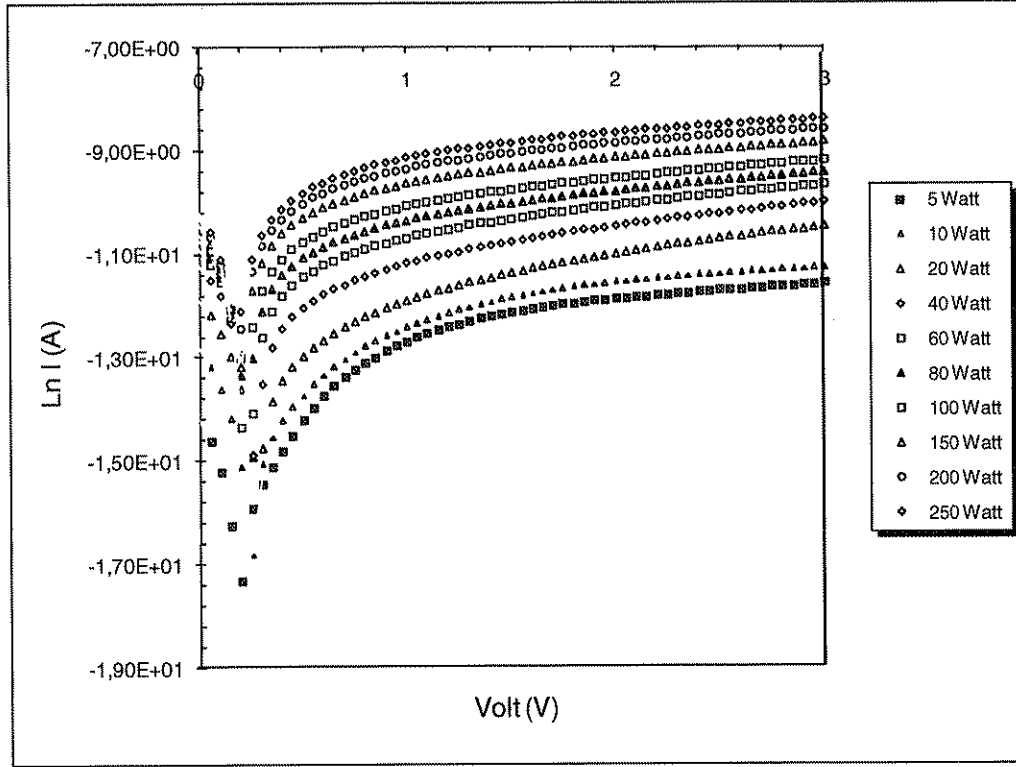
Şekil 4.17. Au/n-CdTe yapının oda sıcaklığında 250 watt cihaz çıkış gücü için akım-voltaj karakteristikleri



Şekil 4.18. Au/n-CdTe yapının beyaz filtre ($300 \text{ nm} < \lambda < 900 \text{ nm}$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım-voltaj karakteristikleri

Çizelge 4.2. Diyodun beyaz filtre ($300 \text{ nm} < \lambda < 900 \text{ nm}$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım-voltaj karakteristiğinden elde edilen; idealite faktörü, doyum akımı, potansiyel engel yüksekliği

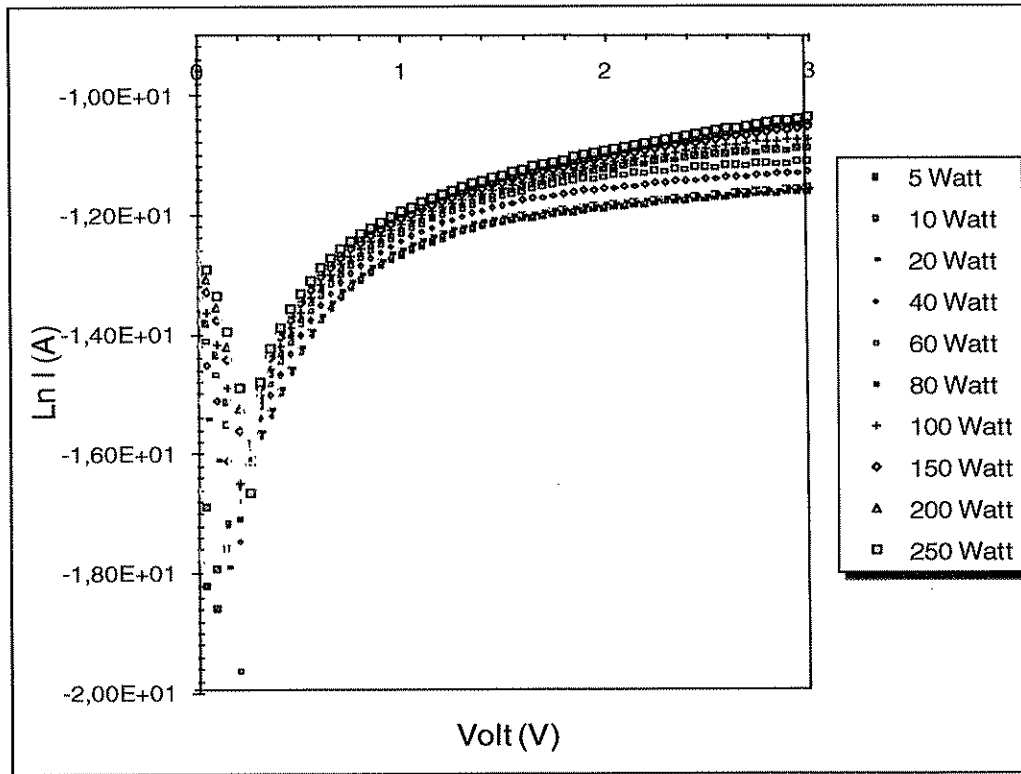
P(Watt)	n	$I_0(\text{A})$	$\Phi_B(\text{I-V}) (\text{eV})$
5	1,11	5,56E-10	0,39
10	1,78	1,76E-9	0,36
20	2,97	8,23E-9	0,32
40	3,15	8,13E-9	0,32
60	3,58	2,1E-8	0,29
80	3,81	2,46E-8	0,29
100	4,35	3,77E-8	0,28
150	4,53	4,21E-8	0,28
200	5,12	6,22E-8	0,27
250	5,28	7,63E-8	0,26



Şekil 4.19. Au/n-CdTe yapının kırmızı filtre ($600 \text{ nm} < \lambda$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım-gerilim karakteristikleri

Çizelge 4.3. Diyodun kırmızı filtre ($600 \text{ nm} < \lambda$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım-voltaj karakteristiğinden elde edilen; idealite faktörü, doyum akımı, potansiyel engel yüksekliği

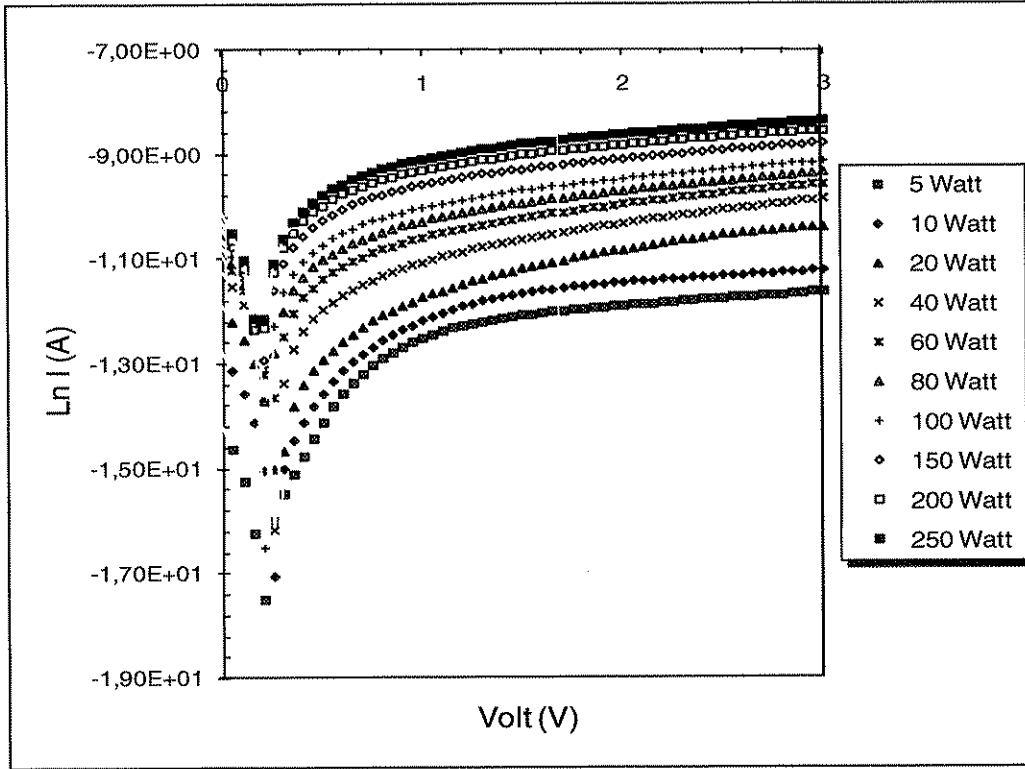
P (Watt)	n	$I_0(\text{A})$	$\Phi_B(\text{I-V}) (\text{eV})$
5	2,07	2,22E-9	0,35
10	2,32	2,77E-9	0,35
20	2,99	1,72E-8	0,30
40	3,02	4,2E-8	0,28
60	3,37	1,29E-7	0,25
80	3,70	3,36E-7	0,22
100	4,49	8,46E-7	0,20
150	4,52	1,58E-6	0,18
200	4,92	2,62E-6	0,17
250	5,06	3,4E-6	0,16



Şekil 4.20. Au/n-CdTe yapının koyu kırmızı filtre ($300 \text{ nm} < \lambda < 400 \text{ nm}$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım-gerilim karakteristikleri

Çizelge 4.4. Diyodun koyu kırmızı filtre ($300 \text{ nm} < \lambda < 400 \text{ nm}$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım-voltaj karakteristiğinden elde edilen; idealite faktörü, doyum akımı, potansiyel engel yüksekliği

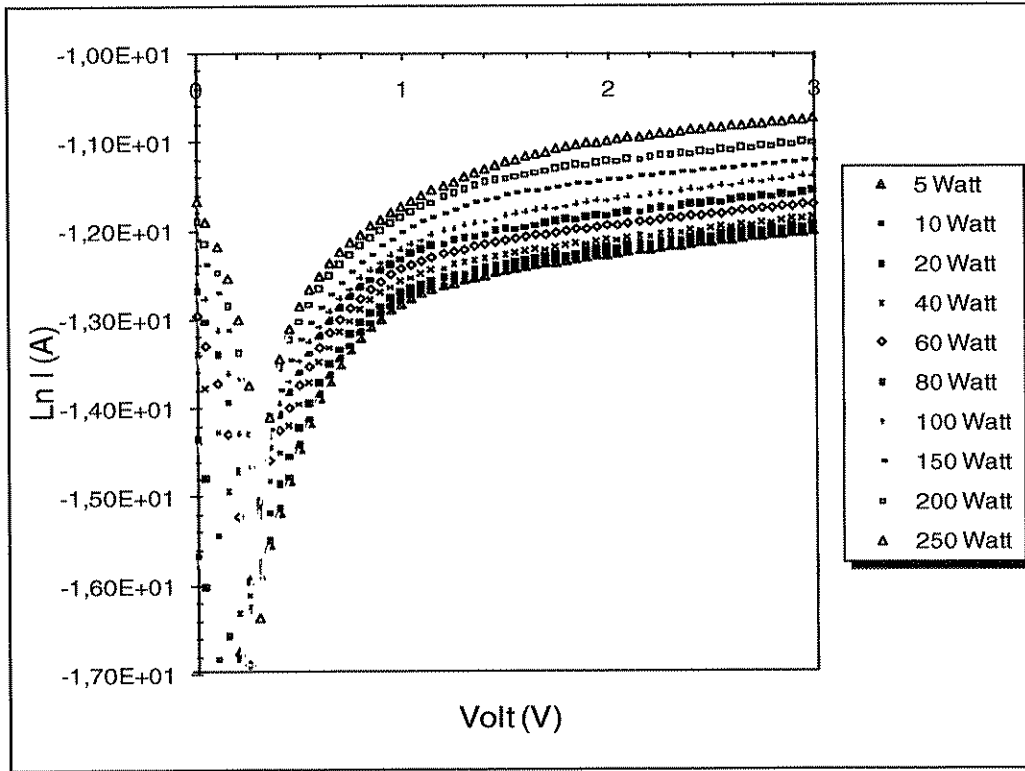
P (Watt)	n	$I_0(\text{A})$	$\Phi_B(\text{I-V}) (\text{eV})$
5	1,86	3,39E-9	0,34
10	2,48	5,24E-9	0,33
20	2,55	4,54E-9	0,33
40	2,98	6,06E-9	0,33
60	3,76	1,76E-8	0,30
80	3,89	2,02E-8	0,29
100	4,14	2,53E-8	0,29
150	4,51	4,1E-8	0,28
200	4,99	5,73E-8	0,27
250	5,31	6,78E-8	0,26



Şekil 4.21. Au/n-CdTe yapının sarı filtre ($400 \text{ nm} < \lambda$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım-voltaj karakteristikleri

Çizelge 4.5. Diyodun sarı filtre ($400 \text{ nm} < \lambda$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım-voltaj karakteristiğinden elde edilen; idealite faktörü, doyum akımı, potansiyel engel yüksekliği

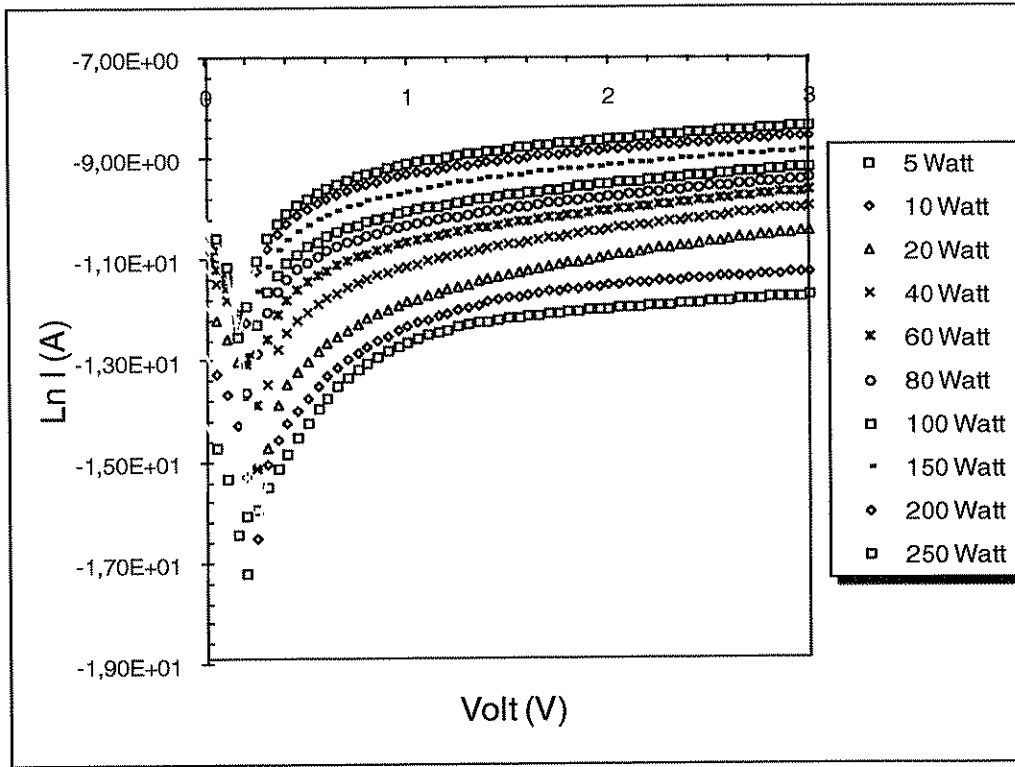
P (Watt)	n	$I_0(\text{A})$	$\Phi_B(\text{I-V}) (\text{eV})$
5	1,94	1,5E-9	0,36
10	2,06	1,49E-9	0,36
20	3,04	1,88E-8	0,30
40	3,98	1,47E-7	0,24
60	5,20	6,05E-7	0,21
80	6,00	1,27E-6	0,19
100	6,59	2,11E-6	0,17
150	7,26	4,1E-6	0,16
200	7,52	5,81E-6	0,15
250	8,38	8,11E-6	0,14



Şekil 4.22. Au/n-CdTe yapının siyah filtre ($800 \text{ nm} < \lambda$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım-voltaj karakteristikleri

Çizelge 4.6. Diyodun siyah filtre ($800 \text{ nm} < \lambda$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım-voltaj karakteristiğinden elde edilen; idealite faktörü, doyum akımı, potansiyel engel yüksekliği

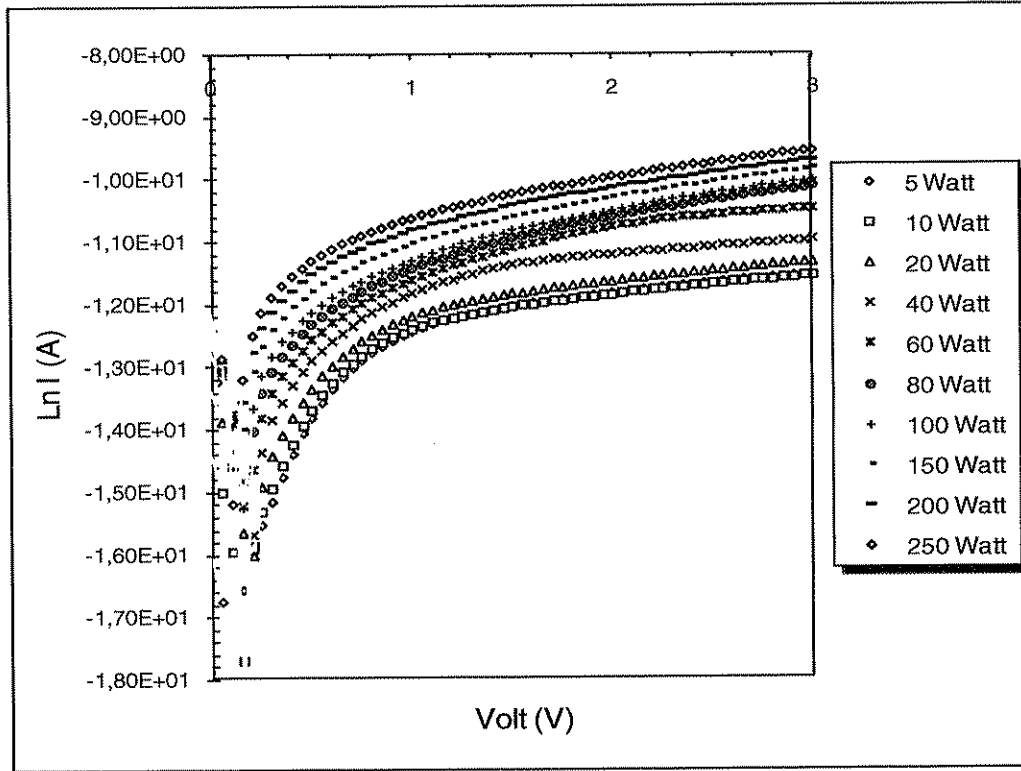
P (Watt)	n	I_0 (A)	$\Phi_B(I-V)$ (eV)
5	1,25	6,79E-10	0,38
10	2,22	1,68E-9	0,36
20	2,43	3,93E-9	0,34
40	2,99	8,39E-9	0,32
60	3,48	1,07E-8	0,31
80	3,95	2,66E-8	0,29
100	4,12	3,06E-8	0,28
150	4,95	6,65E-8	0,26
200	5,55	1,05E-7	0,25
250	6,55	1,89E-7	0,24



Şekil 4.23. Au/n-CdTe yapının turuncu filtre ($700 \text{ nm} < \lambda$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım-voltaj karakteristikleri

Çizelge 4.7. Diyodun turuncu filtre ($700 \text{ nm} < \lambda$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım-voltaj karakteristiğinden elde edilen; idealite faktörü, doyum akımı, potansiyel engel yüksekliği

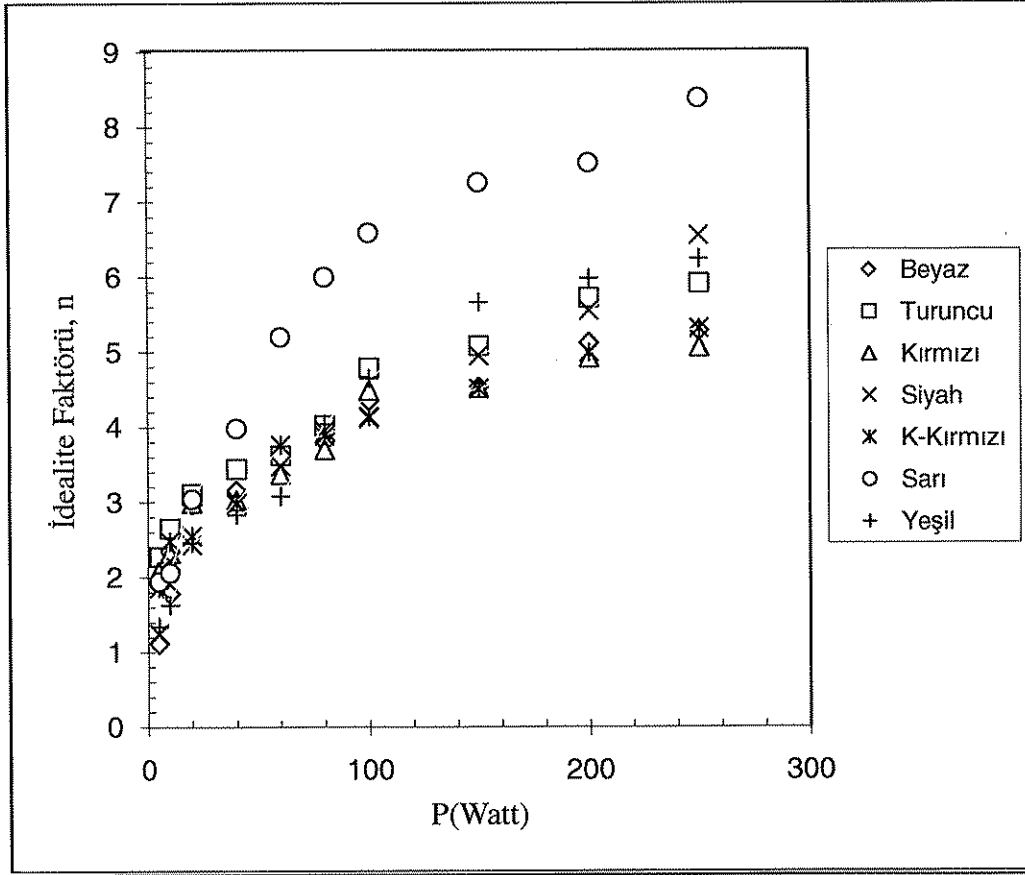
P (Watt)	n	$I_0(\text{A})$	$\Phi_B(\text{I-V}) (\text{eV})$
5	2,27	3,11E-9	0,34
10	2,65	5,27E-9	0,33
20	3,11	2,02E-8	0,29
40	3,44	5,94E-8	0,27
60	3,62	1,76E-7	0,24
80	4,02	3,96E-7	0,22
100	4,79	1,05E-6	0,19
150	5,08	1,59E-6	0,18
200	5,72	2,92E-6	0,17
250	5,91	3,88E-6	0,16



Şekil 4.24. Au/n-CdTe yapının yeşil filtre ($400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım-voltaj karakteristikleri

Çizelge 4.8. Diyodun yeşil filtre ($400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$) için farklı ışık kaynağı güçlerinde akım-voltaj karakteristiğinden elde edilen; idealite faktörü, doyum akımı, potansiyel engel yüksekliği

P (Watt)	n	$I_0(\text{A})$	$\Phi_B(I-V) (\text{eV})$
5	1,34	4,86E-10	0,39
10	1,63	7,28E-10	0,38
20	2,46	5,37E-9	0,33
40	2,83	1,35E-8	0,30
60	3,08	3,75E-8	0,28
80	4,04	1,23E-7	0,25
100	4,65	2,3E-7	0,23
150	5,66	5,53E-7	0,21
200	5,98	8,15E-7	0,20
250	6,24	1,1E-6	0,19

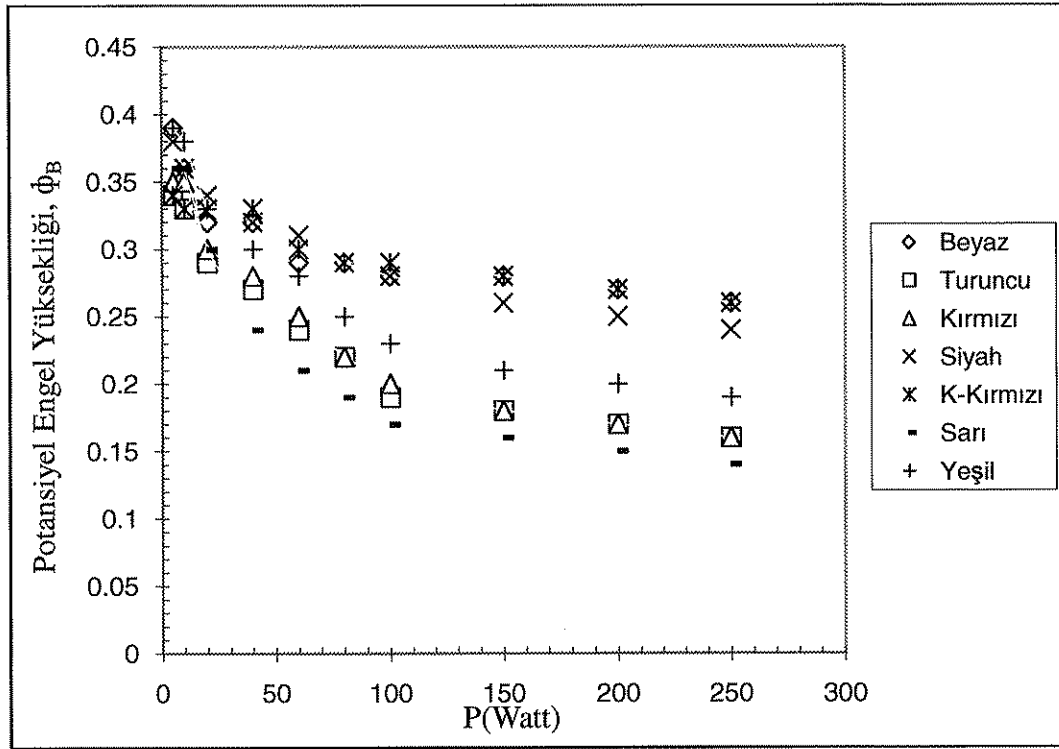


Şekil 4.25. Oda sıcaklığında farklı dalga boylarına sahip tüm filtreler için idealite faktörü(n)-ışık kaynağı çıkış gücü karakteristikleri

Şekil 4.25’de görüldüğü gibi farklı dalga boylarına sahip filtreler için çıkış gücünün artmasıyla idealite faktörünün arttığı gözlenmektedir. En etkin idealite faktörünün arttığı sarı filtrede gözlenmiştir.

Çizelge 4.9. Farklı dalga boylarına sahip tüm filtrelerde ki voltajlara göre idealite faktörleri

P (Watt)	Beyaz Filtre	Turuncu Filtre	Kırmızı Filtre	Siyah Filtre	K.Kırmızı Filtre	Sarı Filtre	Yeşil Filtre
5	1,11	2,27	2,07	1,25	1,86	1,94	1,34
10	1,78	2,65	2,32	2,22	2,48	2,06	1,63
20	2,97	3,11	2,99	2,43	2,55	3,04	2,46
40	3,15	3,44	3,02	2,99	2,98	3,98	2,83
60	3,58	3,62	3,37	3,48	3,76	5,2	3,08
80	3,81	4,02	3,7	3,95	3,89	6	4,04
100	4,35	4,79	4,49	4,12	4,14	6,59	4,65
150	4,53	5,08	4,52	4,95	4,51	7,26	5,66
200	5,12	5,72	4,92	5,55	4,99	7,52	5,98
250	5,28	5,91	5,06	6,55	5,31	8,38	6,24



Şekil 4.26. Farklı dalga boylarına sahip tüm filtreler için potansiyel engel yüksekliği-ışık kaynağı çıkış gücü karakteristikleri

Şekil 4.26'da görüldüğü gibi farklı dalga boylarına sahip filtreler için voltaj değerinin artmasıyla potansiyel engel yüksekliğinin azaldığı gözlenmektedir. Şekil 4.25'deki grafikte sarı filtre için en yüksek idealite faktörü olmasının buna bağlı olarak en düşük potansiyel engel yüksekliğine sahip olacağını bildirmektedir.

Çizelge 4.10. Farklı dalga boylarına sahip tüm filtrelerdeki ışık kaynağının çıkış güçlerine bağlı potansiyel engel yükseklikleri

P (Watt)	Beyaz Filtre	Turuncu Filtre	Kırmızı Filtre	Siyah Filtre	K.Kırmızı Filtre	Sarı Filtre	Yeşil Filtre
5	0,39	0,34	0,35	0,38	0,34	0,36	0,39
10	0,36	0,33	0,35	0,36	0,33	0,36	0,38
20	0,32	0,29	0,3	0,34	0,33	0,3	0,33
40	0,32	0,27	0,28	0,32	0,33	0,24	0,3
60	0,29	0,24	0,25	0,31	0,3	0,21	0,28
80	0,29	0,22	0,22	0,29	0,29	0,19	0,25
100	0,28	0,19	0,2	0,28	0,29	0,17	0,23
150	0,28	0,18	0,18	0,26	0,28	0,16	0,21
200	0,27	0,17	0,17	0,25	0,27	0,15	0,2
250	0,26	0,16	0,16	0,24	0,26	0,14	0,19

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, yüksek dirençli n-CdTe yarıiletken kristaller kullanılarak Au/n-CdTe yapılar hazırlandı. Hazırlanan bu yapıların 150-350 K sıcaklık aralığında karanlıkta akım-voltaj (I-V) ölçümleri yapıldı. Bu ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak Au/n-CdTe yapısının LnI-V eğrileri çizildi (Şekil 4.1). Bu eğriler incelendiğinde, oluşan yapının diyot özelliği gösterdiği görüldü. Şekil 4.1'deki eğrilere bakıldığında düşük voltaj bölgelerinde akım değerlerinde bazı saçılmalar gözlenmektedir. Burada kullanılan n-CdTe yarıiletken kristalin direncinin büyük olmasının bu saçılmalara sebep olacağı düşünülmektedir. Özellikle 150 K civarında ve daha düşük sıcaklıklarda oluşan yeniden birleşme akımlarının bu düşük voltaj bölgesinde etkin olduğu söylenilebilir. Bu nedenle 80 K'e kadar ölçümler yapılmış olmasına rağmen I-V karakteristikleri oldukça kötü olduğu için burada verilmedi. Şekil 4.1'de görülen düşük voltaj bölgesindeki eğimlerden diyodu idealite faktörü n , doyma akımı I_0 , Schottky engel yüksekliği Φ_B (I-V) hesaplandı. Çizelge 4.1'e bakıldığında idealite faktörünün 300 K'de 2,49 olduğu görülmektedir. Bu değer ideal bir diyotun idealite faktörü değerinden oldukça büyüktür. Bu, kristalin yüzeyindeki oksit tabakasının kaldırılmaması ve kristalin yüksek direncinin bulunmasına bağlanabilir. İdealite faktörünün sıcaklığın artmasıyla düştüğü görüldü. Çizelge 4.1'deki engel yüksekliğinin sıcaklıkla durumu incelendiğinde engel yüksekliğinin sıcaklığın yükselmesiyle arttığı görülmektedir. Bu durum termiyonik emisyon akım iletim modelinin burada tam olarak geçerli olmadığını göstermektedir. Buna ilaveten Şekil 4.1'de görüldüğü gibi 150-350 K sıcaklık aralığında LnI-V eğrilerinin eğimleri sabit değildir. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi n değeri sıcaklıkla ters orantılı olarak değişmektedir. n değerinin düşük sıcaklıklarda yüksek çıkması muhtemelen yalıtkan tabakadaki potansiyel düşmesindendir. Çünkü yeniden birleşme akımının bir kısmı arayüzey durumları ile iletme katkıda bulunabilir. İdealite faktörünün bu şekilde çıkmasının nedeni olarak, arayüzey durumlarının özel bir dağılımı olduğu gösterilebilir. Dolayısıyla idealite faktörünün 1'den çok büyük olması ise arayüzey durumları ve arayüzeydeki elektrik alanından dolayı Schottky engelindeki düşme ile uzay yük bölgesinde çoğalma-yeniden birleşme akımlarından meydana gelmesi düşünülebilir. Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi I_0 -T grafiği çizgisel çıkmıştır.

Şekil 4.4’de görülen $\text{LnI}_0\text{-1000/nT}$ eğrisi çizgisel değilken, Şekil 4.5’de görülen nT-T eğrisi çizgisel çıkmıştır. Böylece akım-iletim mekanizmasında TAE etkili değildir. Öte yandan, oluşturulan yapıların akım-iletim mekanizmasında Alan Emisyonu (AE) etkili değildir çünkü kullanılan CdTe kristali yüksek katkılı değildir.

Hazırlanan Au/n-CdTe yapının, ışık kaynağından çıkan farklı ışık güçleri için yedi farklı dalga boyuna sahip ışık filtreleri kullanılarak oda sıcaklığında akım-voltaj ölçümleri yapıldı. Filtreler renklerine göre isimlendirildi ve bu filtreler dalga boyları beyaz filtre ($300\text{ nm} < \lambda < 900\text{ nm}$), kırmızı filtre ($600\text{ nm} < \lambda$), koyu kırmızı filtre ($300\text{ nm} < \lambda < 400\text{ nm}$), sarı filtre ($400\text{ nm} < \lambda$), siyah filtre ($800\text{ nm} < \lambda$), turuncu filtre ($700\text{ nm} < \lambda$), yeşil filtre ($400\text{ nm} < \lambda < 700\text{ nm}$) sahiptir. Oda sıcaklığında elde edilen verilerden, 5 wattan-250 watta kadar 10 farklı çıkış gücünde, bütün filtreler için akım-voltaj grafikleri çizildi. Şekil 4.8’de görüldüğü üzere en düşük çıkış gücü (5 watt) için bütün filtrelerin hemen hemen aynı akım-voltaj eğrisine sahip olduğu gözlenmektedir. Burada sadece siyah filtre için akımın diğerlerine oranla daha düşük olduğu sonuç vermiştir. Siyah filtrenin dalga boyuna bakıldığında ise 800 nm dalga boylarının üzerindeki dalga boylarını geçirerek yani merkez frekansın aşağısındaki frekanslar geri çevirir ve bunun üzerindeki frekansları geçirir. Neticede yukarı geçiş (high-pass) durumlarına duyarlı olmadığı gözlenmektedir. Çıkış gücünü 10 watt’a arttırdığımızda Şekil 4.9’da görüldüğü üzere filtreler arasındaki farklılıklar anlaşılmaktadır. Bu farklılık dalga boylarına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu grafikte yine siyah filtrenin akımı en düşük daha sonra diğerlerinden ayrılan üç filtre ise beyaz, koyu kırmızı ve yeşil filtreler olmuştur. Bu filtreler incelendiğinde ise Au/n-CdTe yapının düşük dalga boylarında yani 300 nm-400 nm aralığı ve yüksek dalga boylarına 800 nm üzeri fazlasıyla duyarlı olmadığı gözlenmektedir. Fakat çıkış güçlerinin artmasıyla doğru orantılı olarak belli bir voltaja kadar akımın arttığı gözlenmektedir. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’deki grafikler hemen hemen Şekil 4.9’daki gibidir. Fakat Şekil 4.12’de görüldüğü üzere artık yeşil filtrenin beyaz, siyah ve koyu kırmızı filtrelerden ayrılarak akımın daha çok artmış olduğu gözlenilir. Bu durum 250 watt’a kadar devam etmektedir (Şekil 4.13-Şekil 4.17). Aynı numunelerin her bir filtre için farklı ışık güçlerindeki akım-voltaj ölçümleri yapılarak grafikleri; beyaz filtre ($300\text{ nm} < \lambda < 900\text{ nm}$) için Şekil 4.18, kırmızı filtre ($600\text{ nm} < \lambda$) için Şekil 4.19,

koyu kırmızı filtre ($300 \text{ nm} < \lambda < 400 \text{ nm}$) için Şekil 4.20, sarı filtre ($400 \text{ nm} < \lambda$) için Şekil 4.21, siyah filtre ($800 \text{ nm} < \lambda$) için Şekil 4.22, turuncu filtre ($700 \text{ nm} < \lambda$) için Şekil 4.23, yeşil filtre ($400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$) için Şekil 4.24 ile verildi. Buradan yola çıkılarak her bir filtre için idealite faktörü n , doyma akımı I_0 ve Schottky potansiyel engel yükseklikleri $\Phi_B(I-V)$ (eV) hesaplanarak çizelgeler halinde verildi (Çizelge 4.2-Çizelge 4.8). Çıkış güçlerinin artmasıyla idealite faktörünün ideallikten uzaklaştığı ve buna bağlı olarak potansiyel engel yüksekliğinin de azaldığı gözlenmiştir. Şöyle ki $300 \text{ nm} < \lambda < 400 \text{ nm}$ ve $400 \text{ nm} < \lambda < 900 \text{ nm}$ aralığındaki dalga boylarını geçiren filtrelerde idealite faktörünün 1'e yakın olduğu potansiyel engel yüksekliğinin de arttığı gözlenilmektedir. Dolayısıyla bu dalga boyları aralığı dışında $700 \text{ nm} < \lambda$ üzerindeki dalga boylarında ise idealite faktörünün arttığı, potansiyel engel yüksekliğinin azaldığı gözlenilmektedir.

Bu numune için Şekil 4.25'de oda sıcaklığında farklı dalga boylarına sahip tüm filtreler için idealite faktörü-ışık kaynağı çıkış gücü grafiği çizildi. Şekilde görüldüğü gibi farklı dalga boylarına sahip filtreler için voltaj değerinin artmasıyla idealite faktörünün arttığı gözlenmektedir. En fazla idealite faktöründeki artış sarı filtrede gözlenmektedir. En ideal filtrenin ise beyaz filtre ve çıkış gücü düşük durumda idealite faktörünün 1'e yakın olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak Şekil 4.26'de görüldüğü üzere farklı dalga boylarına sahip tüm filtreler için potansiyel engel yüksekliği-ışık kaynağı çıkış gücü grafiği çizildi. Bu grafik incelendiğinde farklı dalga boylarına sahip filtreler için çıkış gücünün artmasıyla potansiyel engel yüksekliğinin azaldığı gözlenmektedir. Şekil 4.25'deki grafikte sarı filtre için en yüksek idealite faktörü olmasının buna bağlı olarak en düşük potansiyel engel yüksekliğine sahip olacağını göstermektedir. Bunlarda Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10' de verildi.

Bu deneysel tez çalışmasında, yüksek dirençli n-tipi CdTe yarıiletken kristaller kullanılarak Au/n-CdTe yapılar hazırlandı ve bu yapıların oda sıcaklığında akım-voltaj karakteristikleri belirlendi. Hazırlanan yapıların diyot özelliği gösterdiği ve farklı ışık dalga boyları için akım yönünden farklı tepkimeler gösterdiği görülmüştür. En fazla akım değişimi sarı filtrede gözlenmiştir. Aynı şekilde ışık kaynağı

cihazından çıkış gücüne bağlı karakteristikler incelendiğinde yine bu yapının farklı akım tepkimeleri verdiği görülmüştür. Yapılan hesaplamalarda idealite faktörü ve Schottky engel yüksekliğinin ışığın çıkış gücüne ve ışığın dalga boyuna bağlı olarak bir miktar değiştiği görülmüştür. Bu çalışma n-tipi CdTe'in sarı ışığa daha duyarlı olduğunu ortaya çıkarmıştır ve dolayısıyla bu yarıiletkenin 400 nm üzerindeki dalga boylarındaki ışık için bir sensör olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Bu çalışmanın ileri aşamasında sıcaklığa bağlı olarak farklı filtrelerin kullanımıyla yapının parametreleri incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Sharma, B.L., "Metal Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications", *Plenum Press*, New York and London, 176 (1975).
2. Rhoderick, E.M., Williams, R.H., "Current-Transport Mechanisms, Metal-Semiconductors Contacts, 2nd ed.", *Clerandon*, Oxford, 55 (1970).
3. Sze, S.M., "Metal-Semiconductor Contacts, Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed.", *Wiley*, New York, 225 (1981).
4. Sing, A., Reinhardt, K.C., Anderson, W.A., "Temperature Dependence of Electrical Characteristics of Yb/p-InP Tunnel Metal-Insulator-Semiconductor Junctions", *J. Appl. Phys.*, 68: 3475-3483 (1990).
5. Shuer M., "Physics of Semiconductor Devices", *Prentice-Hall, Int, Inc.*, New Jersey, 2: 194-225 (1990).
6. Kar, S., Ashok, S., Fonash, S., "Evidence of Tunnel-Assisted Transport in Nondegenerate MOS and Semiconductor-Oxide-Semiconductor Diodes at Room Temperature", *J. Appl. Phys.*, 51: 3417-3421 (1980).
7. Kar, S., Panchal, K.M. Brattacharya, S., Varma, S., "On The Mechanism of Carrier Transport In Metal-Thin-Oxide-Semiconductor Diodes On Polycrystalline Silicon", *IEEE Trans. On Electron. Devices*, 29: 1839-1845 (1982).
8. Cova, P., Singh, A., "Temperature Dependence of I-V and C-V Characteristics of Ni/n-CdF₂ Schottky Barrier Type Diodes", *Solid State Electron.*, 33: 11 (1990).
9. Padovani, F.A., Stratton, R., "Field and Thermionic-Field Emission in Schottky Barriers", *Solid State Electron.*, 9: 695-707 (1966).
10. Padovani, F.A., "The Voltage-Current Characteristic of Metal Semiconductor Contacts, in Semiconductors and Semimetals", *Academic Press*, New York, 75-146 (1971).
11. Saxena, A.N., "Forward Current-Voltage Characteristic of Schottky Barriers On Type Silicon", *Surface Science*, 13: 151-171 (1969).
12. Card, H.C., Rhoderick, E.H., "Studies of Tunnel MOS diodes I. Interface Effects in Silicon Schottky Diodes", *J. Phys. D: Appl.*, 4 (1971).
13. Fonash, S.J., "A Reevaluation of the Meaning of Capacitance Plots for Schottky Barrier-Type diodes", *J. Appl. Phys.*, 54: 1966 (1975).

14. Hudait, K.M., Krupanidhi S.B., "Effects of thin oxide in metal-semiconductor and metal-insulator-semiconductor epi-GaAs Schottky diodes", *Solid State Electronics*, 44: 1089-1097 (2000).
15. Biber, M., Çakar, M., Türüt, A., "The effect of anodic oxide treatment on n-GaP Schottky barrier diodes", *J. of Materials Science: Materials Electronics*, 12: 575-579 (2001).
16. Nelson, J., "Photons in, electrons out: The photovoltaic effect", *The Physics of Solar Cells*, 1-16 (2003).
17. Anthondy, T.C., Fahrenburk, A.L., Peters, M.C., Bube, R.H., "Electrical properties of CdTe films and junctions", *J. Appl. Phys*, 57 (1985).
18. Dharmadasa, I.M., Roberts, G.G., Petty, M.C., "Electrical properties of Au/n-CdTe Schottky diodes", *J. Phys. D. Appl. Phys*, 15: 901-910 (1982).
19. Gumus, A., Turut, A., Yalcin, N., "Temperature dependent barrier characteristics of CrNiCo alloy Schottky contacts on n-type molecular-beam epitaxy GaAs", *J. Appl. Phys*, 91(1): 245-250 (2002).
20. Mathew, X., "Opto-electronic properties of an Au/CdTe device", *Semicond. Sci. Technol*, 18: 1-6 (2003).
21. Nixon, J.A., Davies, J.H., "Modal Analysis of transport through quantum point contacts using realistic potentials", *Phys. Rev. B*, 44: 1150 - 1153 (1991).
22. Mathew, X., Sebastian, P.J., Sanchez, A., Campos, J., "Structural and opto-electronic properties of electrodeposited CdTe on stainless steel foil", *Solar Energy Mater Solar Cells*, 59: 99-114 (1999).
23. Mathew, X., Enrique, J.P., Sebastian, P.J., Pattabi, M., Sanchez-Juarez, A., Campos, J., McClure, J.C., Singh, V.P., "Charge transport mechanism in typical Au/CdTe Schottky diode", *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 63: 355-365 (2000).
24. Sullivan, J.P., Tung, R.T., Pinto, M.R., Graham, W.R., "Electron transport of inhomogeneous Shottky barriers", *J. Apply. Phys.*, 70: 7403-7424 (1991).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BALCI, Nergiz
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 19.07.1981 Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (312) 364 97 12
e-mail : nergizbalci@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyettarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Fizik Bölümü	2005
Lise	Abidinpaşa Lisesi	1998

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2007-2008	Garanti Bankası	Satış Yetkilisi
2005-2007	Gazi Üniversitesi	Öğrenci Asistanı
2004-2005	Mehmet Tunç Fen Dersanesi	Fizik Öğretmeni

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Müzik, Fotoğraf, İnternet, Belgesel.