



GİRESUN
ÜNİVERSİTESİ



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LASER BOYASI KULLANILARAK OLUŞTURULMUŞ
SCHOTTKY YAPILARIN KAPASİTE VOLTAJ
SPEKTROSKOPİSİ**

**FİZİK
ANA BİLİM DALI
Yüksek Lisans Tezi
Ayfun TÖREN
20132101010
Haziran 2019**

GİRESUN

**T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**LASER BOYASI KULLANILARAK OLUŞTURULMUŞ
SCHOTTKY YAPILARIN KAPASİTE VOLTAJ
SPEKTROSKOPİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ayfun TÖREN**

**Enstitü Ana Bilim Dalı : FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANA BİLİM DALI**
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Behzad BARIŞ

Haziran 2019

T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LASER BOYASI KULLANILARAK
OLUŞTURULMUŞ SCHOTTKY YAPILARIN
KAPASİTE VOLTAJ SPEKTROSKOPİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayfun TÖREN

Enstitü Anabilim Dalı : Fen Bilimleri Enstitüsü

Bu tez 25/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Akil Birhan
SELÇUK


.....
Jüri Başkanı

Prof. Dr. Serdar
KARADENİZ

.....
Üye

Doç. Dr. Behzad
BARIŞ

.....
Üye

Doç. Dr. Bahadır KOZ

.....
Enstitü Müdürü

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Ayfun TÖREN
25/06/2019



TEŐEKKÖRLER

Bu çalıőmamın bütün aőamalarında her türlü yardımı ve desteği esirgemeyen ilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli hocam Sn. Doç. Dr. Behzad BARIŞ 'a teőekkürlerimi sunuyorum.

Manevi desteklerini her zaman üzerimde hissettiğim aileme ve özellikle kardeőim Ayla TÖREN 'e teőekkürlerimi sunuyorum.



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜRLER	I
İÇİNDEKİLER	II
SİMGE VE KISALTMALAR LİSTESİ	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	XI
ÖZET	XII
SUMMARY	XIII
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Yarıiletkenler	3
2.2. Katkılı Yarıiletkenler	4
2.2.1. <i>n</i> -tipi Yarıiletkenler	4
2.2.2. <i>p</i> -tipi Yarıiletkenler	6
2.3. Metal/Yarıiletken (Schottky) Kontaklar	8
2.3.1. Metal/ <i>n</i> -tipi Yarıiletken (MS) Kontaklar	10
2.3.2. Metal/ <i>p</i> -tipi Yarıiletken Kontaklar	14
2.4. Organik Yarıiletkenler	17
2.5. Akım İletim Mekanizmaları	21
2.6. Metal/Yarıiletken Schottky Diyotlarında Akım İletimi	21
2.6.1. Termoyonik Emisyon Teorisi	21
2.6.2. Difüzyon Teorisi	25
2.7. Schottky Diyotlar	26
2.8. Metal Yarıiletken Schottky Diyotlarında Schottky Kapasitesi	27
2.9. MIS (Metal Insulator Semiconductor) Yapılar	31

2.10. MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) Yapılar	35
2.11. Aygıt Karakterizasyonu	36
2.11.1. Kapasitans-Gerilim (C-V) Karakteristikleri.....	37
2.12. Düşük ve Yüksek Frekans Kapasitans Yöntemi ile Arayüzey Durumlarının Bulunması	39
2.13. Maser-Laser.....	41
2.13.1. Laserin Elde Edilişi.....	41
2.13.2. Boya Lazerlerinin Özellikleri.....	43
2.14. Coronene	44
BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM	46
3.1. Yapıların Hazırlanması	46
3.2. Kristal Temizleme İşlemi.....	46
3.3. Al/Coronene / <i>n</i> -Si Yapılarının Oluşturulması	47
3.4. Kullanılan Ölçüm Cihazları ve Düzenekleri.....	51
BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR	52
4.1. Kapasite-Gerilim (C-V) Karakteristikleri	52
BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	59
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	64

SİMGE VE KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

S	Silisyum
E	Metalden elektron sökmek için gerekli enerji
E_g	Değerlik enerji seviyesi
E_d	İzin verilmiş enerji düzeyi
h	Planck Sabiti
E_C	İletkenlik Bant Enerjisi
E_V	Değerlik Bant Enerjisi
Φ_m	Metalin İş Fonksiyonu
I	Taşıyıcıların Oluşturduğu Toplam Akım
Φ_S	Yarıiletkenin İş Fonksiyonu
χ_S	Yarıiletkenin Elektron Yakınlığı
V_d	Difüzyon Potansiyeli
V_F	Düz Beslem
V_R	Ters Beslem
J_{sm}	Elektronların yarıiletkenden metale doğru oluşturduğu akım yoğunluğu
V_X	Elektronların Hızı
Φ_B	Engel Yüksekliği
m^*	Etkin Kütle
A^*	Richardson Sabiti
J_n	Doyma Akım Yoğunluğu

$n(x)$	Elektron Yoğunluğu
μ	Elektron Mobilitesi
D_n	Elektron Difüzyon Sabiti
$E(x)$	Schottky bölgesindeki Elektrik Akımı
N_D	Verici (Donör) Atomlarının Yoğunluğu
N_A	Alıcı (Akseptör) Atomlarının Yoğunluğu
$q\Phi(x)$	Yarım-Fermi Seviyesi
J_o	Akım Yoğunluğu
J_{SD}	Doyma Akımı
n	İdeallik Faktörü
ϵ_s	Yarıiletkenin Dielektrik Sabiti
ϵ_0	Boşluğun Dielektrik Sabiti
$\phi(x)$	Potansiyel Enerji
$\Delta\Phi_B$	Schottky Alçalması
N_{ss}	Arayüzey Durumları
N_{sa}	Metal ile dengede olan arayüzey yük yoğunluğu
N_{sb}	Yarıiletkenle dengede olan arayüzey yük yoğunluğu
N_c	İletkenlik bandındaki etkin durumların yoğunluğu
ϵ_i	Yalıtkan Dielektrik Sabiti
δ	Arayüzey Tabakasının Kalınlığı
W_D	Tüketme Bölgesinin Genişliği
$q\Phi_0$	Yüzey Enerjisi Fermi Seviyesi
E_F	Fermi Enerji Seviyesi

$q\Phi_{B0}$	Sıfır Beslem Engel Yüksekliği
Q_m	Metal üzerindeki yüzey yükü
Q_{ss}	Yarıiletken üzerindeki yüzey yükü
Q_{sc}	Yarıiletkenin tüketme tabakasındaki uzay yükü
I_0	Doyma Akımı
C_{HF}	Yüksek Frekans Kapasitesi
C_{LF}	Düşük Frekans Kapasitesi
C_{OX}	Oksit Kapasitesi
C_2	Taşıyıcı yoğunluğuna bağlı parametre
ϵ_{ox}	Oksit Tabakasının Dielektrik Sabiti
d_{ox}	Oksit Tabakası Kalınlığı
ac	Alternatif Sinyal
Ψ_s	Yüzey Potansiyeli
E_m	Maksimum Elektrik Alan
Φ_e	Etkin Engel Yüksekliği
d	Yalıtkan Tabaka Kalınlığı

KISALTMALAR

SBD	Schottky Engel Diyot
LED	Işık Yayan Diyot
OLED	Işık Yayan Organik Diyot
HOMO	Düşük Enerjili Bağ Yapmış Molekül Orbitaleri
LUMO	Bağ Karşıtı Moleküllerin Oluşturduğu Band
C-V	Kapasite – Gerilim

TE Termoiyonik Emisyon

D Difüzyon



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. (a) Saf, (b) <i>n</i> -tipi, (c) <i>p</i> -tipi yarıiletken için oluşan, safsızlık enerji düzeyleri [9].	4
Şekil 2.2. Arsenik katkı atomunun iyonlaşmasıyla serbest elektronun ortaya çıkışı [5].	5
Şekil 2.3. <i>n</i> -tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramları. (a) Mutlak sıcaklıkta ($T=0K$), (b) Mutlak sıcaklıktan büyük sıcaklıklarda ($T>0K$) [5].	6
Şekil 2.4. İndiyum katkı atomunun iyonlaşmasıyla serbest boşluğun ortaya çıkışı [5].	7
Şekil 2.5. <i>p</i> -tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramları. (a) Mutlak sıcaklıkta ($T=0K$), (b) Mutlak sıcaklıktan büyük sıcaklıklarda ($T>0K$) [10].	8
Şekil 2.6. (a) <i>n</i> -tipi katkılı yarıiletkenlerde Fermi enerji bandı, (b) <i>p</i> -tipi katkılı yarıiletkenlerde Fermi enerji bandı [5].	8
Şekil 2.7. Metalin ve <i>n</i> -tipi yarıiletkenin enerji bant yapısı [11].	10
Şekil 2.8. <i>n</i> -tipi metal/yarıiletken doğrultucu ve omik kontak enerji bant diyagramları. (a) ve (c) ayrı iken nötr durumdadırlar ve kontak sonrası termal dengeye gelmişlerdir, (b) $\Phi_m > \Phi_s$ olması durumunda <i>n</i> -tipi yarıiletkenlerin eklenmesiyle meydana gelen doğrultmanın olduğu ve (d) $\Phi_m < \Phi_s$ olması durumunda <i>n</i> -tipi yarıiletkenlerin eklenmesiyle meydana gelen omik kontakların oluşumudur [11].	11
Şekil 2.9. (a) Doğru besleme ve ters besleme durumu, (b) Metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletken kontak için elektron enerji bant şeması, (c) Termal denge durumu [12].	14
Şekil 2.10. <i>p</i> -tipi metal/yarıiletken doğrultucu ve omik kontak enerji-bant diyagramları: (a) ve (c) ayrı iken nötr durumdadırlar ve kontak sonrası termal dengeye gelmişlerdir, (b) $\Phi_s > \Phi_m$ olması durumunda <i>p</i> -tipi yarıiletkenlerin eklenmesiyle meydana gelen doğrultmanın olduğu ve (d) $\Phi_m > \Phi_s$ olması durumunda <i>p</i> -tipi yarıiletkenlerin eklenmesiyle meydana gelen omik kontakların oluşumu [11].	16
Şekil 2.11. <i>p</i> -tipi metal/yarıiletken doğrultucu kontağın elektron enerji bant diyagramları: (a) düz besleme, (b) ters besleme durumunda [11].	17
Şekil 2.12. En basit konjüge π -elektron sistemi olan eten molekülünün σ ve π bağları (<i>sol</i>) ve π -konjüge molekülün enerji seviyeleri. En düşük elektronik uyarılmaları π -bağ orbital π^* antibağ orbitali arasındadır (<i>sağ</i>) [8].	18

Şekil 2.13. (a) ve (b) σ ve π bağlarında elektron dağılımı ve (c) ve (d) ise anti-bağ σ ve π orbitallerinin yük yoğunluğu dağılımı [8].....	18
Şekil 2.14. HOMO ve LUMO molekül diyagramı [4].....	20
Şekil 2.15. Doğru gerilim altında beş temel iletim prosesi. (1) Termioyonik emisyon, (2) Tünelleme, (3) Rekombinasyon (<i>yeniden birleşme</i>), (4) Elektronların difüzyonu, (5) Deşiklerin (<i>hollerin</i>) difüzyonu. Oda sıcaklığında orta dereceli katkılı ($N_D < 10 \text{ cm}^{-3}$) kristal yarıiletkenlerde hakim olan mekanizma (1), (2) veya (1) ve (2) 'nin kombinasyonudur [15].	21
Şekil 2.16. Doğru beslemede metal/yarıiletken Schottky kontaktın enerji-bant diyagramı [17].	22
Şekil 2.17. $n+nM$ yarıiletken diyot yapısının termal dengede enerji-bant grafiği [19].	27
Şekil 2.18. Metal/ n - tipi yapılarda doğrultucu kontakın; (a) Potansiyel dağılım eğrisi (b) Yük dağılım eğrisi [19].	28
Şekil 2.19. Bir MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) yapının şematik gösterimi [21].	36
Şekil 2.20. n -tipi bir MS kontakın detaylı enerji-bant diyagramı [23].....	37
Şekil 2.21. Farklı enerji düzeylerinden elde edilen Boya Laseri [7].....	42
Şekil 2.22. Organik bir boya molekülünün enerji düzeyleri arasındaki geçişler [7]..	43
Şekil 2.23. Boya laserinin oluşum aşaması [7].	44
Şekil 2.24. Organik yarıiletken Coronene molekülünün yapısı [25].	45
Şekil 3.1. Fosfor katkılı n -tipi Silisyum kristali.....	47
Şekil 3.2. Al/Coronene/ n -Si yapısının oluşturulması sırasında kullanılan "Edwards" marka evaporasyon sistemi [26].	48
Şekil 3.3. VTC- 100 Vacuum Spin Coater.....	49
Şekil 3.4. Döndürme ile kaplamanın dört aşaması.....	50
Şekil 3.5. Çeyrek Silisyum alt tabaka üzerinde oluşturulan Schottky tabanlı Al/coronene/ n -Si yapılarının görüntüsü.	50
Şekil 3.6. Oluşturulan Schottky Tabanlı Al/Coronene/ n - Si yapılarının şematik diyagramı.....	50
Şekil 4.1. Al/Coronene/ n -Si(100) diyotlarının C-V eğrileri.	53
Şekil 4.2. Al /Coronene/ n -Si(100) seçilmiş bir diyodun C-V eğrisi.	54

Şekil 4.3. Al/Coronene/ <i>n</i> -Si(100) diyot için $1/C^2 - V$ eğrisi.	55
Şekil 4.4. Çeyrek silisyum alttabaka üzerine oluşturulmuş Schottky diyotlarının $1/C^2 - V$ eğrileri.	56
Şekil 4.5. Al/Coronene/ <i>n</i> -Si(100) seçilmiş bir diyodun $1/C^2 - V$ eğrisi.	57



TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. İlk beş polyasen'in ana absorpsiyon piklerinin dalga boylarıyla birlikte molekül yapıları.	19
Tablo 4.1. Al/Coronene/ <i>n</i> -Si(100) diyotlarının $1/C^2 - V$ eğrilerinden elde edilen Φ_B , V_d , N_d , E_m , W_D ve $\Delta\Phi_B$ parametreleri.....	58



LASER BOYASI KULLANILARAK OLUŞTURULMUŞ SCHOTTKY YAPILARIN KAPASİTE VOLTAJ SPEKTROSKOPİSİ

ÖZET

Bu alıőmada Czochralski tekniği ile büyütülmüő, 380µm kalınlığında, (100) düzleminde kesilmiş ve 20Ω-cm özdirence sahip fosfor katkılı *n*-tipi Si yarıiletken kristalleri kullanılmıştır. Bu kristaller değişik kimyasal metotlarla temizlenmiőtir. Temizlenen yarıiletken kristaller üzerine döndürme ile kaplama tekniği kullanılarak coronene ince filmler oluőturulmuőtur. zerinde coronene ince filmler oluşturulmuş yarıiletken kristaller yaklaşık 10⁻⁶ torr bir vakum ortamına alınmıştır. İnce film kaplı yüzeyler üzerine %99,999 saflıkta metaller buharlaştırılarak doğrultucu kontaklar oluőturulmuőtur. Elde edilen Schottky tabanlı metal/organik/yarıiletken yapıların her iki tarafından elektriksel bağlantı alınmak suretiyle karanlık ortamda ve oda sıcaklığında elektriksel karakterizasyon işlemleri yapılmıştır. Karakterizasyon işlemleri olarak kapasite-gerilim (*C-V*) lmleri alınmış, bu ölçümlerden hareketle diyot için engel yüksekliği (Φ_B), difüzyon potansiyeli (V_d), tüketim tabakası genişliği (W_D), Fermi enerji seviyesi (E_F), taőtıyıcı yoğunluğu (N_d), Schottky alçalması ($\Delta\Phi_B$) ve maksimum elektrik alan (E_m) gibi diyot parametreleri tayin edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Schottky diyot, tüketim tabakası genişliği, engel yksekliği.

CAPACITY VOLTAGE SPECTROSCOPY OF SCHOTTKY STRUCTURES MADE BY USING LASER PAINT

SUMMARY

In this study, *n*-type Si (Phosphorus-doped) semiconductor crystals grown with Czochralski technique, cut in a (100) oriented silicon crystal have been used with a thickness of 380 μ m and 20 Ω -cm resistivity. These crystals have been cleaned with different chemical methods. The spin coating technique has been used to deposit coronene thin films on cleaned semiconductor crystals. Semiconductor crystals formed with coronene thin films have been put into the vacuum environment of approximately 10⁻⁶ torr. Metals (99.999%) have been evaporated on thin film coated surfaces to create rectifier contacts. The electrical connections have been made to both sides of Schottky based metal/organic/semiconductor structures and characterization processes have been performed in dark place and at room temperature. Capacity-voltage (*C-V*) measurements have been performed as characterization process. From these measurements the diode parameters have been calculated such as barrier height (Φ_B), diffusion potential (V_d), depletion layer width (W_D), Fermi energy level (E_F), carrier densities (N_d), Schottky lowering ($\Delta\Phi_B$) and maximum electric field (E_m).

Keywords: Schottky diode, depletion layer width, barrier height.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Organik yarıiletkenlerden söz edilmesi yeni değildir. Anthrasen kristallerinin foto iletkenlik ile ilgili olan ilk çalışmaları 20. yüzyılın başlarına dayanır. Organik yarıiletkenlere ilk örnek olarak Anthrasen kristalleri verilebilir. Nancy Üniversitesi'nde 1950'li yılların başlarında A. Benanose ve arkadaşları organik malzemeye yüksek gerilimli alternatif akım uygulandığında ilk defa organik malzemelerdeki elektrolüminesans olayına şahit olmuşlardır. Bu keşif, organik malzemelerde elektrolüminesans olayı ile ilgili ilk keşif olarak tarihe geçmiştir. Elektrolüminesans olayının keşfiyle beraber üzerinde yoğunlaşan çalışmalar moleküler kristallerin 1960'larda birçok bilim adamı tarafından incelenmiştir. Bu çalışmalar, yük taşıyıcı iletim içeren ve optik uyarma gibi temel süreçleri ortaya çıkarmıştır [1].

Konjuge polimerlerinin başarılı sentezi ve kontrollü katkılanması ile 1970'lerde ikinci önemli organik yarıiletken türü elde edilmiştir. 2000 yılında bu alandaki çalışmalarından dolayı Alan G. MacDiarmid, Alan J. Heeger ve Hideki Shirakawa Nobel Kimya ödülüne layık görülmüşlerdir [2].

Elektronik cihazlarda aktif bileşen olarak kullanılan organik iletken polimerlerin keşfiyle birlikte, organik yarıiletkenler son zamanlarda değer kazanmıştır. Organik yarıiletkenler düşük maliyetli, kolay üretilebilmesi, esnek olması gibi özelliklerinden dolayı optoelektronik ve elektronik cihaz üretiminde geniş kullanım alanlarına sahiptirler. Işık yayan diyotlar (LED), ışık yayan organik diyotlar (OLED), mikro elektronik cihazlar, Schottky engelli diyotları (SBD) ve güneş pilleri gibi üretiminde elektriksel, optik ve dielektrik özelliklerinin yeterliliği nedenleriyle kullanılan pek çok polimer vardır. Ayrıca metalle kontak haline getirildiğinde foto-voltatik, elektrolüminesans ve doğrultucu etki gösteren iletken polimerler son zamanlarda elektronik endüstrisinde önemli bir yere sahip olmaya başlamışlardır [3].

Organik yarıiletken malzemeler, ince film elektroniğinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Schottky diyot hazırlayıp, elektronik karakterizasyonu yapmak için son zamanlarda organik yarıiletken ve türevleri kullanılmaktadır. Elektronik malzemelerde aktif bileşenler olarak kullanılabilen organik yarıiletkenler, yukarıda bahsedilen özelliklerinden dolayı, olası avantajlara sahiptir. Bu durum, organik malzemeler ile inorganik malzemelerin yer değiştirmesine yeni bir olanak sağlar. Schottky diyotunun performansını, metal-organik yarıiletken ekleminin elektronik ve elektriksel karakteristikleri belirler. Malzeme uygulamaları için organik yarıiletkenler ve metaller arasındaki ara yüzey elektronik özelliklerinin anlaşılması önemlidir. Organik malzemelerin çoğu, p-tipi elektriksel iletkenliğine sahiptirler. Hava ortamında kararlı, mekanik olarak dayanıklı olan polimerler ticari açıdan büyük önem kazanır. Bu malzemelerin fiyatının ucuz, hazırlanmasının kolay olması ve büyük alanlı numuneler hazırlanabilmesi de bu numuneleri teknolojik açıdan önemli kılmaktadır. Konjuge polimerlerin moleküler yapı içinde farklı gruplarının mevcut olması organik çözücüler içinde çözülebilmesine olanak sağlar. Malzemelerin bu özellikleri de elektrik ve optik özelliklere sahip polimerlerle çalışma imkânı sağlar. Elektriksel ve optiksel özellikleri değiştirebildiğinden dolayı polimerler en çok çalışılan malzemeler arasındadır. Optik ve elektriksel özellikleri kontrollü bir şekilde değiştirilebilir. Organik malzemelerin bir diğer avantajı da basit metotlarla (spin kaplama, sol- jel ,vb.) üretilmeleridir [3].

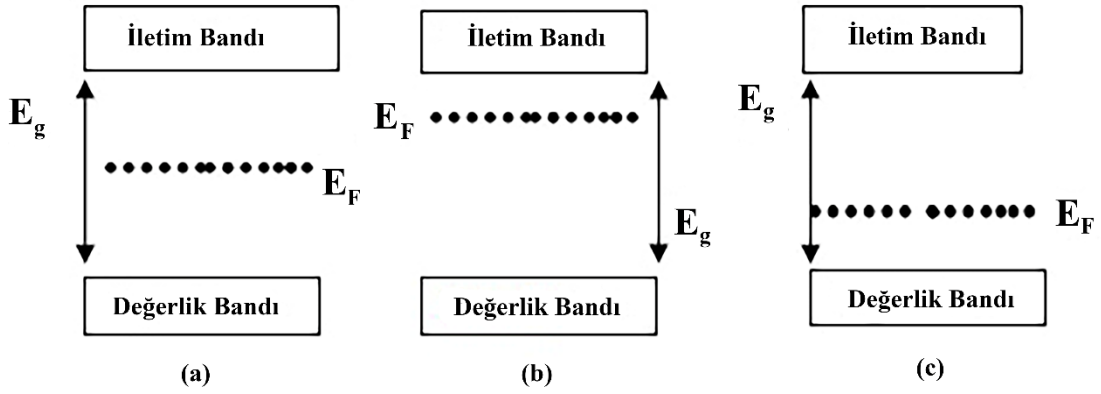
BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Yarıiletkenler

Elektrik iletimlerine göre malzemeler iletkenler (metaller), yarıiletkenler, yalıtkanlar olmak üzere üçe ayrılırlar. Yarıiletkenlerin özdirençleri, içerisine yerleştirilen katkı maddesi, optiksel uyarılma ve sıcaklık ile çok büyük miktarda değiştirilebilir. Elektriksel özelliklerindeki değişiklik ve çeşitlilik, yarıiletkenlerin elektronik cihazların tasarımında çok önemli bir yeri vardır. Safsızlık derecesi büyük olan yarıiletkenlerde, mutlak sıfır sıcaklığında iletkenlik enerji seviyesi tamamen boştur ve değerlik enerji seviyesi (E_g) kadar bir enerji ile ayrılmıştır. Boş iletim bandı ile dolu iletim bandı arasındaki enerji aralığı 4 elektronvolt (eV) 'tan daha küçüktür. Değerlik bandından ısı, ışık ve gerilim uyarılmalarla iletkenlik bandına geçen elektronlar, değerlik enerji seviyesinde elektron boşluğu oluştururlar. Bu deşiklere bir dış manyetik alan ya da elektrik alan uygulandığında artı yük gibi davranış gösterirler. İletim bandındaki elektronların hareketi ve değerlik bandındaki elektron boşluklarının hareketlerinin toplamı bir yarıiletkende elektrik akımı olarak kabul edilir.

Yarıiletkenler, saf olan ve saf olmayan yarıiletkenler olarak iki gruba ayrılırlar. Yük taşıyıcıları olmayan saf yarıiletkenler, mutlak sıfırda yalıtkanlardır. Değerlik bandı tamamıyla dolu durumda, iletkenlik bandı ise boş durumdadır. Sıcaklığın artmasıyla beraber değerlik enerji seviyesindeki elektronların iletim bandına geçişi, yük taşıyıcılarını oluşturur. Şekil 2.1 'de görüldüğü gibi değerlik bandındaki deşik, iletkenlik enerji seviyesindeki elektron yoğunlukları birbirinin aynısıdır.

Saf olmayan yarıiletkenler *p*-tipi ve *n*-tipi olmak üzere ikiye ayrılırlar. Deşik yoğunluğunun elektron yoğunluğundan fazla olduğu yarıiletkenlere *p*-tipi, elektron yoğunluğunun deşik yoğunluğundan fazla olduğu yarıiletkenlere ise *n*-tipi yarıiletkenler denir [9].



Şekil 2.1. (a) Saf, (b) *n*-tipi, (c) *p*-tipi yarıiletken için oluşan, safsızlık enerji düzeyleri [9].

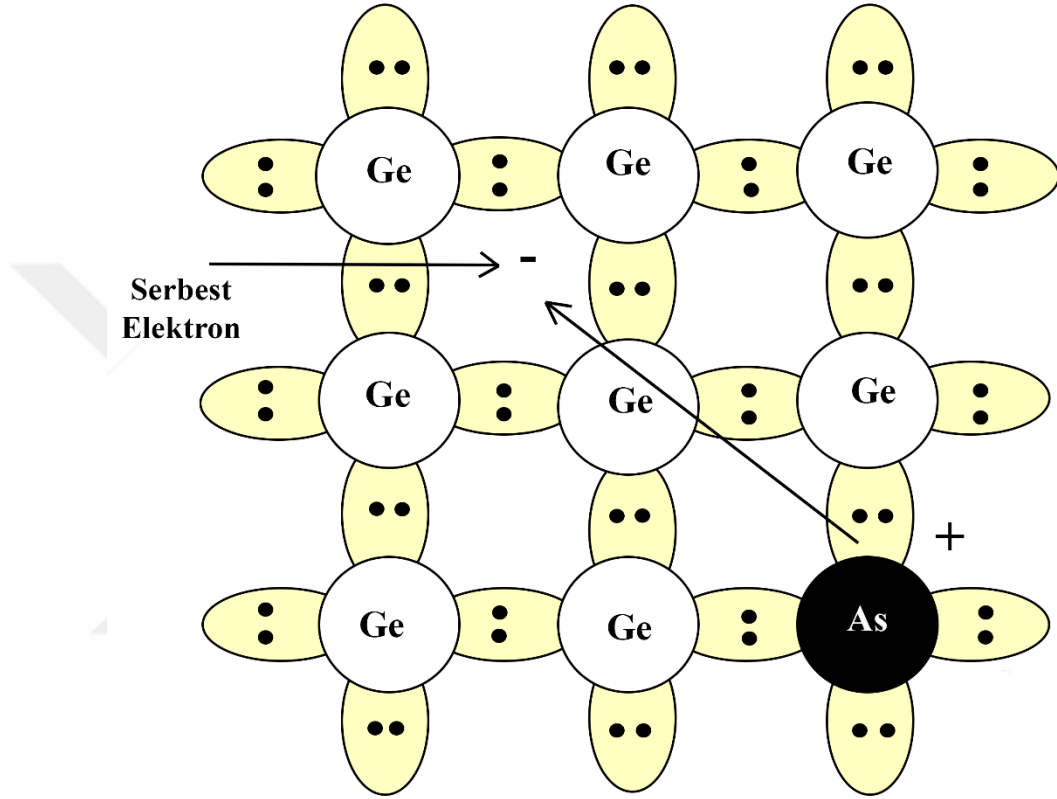
2.2. Katkılı Yarıiletkenler

Bir katkılı yarıiletken, özel katkı veya safsızlık atomlarının kontrollü bir miktarının ilave edilmiş olduğu bir yarıiletkendir. Bu yüzden, termal denge elektron ve boşluk (hol) konsantrasyonları asal taşıyıcı konsantrasyonundan farklıdır. Saf yarıiletkenlerde elektron hol konsantrasyonları birbirine eşit olduğundan, saf yarıiletkenlere katkı (bor, fosfor, arsenik, vb.) yapılarak elektron deşik sayılarını değiştirmek mümkündür. Böylece çalışılan malzemenin elektriksel özellikleri değiştirilmiş olur. Katkı atomlarının eklenmesiyle oluşan yarıiletkenler, saf germanyum veya silisyum gibi yarıiletken maddelere periyodik cetvelin beşinci ya da üçüncü sütununda bulunan maddelerin eklenmesiyle oluşur. Eklenen katkı maddesine göre *p*-tipi ve *n*-tipi olmak üzere katkılı yarıiletkenler iki ayrı gruba ayrılırlar [5].

2.2.1. *n*-tipi Yarıiletkenler

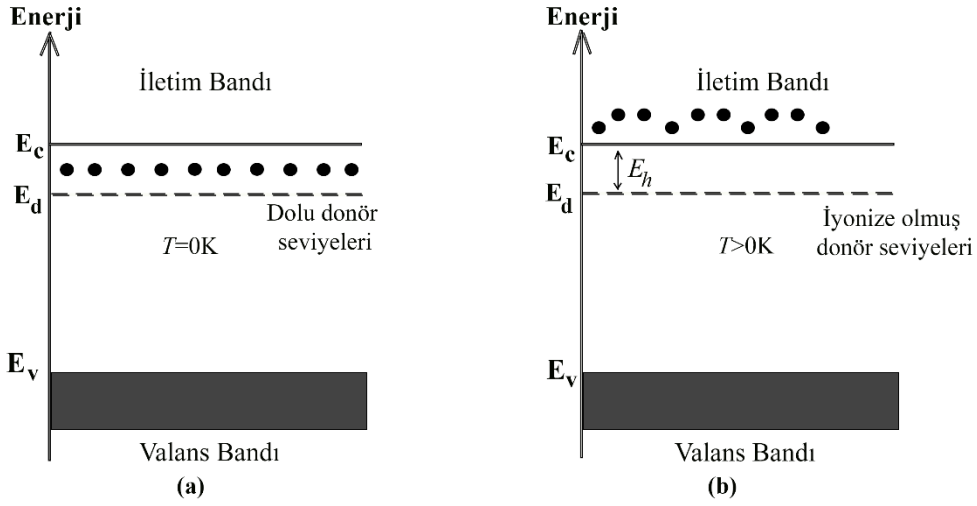
n-tipi yarıiletkenler, saf kristallere periyodik tablonun 5A gurubunda bulunan elementlerin katkılanmasıyla oluşurlar. Saf yarıiletken olan germanyum ve silisyum kristallerine, katkı atomları katkılanarak bu tür kristallerin özellikleri değiştirilebilir. Elmas yapıda olan silisyum ve germanyum, periyodik tablonun IV. grup elementlerindedir. Dört değerlik atomuna sahip olan her atom, kendisiyle komşu dört atomla kovalent bağ yapar. Beş değerlik atomuna sahip olan fosfor, antimon veya arsenik gibi bir katkı elementi, örgüdeki bir başka atomla yerlerini değiştirirlerse, dört kovalent bağı tamamladıktan sonra geriye bir valans elektronu kalacağından, bir katkı maddesi, örgüyü en az bozacak şekilde örgüye yerleşmiş olur. Şekil 2.2’de germanyum kristalinin arsenik atomu (As) ile katkılanmasını göstermektedir. Kristal içerisinde

germanyum atomunun dört değerlik elektronu, arsenik atomunun beş değerlik elektronunun dördü ile kovalent bağ yapar. Zayıf bir kuvvetle arsenik atomuna bağlı olan beşinci elektron, ortamdaki sağlayacağı ısı enerjisi ile kolayca iyonlaşarak bir ekstra iletim elektronu açığa çıkarır. Arsenik atomu ise hareketsizdir. Germanyum atomunun dört komşu atomuna sıkı bir şekilde bağlıdır.



Şekil 2.2. Arsenik katkı atomunun iyonlaşmasıyla serbest elektronun ortaya çıkışı [5].

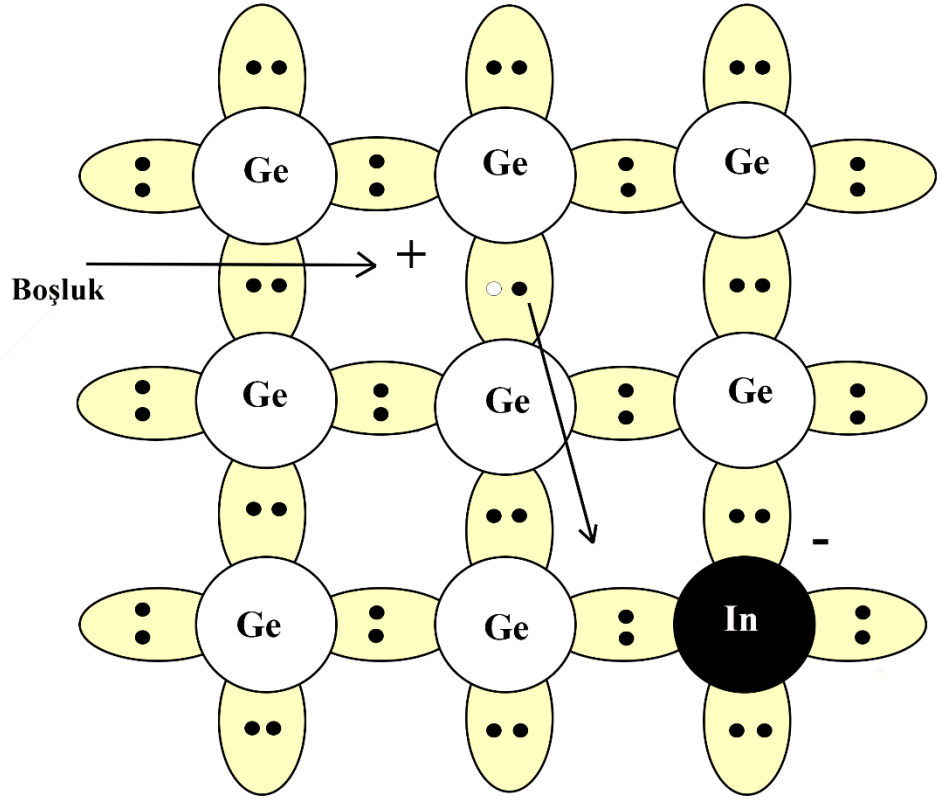
n -tipi yarıiletkenlerde çoğunluk taşıyıcıları negatif yükler yani elektronlardır. Kristale yerleştirilen donör atomları, iletkenlik bandının hemen altında yasak enerji bandının içinde izin verilmiş enerji düzeyinin (E_d) oluşmasına neden olur. Şekil 2.3 'de görüldüğü gibi E_d enerji seviyesi, elektronlarla doludur ve enerji değeri birkaç megaelektronvolt (MeV) civarındadır. Oda sıcaklığında E_d enerji seviyesinden kopan bu elektronlar geride iyonize olmuş pozitif yükler bırakarak iletkenlik bandına doğru hareket ederler [5].



Şekil 2.3. n -tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramları. (a) Mutlak sıcaklıkta ($T=0K$), (b) Mutlak sıcaklıktan büyük sıcaklıklarda ($T>0K$) [5].

2.2.2. p -tipi Yarıiletkenler

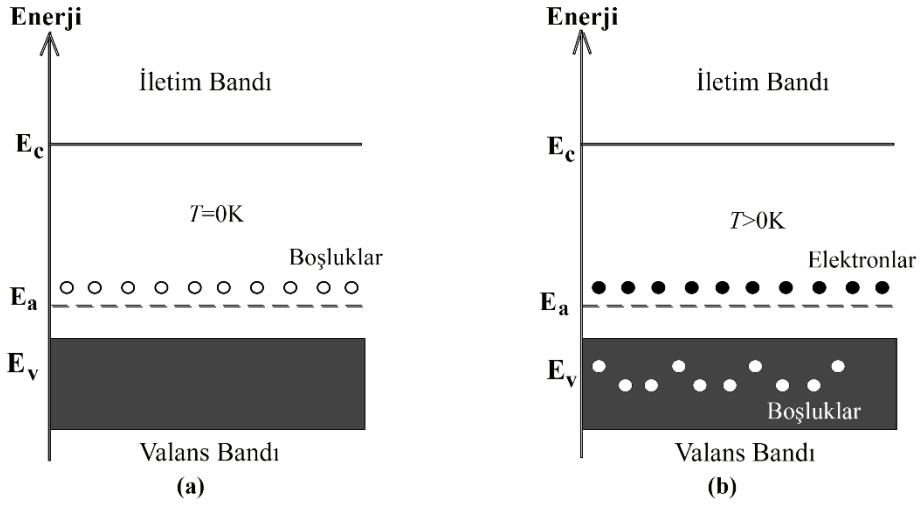
Periyodik cetvelin üçüncü grubunda bulunan alüminyum, bor, galyum ve indiyum gibi elementleri, periyodik cetvelin dördüncü grubunda bulunan silisyum ve germanyum gibi elementlere katkıya biliriz. Germanyum kristaline indiyum atomu katkıladığımızı göz önüne alalım. Şekil 2.4 'te üç değerlik elektronuna sahip indiyum atomu germanyum kristalini katkıladığımız zaman elektron bağlarından biri boş kalır. Bu boşluk (hol) bir diğerine bağlanmadan kapılan bir elektronla doldurulur ve elektron boşluğu bu elektronun yerine geçer. Bu şekilde elektron boşluğu kristal içerisinde hareket eder. Al, B, In ve Ga gibi üç değerlik katkı atomları, komşu atomdan elektron alıp komşu atomun valans bandında bir boşluk bırakarak, komşu atomlarla kovalent bağı tamamlamak istediğinden, kabul edici anlamında akseptör olarak adlandırılırlar. Enerji seviyelerine de akseptör enerji bandı denir.



Şekil 2.4. İndiyum katkı atomunun iyonlaşmasıyla serbest boşluğun ortaya çıkışı [5].

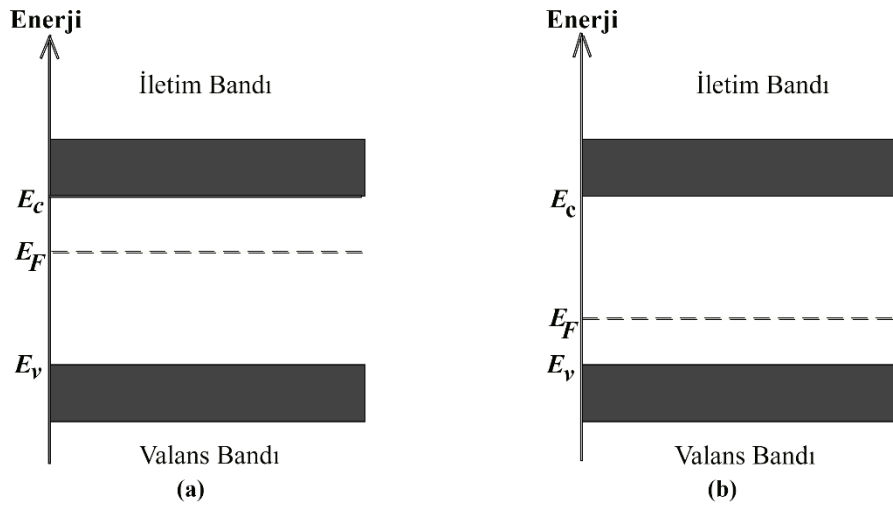
Bir akseptörün iyonlaşıp boşluğun serbest kalmasını sağlaması için enerji verilmesi gerekir. Bir boşluk enerji aldığı anda, enerji bant diyagramında görüldüğü gibi bandın alt tarafına iner. Elektron ise enerji aldığı anda bandın üst tarafına çıkar. Akseptör enerji bandının, valans enerji seviyesine yakın olduğunu Şekil 2.5 'te görülmektedir.

Fermi enerji seviyesi, *p*-tipi yarıiletkenlerde yasak enerji seviyesi aralığının ortasından ayrılarak, katkı maddesinin yoğunluğuna bağlı olarak valans enerji seviyesine doğru bir kayma yapar [10].



Şekil 2.5. p -tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramları. (a) Mutlak sıcaklıkta ($T=0K$), (b) Mutlak sıcaklıktan büyük sıcaklıklarda ($T>0K$) [10].

Fermi enerji seviyesi katkı yarıiletkenlerde saf durumdakinden farklıdır. Katkı atomlarının yoğunluğuna ve cinsine bağlı olarak Fermi enerji seviyesi katkı yarıiletkenlerde değişikliğe uğrar. Fermi enerji seviyesi, n -tipi yarıiletkenlerde iletkenlik enerji bandına ve p -tipi yarıiletkenlerde ise valans enerji bandına yakındır. Şekil 2.6 'da Fermi enerji bant yapısı, katkı yarıiletkenlerdeki durumu görülmektedir.



Şekil 2.6. (a) n -tipi katkı yarıiletkenlerde Fermi enerji bandı, (b) p -tipi katkı yarıiletkenlerde Fermi enerji bandı [5].

2.3. Metal/Yarıiletken (Schottky) Kontaklar

Metal-yarıiletken yapı, bir metal ile bir yarıiletkenin aralarında başka bir madde olmadan kontak edilmesi sonucunda oluşur. Metal-yarıiletken doğrultucu kontaklara

Schottky Kontak adı verilir. Schottky kontaklar (diyotlar), lineer olmayan akım-gerilim karakteristiklerine sahiptir. Kontakların lineer olmayan özellikleri, elektrik akımının doğrultulması, yükseltilmesi ve elektrik sinyalleri oluşturmak için kullanılabilir. Schottky kontaklar; doğru akım, yüksek frekanslı akım ve mikrodalga uygulamaları ve bazı fiziksel parametrelerin analizini yapan cihazlarda sıkça kullanılırlar [10].

Kristal içinde elektronlar örgü atomlarının Coulomb etkisi altındadır ve potansiyel enerjileri serbest elektrondan daha düşüktür. Kristal içinden elektronu dışarı (vakuma) çıkarabilmek için gereken eşik enerjisine iş fonksiyonu (Φ) adı verilir. Katılarda termodinamik iş fonksiyonu, elektronu Fermi seviyesinden vakuma çıkarmak için gereken enerjidir. Bu değer kristal yapıya bağlıdır ve yarıiletkenlerde (1-4) eV arasında değişir.

Metal-yarıiletken kontaklar her iki maddenin iş fonksiyonuna bağlı olarak ikiye ayrılırlar;

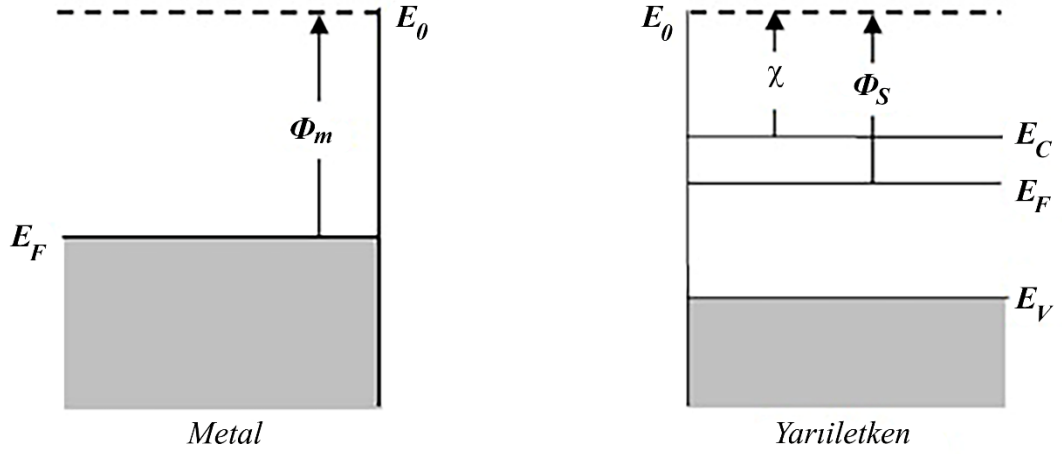
- a) Doğrultucu kontak (Taşıyıcı hareketinin bir yönden diğerine göre çok büyük olduğu)
- b) Omik kontak (Taşıyıcıların bir maddeden diğer maddeye kolayca geçebildiği)

Bir katının özelliklerini belirleyen temel parametreleri şöyle tanımlayabiliriz.

Fermi Enerji Seviyesi (E_F): İletkenlik ve valans enerji seviyelerinin taşıyıcı sayısına bağlı olarak yasak enerji bölgesinde bulunan sanal bir enerji seviyesidir.

İş Fonksiyonu (Φ veya ϕ): Bir elektronu sıfır kinetik enerji ile metal veya yarıiletkenin Fermi seviyesinden yüzeye (vakum seviyesine) çıkarabilmek için verilmesi gerekli en az enerji miktarına ($E_F - E_0$) denir (E_0 , vakum enerji seviyesini tanımlar).

Yarıiletkenin Elektron Yatkınlığı (χ veya χ_S): İletim bant kenarı ile vakum bandı (E_0) arasındaki elektronun enerji farkına denir. Metalin dışında hareketsiz duran bir elektronun enerjisini vakum seviyesi temsil eder.



Şekil 2.7. Metalin ve n -tipi yarıiletkenin enerji bant yapısı [11].

2.3.1. Metal/ n -tipi Yarıiletken (MS) Kontaklar

Metal/ n -tipi yarıiletken kontaklarda, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarının birbirlerine göre büyüklükleri, kontağın omik ya da doğrultucu olmasında önemli bir durumdur.

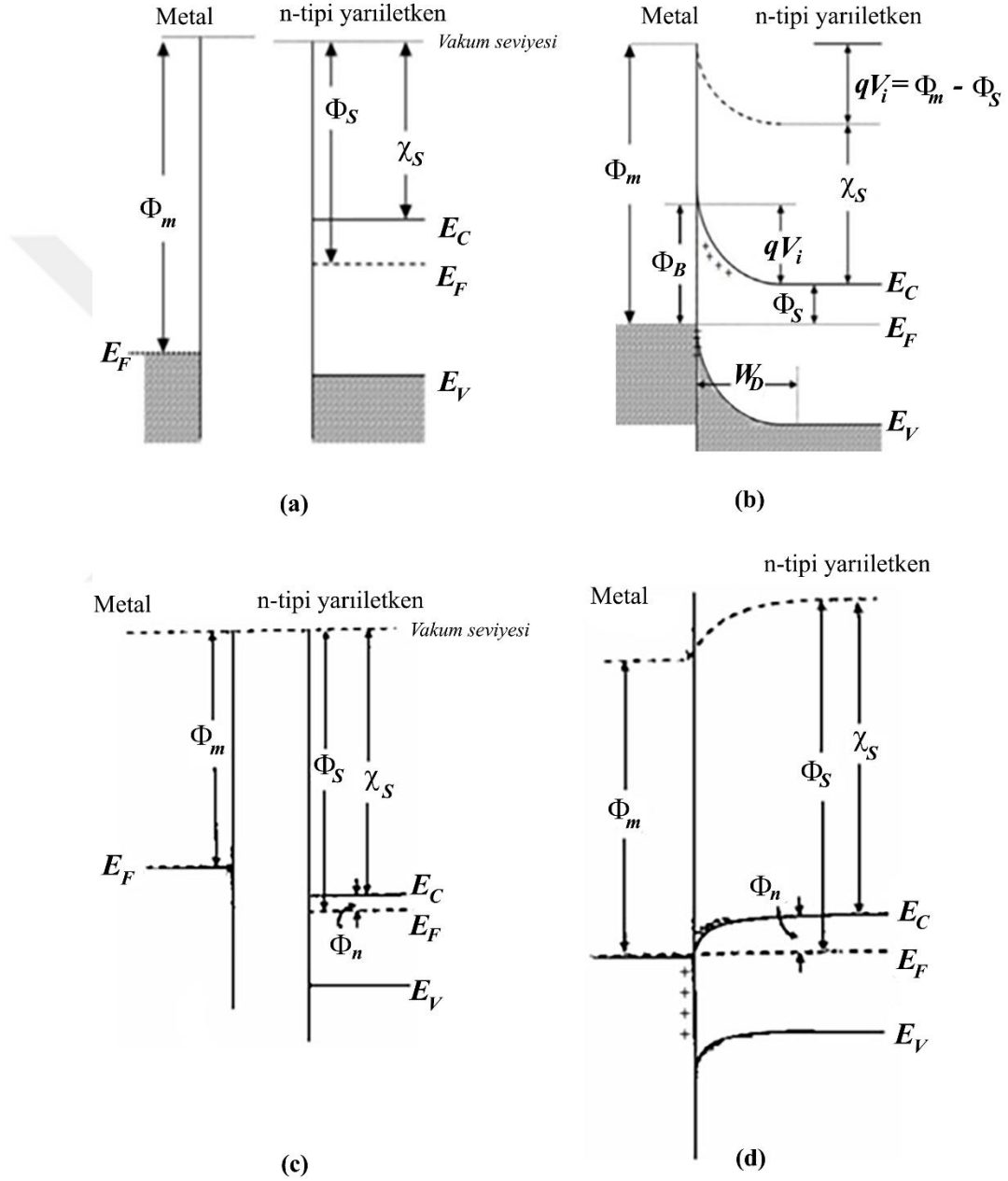
n -tipi yarıiletken metal kontaklarda;

$m > s$ durumunda doğrultucu (Schottky) kontak,

$m < s$ durumunda omik kontak.

Metalin iş fonksiyonu Φ_m , yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_S 'den büyük ($\Phi_m > \Phi_S$) olduğu durumda oluşan metal n -tipi yarıiletken kontak (Şekil 2.8) gösterilmektedir. Kontak öncesi yarıiletken Fermi enerji seviyesi, metalin Fermi enerji seviyesinden $\Phi_m - \Phi_S$ kadar yukarıdadır. Şekil 2.8 (a) ve (b)'de görülüyor ki, kontakta sonra denge oluşuncaya kadar yarıiletkenle metal arasında yük alışverişi olur. Yarıiletkenin iletkenlik bandaki elektronlar, metaldeki elektronlardan daha yüksek enerjiye sahip olduklarından kontak bölgesi içine girerek elektronların metal içerisine yerleştikleri enerji seviyesi E_F (metal Fermi seviyesi) ile yarıiletkenin E_F seviyelerini birbirine eşitler. Yarıiletkendeki elektron yoğunluğunun azalması, iletkenlik bandı E_C ile E_F Fermi enerji seviyesi arasındaki mesafenin giderek artmasına ve yarıiletkenin E_F seviyesinin daha aşağıdaki bir enerji seviyesine doğru hareketine neden olur. Termal dengeye ulaştığında ise sabit kalarak metalin Fermi seviyesiyle aynı düzeye gelir [11].

Kontak bölgesinin içine giren yarıiletkenin iletkenlik bandı elektronları, geride pozitif yüklü iyonize boşluklar bırakarak, yarıiletken kenarında pozitif yüklü ara yüzeyin oluşmasına sebep olurlar. Bu durumda, metal içerisindeki elektronlarda yarıiletkenin ara yüzeyine yakın bir bölgede negatif bir ara yüzey oluştururlar ($\approx 0,5 \text{ \AA}$). Bu yüzden elektriksel alan, yarıiletkenden metale doğru olacak şekilde meydana gelir [11].



Şekil 2.8. n-tipi metal/yarıiletken doğrultucu ve omik kontak enerji bant diyagramları. (a) ve (c) ayrı iken nötr durumdadırlar ve kontak sonrası termal dengeye gelmişlerdir, (b) $\Phi_m > \Phi_S$ olması durumunda n-tipi yarıiletkenlerin eklenmesiyle meydana gelen doğrultmanın olduğu ve (d) $\Phi_m < \Phi_S$ olması durumunda n-tipi yarıiletkenlerin eklenmesiyle meydana gelen omik kontaktın oluşumudur [11].

Yarıiletkenin yasak enerji bant aralığı, kontak nedeniyle değişmediği için, valans enerji seviyesinin kenarı (E_V) iletkenlik enerji bandının kenarına (E_C) doğru paralel kayacaktır. Yarıiletkenin, vakum enerji seviyesi de kontak nedeniyle yarıiletkenin elektron yakınlığı değişmediğinden dolayı aynı değişimi gösterir. Bu durumda ısısal dengedeki metal-yarıiletken sisteminde bant bükülmesi miktarı denklem 2.1 eşitliğinde gösterildiği gibi metalin iş fonksiyonu Φ_m ile yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_S arasındaki farka eşittir.

$$qV_i = (\Phi_m - \Phi_S) \quad (2.1)$$

q = Elektronik yük, V_i = Kontak potansiyeli,

Φ_m = Metalin iş fonksiyonu, Φ_S = Yarıiletkenin iş fonksiyonu.

Burada V_i kontak potansiyel farkı veya eklemde oluşan potansiyel olarak ifade edilir ve birimi Volt 'tur. qV_i yarıiletkenden metale geçen elektronun sahip olması gereken enerji miktarı yani engel yüksekliğidir. Bununla beraber metalden bakıldığında gözüken engel, yarıiletkenden bakıldığında gözüken engelden farklıdır. Metal ve yarıiletken için engel yükseklikleri, yarıiletken tarafında

$$\Phi_B = (\Phi_m - \chi_S) \quad (2.2)$$

Φ_B = Engel yüksekliği, Φ_m = Metalin iş fonksiyonu,

χ_S = Yarıiletkenin elektron yakınlığı.

ve metal tarafında $\Phi_S = \chi_S + \Phi_n$ ve ayrıca $\Phi_m = qV_i + \Phi_S$ olduğu için,

$$\Phi_B = (qV_i + \Phi_n) \quad (2.3)$$

Φ_B = Engel yüksekliği, q = Elektronik yük, V_i = Kontak potansiyeli,

Φ_n = İş fonksiyonları arasındaki fark fonksiyonu.

elde edilir. Bu denklem 2.3 Schottky Sınırı olarak tanımlanır [11].

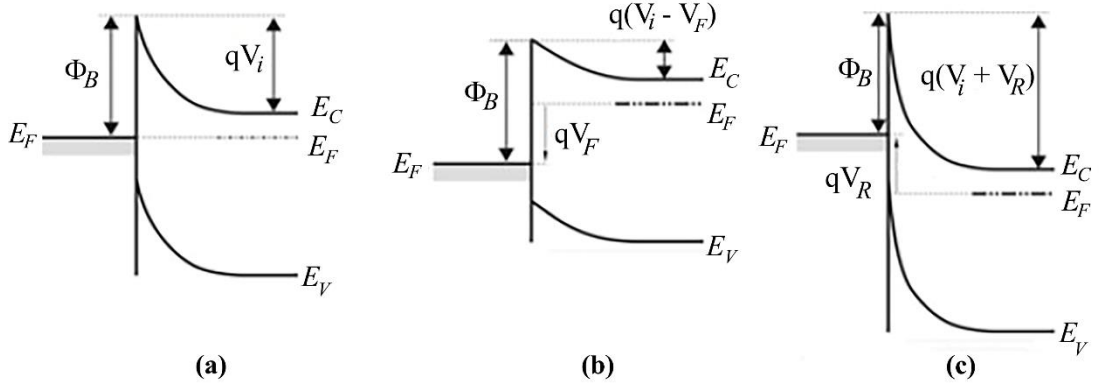
Burada, $\Phi_n = (E_c - E_F)$ olup ve q elektronik yüküdür. 1938 yılında birbirinden bağımsız Schottky ve Mott tarafından potansiyel engel $\Phi_B = (\Phi_m - \chi_S)$ şeklinde gösterilmiştir. Potansiyel engelini tam olarak uzay yük bölgesindeki yük dağılımından hesaplayabiliriz. Genelde potansiyel engeli kT/q termal enerjisinden çok büyük ve çok az sayıdaki elektron bu engeli geçmek için yeterli enerjiye sahiptir. Bu nedenle eklem bölgesindeki yükler azalmaya başlar ve eklem bölgesinin direnci artar. Sabit uzay yükleri için elektrik alanın büyüklüğü, uzay yük tabakası kenarından olan uzaklıkla doğrusal olarak artar ve sonuçta engel yüksekliği parabolik olur. Mott'a istinaden, yarıiletkenin hiç yük içermeyen ince tabakası düzenli olarak katılanan bir yarıiletken ve metal arasında yerleştirilmiştir. Bu ince tabakadaki elektrik alan büyüklüğü (E) sabittir ve potansiyel, bu bölgeye doğru geçerken doğrusal olarak artar. Bu tip engel Mott Engeli olarak bilinir [12].

Elektronların her iki doğrultuda kolaylıkla geçebildiği kontaklar omik kontaklardır. Metalin iş fonksiyonu (Φ_m), yarıiletkenin iş fonksiyonundan (Φ_S) daha küçük ($\Phi_m < \Phi_S$) olduğunda, metal/n-tipi yarıiletken omik kontak oluşur. Kontakta önceki ve sonraki enerji bant seviyeleri Şekil 2.8 (c) ve (d) 'de gösterilmektedir. Kontak öncesi Şekil 2.8 (c)'de görüldüğü gibi yarıiletken Fermi enerji seviyesi, metalin Fermi enerji seviyesinden $\Phi_S - \Phi_m$ kadar aşağıdadır. Kontakta sonra yarıiletkene doğru elektron konsantrasyonu daha büyük olan metalden elektronlar akmaya başlar. Metal ile yarıiletkenin E_F seviyeleri birbirine eşit olduğuna kadar bu durum sürer. Elektronlar, arkalarında pozitif yüklü boşluklar oluşturacaklardır. Sonuçta E_C , E_V ve vakum seviyesi yukarı doğru bükülecektir. Böylelikle bu kontak, omik kontak olarak davranmış olur [11].

Yarıiletken ve metal içindeki bazı elektronların termal denge durumunda, termal yolla elde ettikleri enerji potansiyel engelini aşacak kadar büyük olduğunda, kontakta eşit ve ters yönde bir I_0 sızıntı akımı oluşur ve net akım sıfır olur. Yarıiletkenin boşaltılmış bölgesi oldukça az hareketli taşıyıcı içerdiğinden, bu bölgenin direnci yarıiletkenin ve metalin nötr kısmının direnci ile mukayese edildiğinde oldukça yüksektir ve uygulanan dış voltajın hepsi bu bölgeye düşer. Bu durum, termal dengedeki bant şemasını değiştirir. Yarıiletken negatif ve metal pozitif olacak şekilde bir voltaj uygulandığında ($V = V_F$; düz besleme), Şekil 2.9 (b)'de görüldüğü gibi boşaltılmış

bölgenin (tüketim bölgesi) genişliği azalır ve bu bölgedeki engel yüksekliği, qV_i 'den $q(V_i - V_F)$ 'ye azalır. Bu durumda yarıiletkenden metale doğru geçen elektronlar için engel yüksekliği azalacak ve yarıiletkenden metale elektron geçişi termal denge değerine göre artışa geçecektir. Metalden yarıiletkene doğru elektron geçişi ise metalde bir voltaj düşmesi olmaması ve Φ_B 'nin uygulanan gerilimden etkilenmeyerek aynı kalması sebebiyle termal denge değerine göre değişmez. Sonuçta doğru besleme durumunda yarıiletkenden metale yönelik net bir akım bulunmaktadır. Doğru besleme akımı uygulanan V_F voltajı ile üstel olarak artar [12].

Ters beslemeli kontak durumunda enerji bant şeması Şekil 2.9 (c)'de verilmiştir. Metale negatif, yarıiletkene ise pozitif olacak biçimde uygulanan voltaj ($V = -V_R$) boşaltılmış bölgenin (tüketim bölgesi) genişliğini artırır ve potansiyel, (qV_i) 'den $q(V_i + V_R)$ 'ye artar. Bu durumda yarıiletkenden metale yönelik elektron geçişi termal denge durumuna göre azalırken, metalden yarıiletkene doğru elektron geçişi değişmez. Termal denge değeri ile aynı kalır, bu durumda, metalden yarıiletkene yönelen akım hemen hemen değişmez iken yarıiletkenden metale yönelen akım doğru besleme durumundaki ile mukayese edildiğinde daha küçük kalır. Bu koşullardaki kontak tek yönde akım geçiren Schottky kontaklıdır ($\Phi_S < \Phi_m$) [12].



Şekil 2.9. (a) Doğru besleme ve ters besleme durumu, (b) Metal/n-tipi yarıiletken kontak için elektron enerji bant şeması, (c) Termal denge durumu [12].

2.3.2. Metal/p-tipi Yarıiletken Kontaklar

p -tipi bir yarıiletken ile bir metal kontak yapıldığında, Φ_m metalin iş fonksiyonu Φ_S yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyük ise ($\Phi_m > \Phi_S$) kontak omik, küçük ise ($\Phi_m < \Phi_S$) kontak doğrultucu olur (Şekil 2.10 (a-b)).

p -tipi yarıiletkenin iletkenliği sağlayan, pozitif yüklü boşluklardır. p -tipi yarıiletken, metal ile kontak yapıldığında, metaldeki enerjisi yüksek olan elektronlar yarıiletkenin içine doğru her iki Fermi seviyesi eşit oluncaya kadar hareket ederler. Bu durum elektronlar için daha kararlı durumdur. Böylece metalin E_F seviyesi düşmeye başlar. Metal içerisindeki elektronların yarıiletkenler içerisindeki boş alanlara rahatlıkla geçerek oluşturdukları yük hareketi, boşlukların yarıiletkenden metale doğru olan geçişine karşılık gelir. Metal tarafına geçen boşluklar hemen nötr duruma gelirler. Böyle bir ekleme oluşan kontak, doğrultucu özelliği göstermekte olup Schottky kontağı olarak adlandırılır. Şekil 2.10 (b) 'de gösterildiği gibi bant bükülmesinin değeri denklem 2.4 eşitliğindeki gibidir.

$$qV_i = \Phi_S - \Phi_m \quad (2.4)$$

q = Elektronik yük, V_i = Kontak potansiyeli, Φ_S = Yarıiletkenin iş fonksiyonu,

Φ_m = Metalin iş fonksiyonu.

Denklem 2.4 eşitliğinde, V_i kontak potansiyel farkı veya eklemin potansiyel birikmesi ve qV_i ise elektronların meydana getirdiği potansiyel engelidir.

p -tipi yarıiletken-metal kontağında, Φ_m metalin iş fonksiyonunun, Φ_S yarıiletkenin iş fonksiyonundan daha büyük olduğu ($\Phi_m > \Phi_S$) durumdaki enerji bant yapısı Şekil 2.10 (c-d) 'de gösterilmektedir.

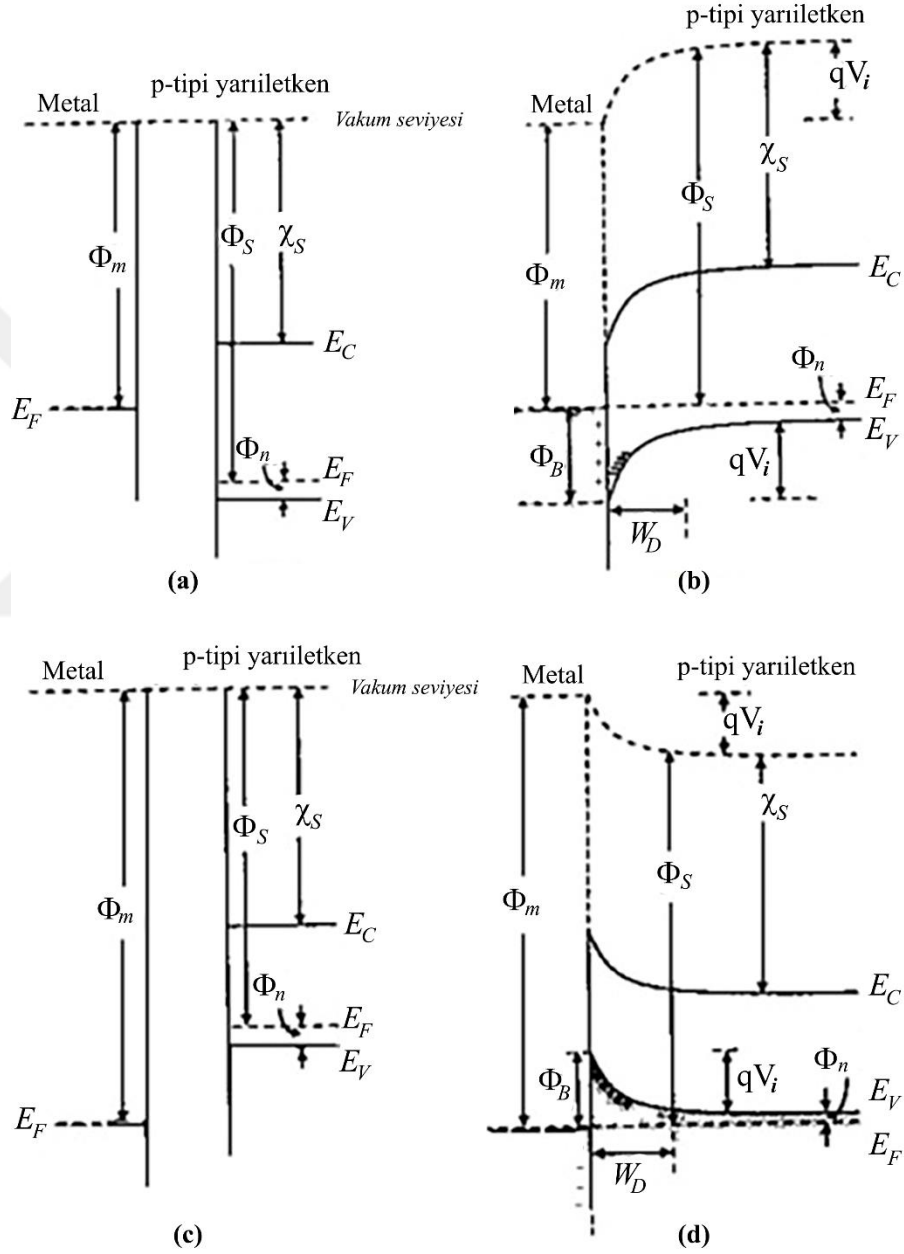
Bu şartlarda oluşturulan kontakta yük mübadelesi meydana gelecektir. p -tipi yüksek enerjili elektronlar metale geçerek kontak bölgesinde negatif yük fazlalığından dolayı bir tabaka ve yarıiletken tarafında pozitif yük fazlalığından dolayı bir W_D tüketim bölgesi oluşturur. Bu durumda yarıiletkenin yüzeyi daha fazla p -tipi olur. Yarıiletkenin E_F seviyesi, elektronların metale geçmesinden dolayı aşağıya doğru hareket ederken, metalin E_F seviyesi metalin içerisine giren elektronların sayısının artmasından dolayı yukarıya doğru hareket edecektir. Böylece, metal/ p -tipi yarıiletken yapısı omik kontak özelliği gösterecektir. Şekil 2.10 (d)'de gösterildiği gibi bant bükülmesinin değeri denklem 2.5 'deki gibi olacaktır.

$$qV_i = \Phi_m - \Phi_S \quad (2.5)$$

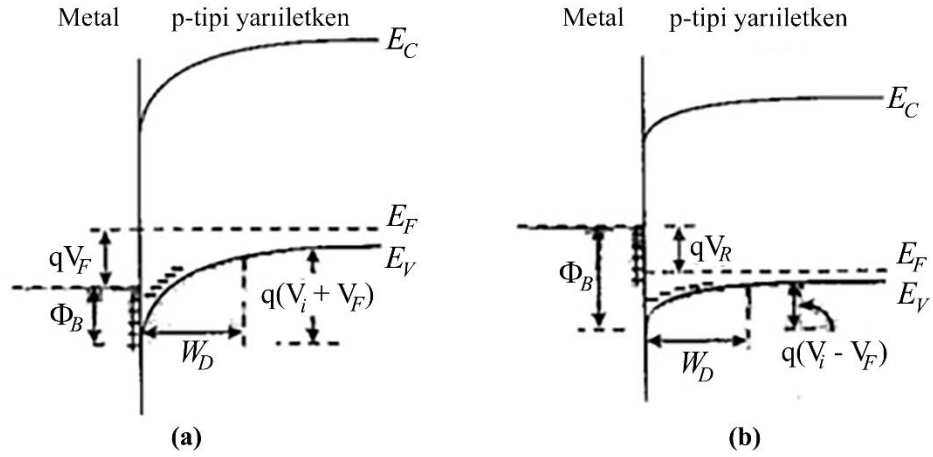
q = Elektronik yük, V_i = Kontak potansiyeli, Φ_m = Metalin iş fonksiyonu,

Φ_S = Yarıiletkenin iş fonksiyonu.

Metal/ p -tipi yarıiletken kontaklarının termal denge durumları Şekil 2.10 (a) göre açıklanmıştır.



Şekil 2.10. p -tipi metal/yarıiletken doğrultucu ve omik kontak enerji-band diyagramları: (a) ve (c) ayrı iken nötr durumdadırlar ve kontak sonrası termal dengeye gelmişlerdir, (b) $\Phi_S > \Phi_m$ olması durumunda p -tipi yarıiletkenlerin eklenmesiyle meydana gelen doğrultmanın olduğu ve (d) $\Phi_m > \Phi_S$ olması durumunda p -tipi yarıiletkenlerin eklenmesiyle meydana gelen omik kontaktların oluşumu [11].



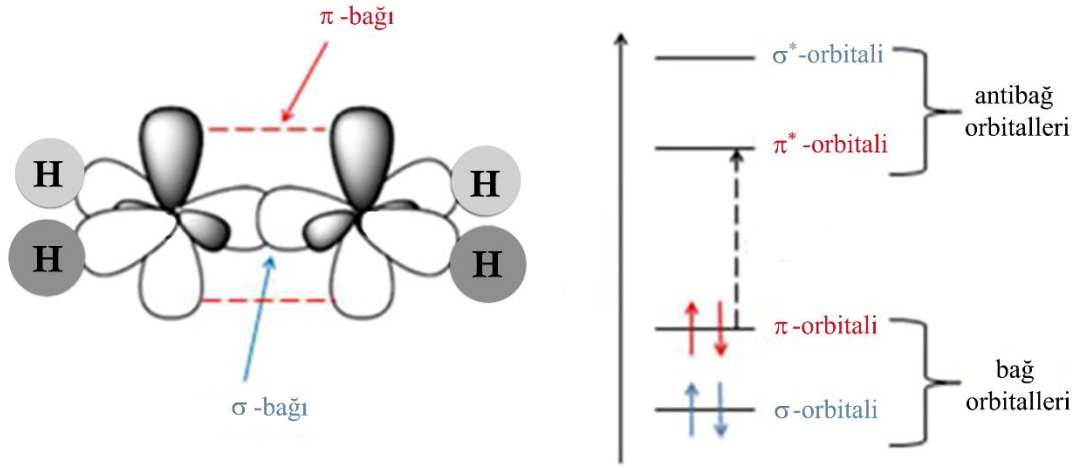
Şekil 2.11. *p*-tipi metal/yarıiletken doğrultucu kontağın elektron enerji bant diyagramları: (a) düz besleme, (b) ters besleme durumunda [11].

Şekil 2.11. (a) ve Şekil 2.11 (b)'de ise metal/*p*-tipi yarıiletken kontak için sırasıyla düz besleme ve ters besleme durumlarındaki enerji bant diyagramları gösterilmiştir. Yarıiletkenlerdeki tüketim bölgesinin az miktarda taşıyıcılara sahip olmasından dolayı tüketim bölgesinin direnci, nötr yarıiletkenin ve metalin direncine göre daha yüksektir. Tüketim bölgesine düşen V_i potansiyeli ve tüketim tabakası W_D değişimi uygulanan düz ve ters beslemeye göre Şekil 2.11 (a) ve 11 (b)'de görüldüğü gibi değişmektedir [11].

2.4. Organik Yarıiletkenler

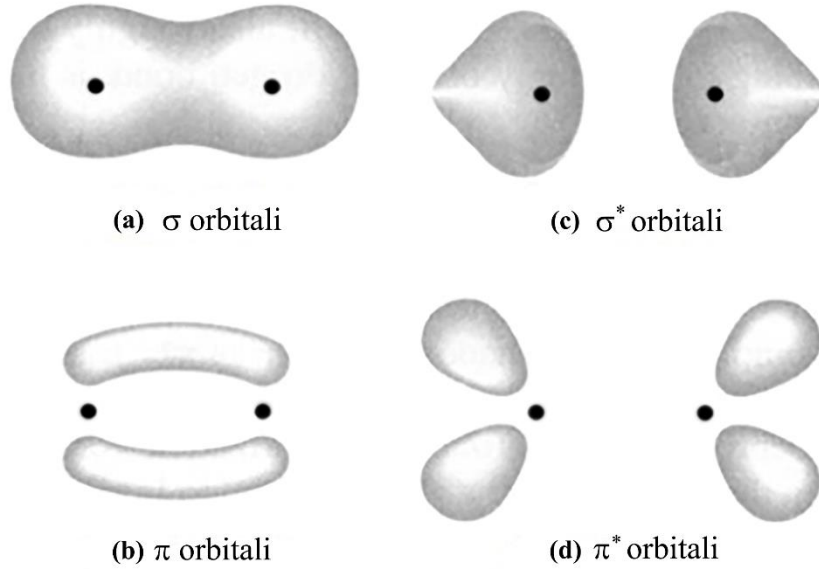
Organik yarıiletkenler olarak adlandırılan bu yapılar Karbon ve hidrojen atomlarından meydana gelmektedir. İletkenlik mekanizmaları yarıiletkenlerinkine benzeyen organik yarıiletkenlerin elektriksel iletkenliği sıcaklıkla üstel olarak artış gösterir. Çok yaygın olan organik yarıiletken Anthracene ($C_6H_4:(CH)_2:C_6$) bunlara iyi bir örnek olarak verilebilir [13].

Organik yarıiletkenler düşük molekül ağırlıklı malzemeler ve polimerler olmak üzere iki ana sınıfta toplanırlar. Her iki sınıfın da molekül sistemlerindeki *sp* hibritleşmesi yapmış karbon atomlarının *Pz* orbitalleri tarafından oluşturulmuş konjuge π -elektron sistemleri vardır (Şekil 2.12). Moleküllerin omurgalarındaki π -bağları σ -bağlarına göre daha zayıftır. Bu nedenle, ışık absorpsiyonu ve yayılımına neden olan konjuge moleküllerin en düşük elektronik uygulamaları görünür spektral bölgedeki enerji band aralığı 1,5-3 eV arasında olan $\pi - \pi^*$ geçişleridir [4].



Şekil 2.12. En basit konjüge π -elektron sistemi olan eten molekülünün σ ve π bağları (sol) ve π -konjüge molekülün enerji seviyeleri. En düşük elektronik uyarılmaları π -bağ orbital π^* antibağ orbitali arasındadır (sağ) [8].

$\pi-\pi^*$ geçişleri soğurma spektroskopisinin organik bileşiklere uygulanmasında yararlanılan elektronik geçişlerin hemen hepsi elektronlarının uyarılmış duruma geçirilmesi temeline dayanmaktadır, bu işlemler için gerekli enerjiler soğurma piklerinin uygun spektral bölgede (200-700 nm) bulunmasını sağlamaktadır. Şekil 2.12'de dört elektronik geçiş görülmektedir; bunlar $\sigma \rightarrow \sigma^*$, $n \rightarrow \sigma^*$, $n \rightarrow \pi^*$ ve $\pi \rightarrow \pi^*$ 'dir [8].




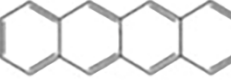



Şekil 2.13. (a) ve (b) σ ve π bağlarında elektron dağılımı ve (c) ve (d) ise anti-bağ σ ve π orbitallerinin yük yoğunluğu dağılımı [8].

Tablo 2.1 'de görüldüğü gibi polyasen ailesinin enerji aralığı molekül içindeki konjügasyon derecesi ile kontrol edilebilir. Bundan dolayı kimya bilimi organik

yarıiletken malzemelerin opto-elektronik özelliklerinin değiştirilebilmesi için geniş imkânlar sunar. Tablo 2.1'de bazı prototip malzemeler gösterilmiştir [2].

Tablo 2.1. İlk beş polyasen'in ana absorpsiyon piklerinin dalga boylarıyla birlikte molekül yapıları.

Molekül	Yapı	Maksimum Absorpsiyon (nm)
Benzen		255
Naftalin		315
Antrasen		380
Tetrasen		480
Pentasen		580

İki ayrı sınıfa ayrılan organik yarıiletkenlerin ince film şekline dönüştürme yöntemleri farklıdır. Küçük moleküller genellikle süblimasyon veya buharlaştırma yöntemleriyle kaplanırken, konjuge polimerler ise döndürerek kaplama (spin-coating) veya baskı (print) yöntemleri gibi çözelti bazlı yöntemler ile kaplanabilirler. Bu kontrollü büyütme yöntemleri ile yüksek düzenli ince filmler üretebilme amacına yönelik akademik çalışmalar hala sürmektedir [2].

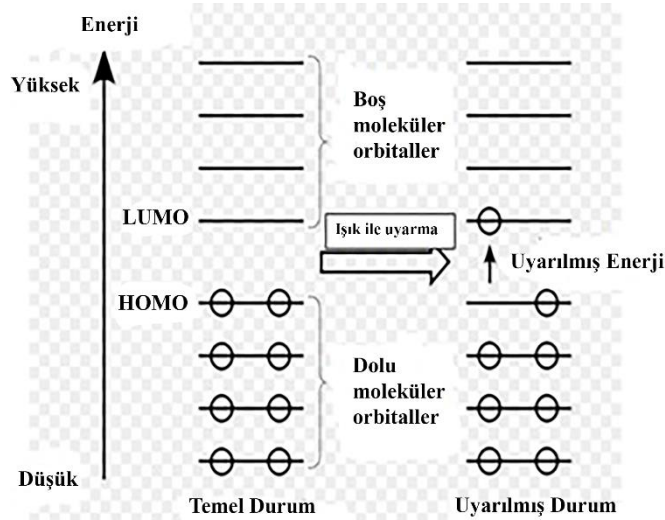
Art arda tek ve çift karbon-karbon bağları ile bağlanmış konjuge polimerler, uzun zincirli moleküllerdir. Tekli bağ, sigma bağıdır ve çift bağda ise biri sigma (σ) bağı diğeri ise pi (π) bağıdır.

Polimerler ve küçük moleküller arasındaki temel fark bunların ince filmler oluşturmadaki işleme şeklidir. Polimerlerin spin kaplama yöntemiyle büyütülebiliyor olmasının sebebi birçok çözeltide küçük moleküllerden çok daha iyi çözünebilme özelliği göstermesidir. Küçük moleküller çoğu zaman vakum buharlaştırma yöntemiyle büyütülürler, sebebi ise çözeltilerde çoğu zaman çözülemez olmalarıdır. Buharlaştırılmış küçük moleküller filmlerde çokça karşılaşılan hatalar içermeyen daha ince aktif tabakalar halinde üretilebilmeleri polimerleri, küçük

moleküllerden (monomerlerden) üstün kılınıştır. Bu özellikler bunu içeren aygıtlara çok daha düşük gerilimlerde çalışma imkanı verir [1].

Sadece konjugasyon, yüksek düzeyde iletkenlik için yeterli olmadığından, polimerlerin iletkenliğini artırmak için “katkılandırma” işlemi uygulanır. Doping işleminde kullanılan dopantlar malzeme içerisinde elektron ve hollerin sayısını artırır. *n*-tipi doping olarak adlandırılan yapıya elektron vererek negatif yüklü bölgeler veya *p*-tipi doping olarak adlandırılan polimer zincirinden elektron koparılmasıyla polimer örgüsünde artı yüklü boşluklar oluşturma işlemleri gerçekleştirilir. İletkenliğin sağlanması katkılı yarıiletkenlere benzer yaklaşımla elektron ve boşluk hareketi sağlanır [14].

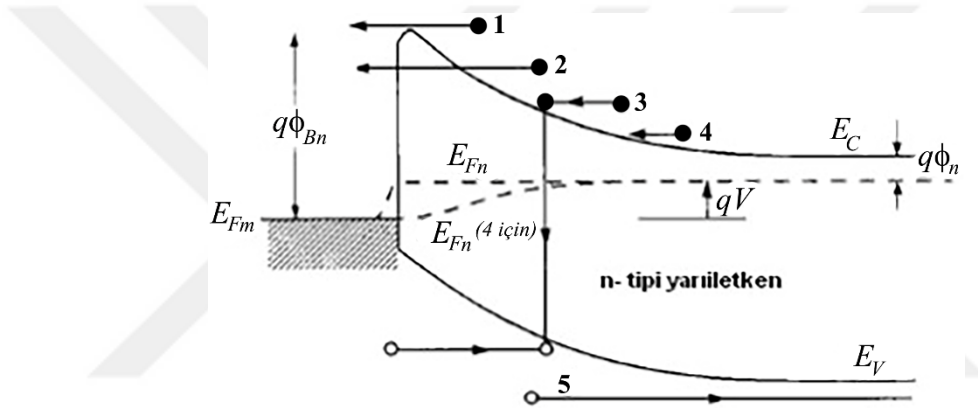
Kuramsal yaklaşımlardan biri olan band kuramı ile iletken polimerlerde, elektronik iletkenlik açıklanmaktadır. Polimerlerde bağ oluşumu sırasında iki enerji düzeyi ortaya çıkmıştır [14]. Kararlı haldeki düşük enerjili bağ yapmış molekül orbitallerin oluşturduğu band LUMO (en düşük dolu olmayan moleküler orbital), bağ-karşıtı moleküler orbitallerin oluşturduğu band HOMO (en yüksek dolu moleküler orbital) adı verilen ve bu iki band arasında izinli olmayan enerji aralığı oluşmaktadır. HOMO enerji bandı inorganik katılal fiziğinde değerlik bandına karşılık gelirken, LUMO enerji bandı iletkenlik bandını temsil etmektedir [4].



Şekil 2.14. HOMO ve LUMO molekül diyagramı [4].

2.5. Akım İletim Mekanizmaları

Metal-yarıiletken kontak yapı arasında taşıyıcıların iletimi, çoğunluk taşıyıcıları (elektron ve holler) nedeniyle gerçekleşir. Metal/*n*-tipi yarıiletken yapılarda, elektronlar, metal/*p*-tipi yarıiletken yapılarda ise boşluklar akım taşıyıcılarıdır. Metal-yarıiletken yapı için doğru besleme altında taşıyıcı iletim prosesleri Şekil 2.15 'de şematik olarak ifade edilmiştir. Temel mekanizmalarda yani idealite faktörünün 1 olduğu durumlarda termoiyonik emisyon ve difüzyon mekanizmaları etkisi altındadır, idealite faktörünün 1'den saptığı durumlarda diğer mekanizmalar (tünelleme, rekombinasyon vb.) etki gösterir.



Şekil 2.15. Doğru gerilim altında beş temel iletim prosesi. (1) Termoiyonik emisyon, (2) Tünelleme, (3) Rekombinasyon (yeniden birleşme), (4) Elektronların difüzyonu, (5) Deşiklerin (hollerin) difüzyonu. Oda sıcaklığında orta dereceli katkı ($N_D < 10 \text{ cm}^{-3}$) kristal yarıiletkenlerde hakim olan mekanizma (1), (2) veya (1) ve (2) 'nin kombinasyonudur [15].

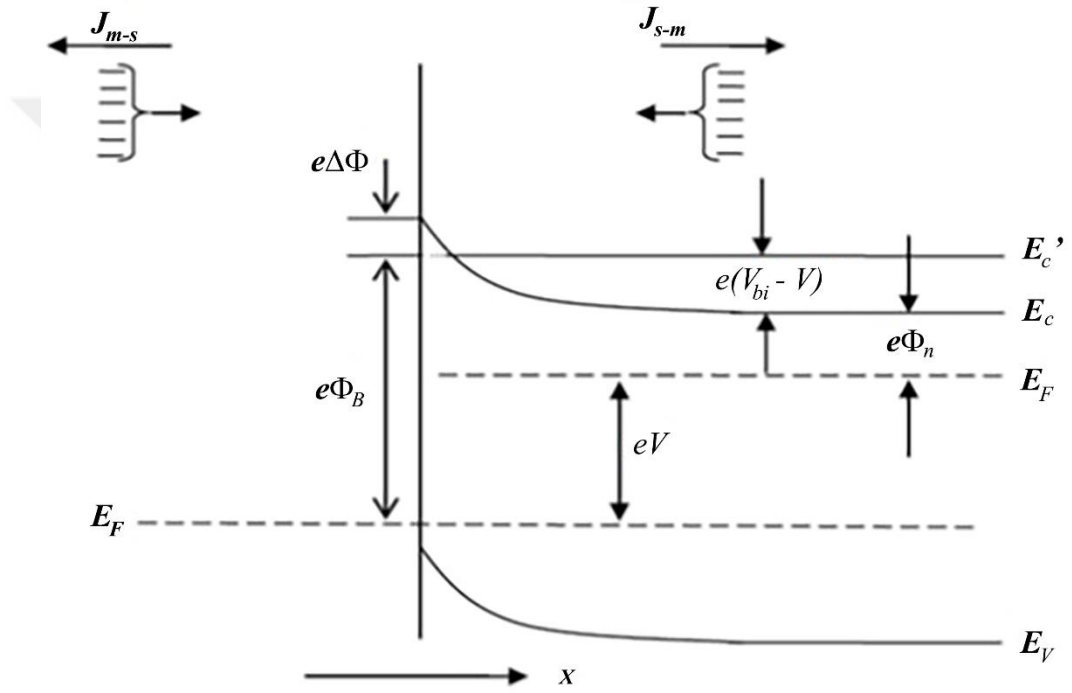
2.6. Metal/Yarıiletken Schottky Diyotlarında Akım İletimi

Metal/Yarıiletken Schottky diyotlarında akım iletimi, Schottky ve Spenke tarafından ileri sürülen difüzyon teorisi ve termoiyonik emisyon teorisi ile açıklanmaktadır. Bu teoriler aşağıda kısaca açıklanacaktır [16].

2.6.1. Termoiyonik Emisyon Teorisi

Termoiyonik emisyon teorisi, Schottky kontaktların bir potansiyel engeli üzerinden elektron taşınması işlemi ile açıklanmaktadır. Termoiyonik emisyon, sıcak bir yüzeyden taşıyıcıların termal enerjileri nedeniyle yayınlanması demektir. Metal/yarıiletken Schottky diyotlarda yeterince termal enerji kazanan taşıyıcıların

potansiyel engelini aşarak metalden yarıiletkene ya da yarıiletkenden metale doğru geçmesidir. Metal/*n*-tipi yarıiletkenlerde, elektronlar, metal/*p*-tipi yarıiletkenlerde ise deşikler akımı oluşturur. Bu sebeple her iki yapıda da akım çoğunluk taşıyıcıları vasıtasıyla oluşur. Termoiyonik emisyon teorisi oluşturulurken, Maxwell-Boltzmann yaklaşımının uygulanabilmesi ve termal denge durumunun olaydan etkilenmemesi için, tüketim bölgesindeki taşıyıcı çarpışmalarının ihmal edilecek kadar çok küçük olduğu ve doğrultucu kontağa ait potansiyel engelini, kT enerjisinden daha büyük olduğu kabul edilmektedir [17].



Şekil 2.16. Doğru beslemede metal/yarıiletken Schottky kontaktın enerji-bant diyagramı [17].

MS kontaklarda Bethe 'nin akımın çoğunluk taşıyıcılar tarafından iletildiğini kabul ederek oluşturduğu termoiyonik emisyon teorisinin varsayımları aşağıda verilmiştir;

- kT/q enerjisi, potansiyel yüksekliğinden çok küçüktür.
- Schottky bölgesinde taşıyıcıların çarpışmaları olmadığından, Schottky bölgesinin kalınlığı taşıyıcıların ortalama serbest yolları daha azdır, akım engel yüksekliğine zayıf bağlıdır ve görüntü (hayali) kuvvetlerin etkisi ihmal edilmektedir.

Bu varsayımlara dayanarak yarıiletkenden metale doğru akım yoğunluğu J_{sm} , potansiyel engelini geçmeye yetecek kadar enerjiye sahip elektronların yoğunluğu ve bunların hızına bağlı olarak yazılabilir [14].

$$J_{sm} = \int_{E_F + q\Phi_{bn}}^{\infty} qv_x dn \quad (2.6)$$

J_{sm} = Elektronların yarıiletkenden metale doğru oluşturduğu akım yoğunluğu,

$E_F + q\Phi_{bn}$ = Termoyonik Emisyon (TE) için gerekli olan en az enerji miktarı,

v_x = Taşıyıcı hızı, dn = Enerji yoğunluğu.

Bu eşitlikten giderek, metal/ n -tipi yarıiletken kontaklarda yarıiletkenden metale doğru geçen elektronlar için akım denklemi;

$$J_{sm} = \left(\frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) \cdot T^2 \cdot \exp \left[\frac{-q(\Phi_B)}{kT} \right] \cdot \exp \left(\frac{qV}{kT} \right) \quad (2.7)$$

J_{sm} = Elektronların yarıiletkenden metale doğru oluşturduğu akım yoğunluğu,

q = Elektronik yük, V = Potansiyel, T = Sıcaklık, k = Boltzmann sabiti,

m^* = Taşıyıcının etkin kütlesi, h = Planck sabiti, Φ_B = Engel yüksekliği.

şeklinde yazılır.

Burada x yönünde, engeli aşabilecek büyüklükte hızlara sahip elektronların yoğunluğunun bir fonksiyonu olan J_{ms} , metalden yarıiletkene doğru olan akım yoğunluğu ve J_{sm} , yarıiletkenden metale doğru akan akım yoğunluğudur. Uygulama gerilimi sıfır olduğundan J_{sm} ile J_{ms} tamamen eşittir. Eklemdaki net akım yoğunluğu $J = J_{sm} - J_{ms}$ ifadesiyle verilir.

$$A^* = \left(\frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) \quad (2.8)$$

$$J_{sm} = A^* T^2 \cdot \exp \left[\frac{-q(\Phi_B)}{kT} \right] \cdot \exp \left(\frac{qV}{kT} \right) \quad (2.9)$$

A^* = Richardson Sabiti, q = Elektronik yük, m^* = Taşıyıcının etkin kütlesi,

k = Boltzmann sabiti, h = Planck sabiti, T = Sıcaklık, V = Potansiyel,

Φ_B = Engel yüksekliği.

Metalden yarıiletkene doğru hareket eden elektronların engel yüksekliğinin aynı kalmasından dolayı yarıiletkende akım yoğunluğu uygulanan voltajdan etkilenmez. Bu akım yoğunluğu denge halinde ($V=0$), yarıiletkenden metale doğru geçen akım yoğunluğuna eşittir. Buna göre metalden yarıiletkene akan akım denklem 2.10 şeklinde yazılabilir.

$$J_{ms} = -A^*T^2 \cdot \exp\left[\frac{-q(\Phi_B)}{kT}\right] \quad (2.10)$$

J_{ms} = Elektronların yarıiletkenden metale doğru oluşturduğu akım yoğunluğu,

q = Elektronik yük, A^* = Richardson Sabiti, T = Sıcaklık, k = Boltzmann sabiti,

Φ_B = Engel yüksekliği.

Toplam akım yoğunluğu denklem 2.9 ve denklem 2.10 eşitliklerinin toplamı olup, denklem 2.11 şeklinde yazılabilir.

$$J = \left[A^*T^2 \cdot \exp\left(\frac{-q(\Phi_B)}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.11)$$

$A^*T^2 \cdot \exp\left(\frac{-q(\Phi_B)}{kT}\right)$ = Doyum yoğunluğu.

“ n ” idealite faktörü, ideal diyottan olan sapmaları tespit etmek için tanımlamıştır. Termoyonik Emisyon teorisinden yola çıkarak, yarı logaritmik akım-gerilim eğrilerinin eğiminden hesaplanan idealite faktörleri çoğunlukla birden büyük ($n > 1$) olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle Termoyonik Emisyon Teorisi’ne göre hesaplanan potansiyel engelinin yüksekliği, sıcaklık arttıkça artış gösterir. İdealite faktörlerinin birden büyük ($n > 1$) olmasının önemli nedenleri vardır. Birincisi, yarıiletken ve metal arasındaki ince oksit tabakanın yer almasıdır. İkinci olarak, yeterince düşük sıcaklıklarda ya da yüksek katkılı yarıiletkenlerde gerçekleşen tünelleme akımıdır. Üçüncü olarak, ara yüzeyde oluşan elektrik alandan ötürü sanal Schottky engelinin azalması ($\Delta\Phi_B$) ve dördüncüsü ise uzay yük bölgesinde oluşma-yeniden birleşme akımlarıdır. Bu önemli

dört neden Schottky kontaklarının durumlarını (ara yüzey tabakası, yüksek katkılanma uzay yük bölgesindeki tuzaklar, yüksek elektrik alan) yarıiletken ile metal arasındaki ara yüzeyin atomik mertebede tamamen düzgün olmadığı ve çoğunlukla uzaysal bir homojensizliğe sahip olduğu gösterir [14].

2.6.2. Difüzyon Teorisi

Düşük seviyedeki mobiliteye sahip yarıiletkenlerde akım iletimi difüzyon teorisiyle ifade edilebilir.

Difüzyon; aralarında yük konsantrasyonu farkı olan iki bölge arasında oluşur, konsantrasyonu çok olan bölgeden az olan bölgeye doğru gerçekleşen yüklerin geçişlerine denir. Schottky tarafından tanımlanan difüzyon teorisinin dayandığı varsayımlar;

- a) Potansiyel engelin yüksekliği kT/q enerjisinden büyüktür.
- b) Tüketim bölgesindeki elektronların çarpışma etkisi ihmal edilemez, boşluklar tüketim bölgesinde çarpışmalara uğrar ve ortalama serbest yolları tüketim bölgesi genişliğinden küçüktür.
- c) $x = w$ ve $x = 0$ 'daki taşıyıcı konsantrasyonları akımdan etkilenmemişler, yani onlar termal denge değerindedirler.
- d) Yarıiletkenin safsızlık konsantrasyonunun dejenere değildir. Bu varsayımlara dayanarak tüketim bölgesindeki akım, bölgesel alan ve konsantrasyon farkına bağlı olduğu için akım yoğunluğu eşitliğinden faydalanılır. Bu eşitlik metal/ n -tipi yarıiletken kontaklar için,

$$J_x = J_n = q \left[n(x) \mu E(x) + D_n \frac{\partial n}{\partial x} \right] \quad (2.12)$$

$$J_x = q D_n \left[\left(\frac{-qn(x)}{kT} \right) \left(\frac{\partial V(x)}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial n}{\partial x} \quad (2.13)$$

$n(x)$ = Elektron yoğunluğu, μ = Elektron mobilitesi, D_n = Elektron difüzyon sabiti,

$E(x)$ = Schottky bölgesindeki elektrik alanı, q = Elektronik yük,

T = Sıcaklık, k = Boltzmann sabiti.

biçimindedir. Böylece difüzyon kuramında akım ifadesini denklem 2.14 eşitliğindeki gibi yazabiliriz.

$$J_x = J_{SD} \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.14)$$

J_{SD} = Doyma akımı, T = Sıcaklık, k = Boltzmann sabiti.

J_{SD} , denklem 2.15 eşitliğindeki gibi ifade edilebilir.

$$J_{SD} = A \left(\frac{q^2 N_c D_n}{k_B T} \right) \left[\frac{2q(V_d - V) N_D}{\epsilon_S} \right]^{1/2} \exp\left(\frac{-q\Phi_b}{k_B T}\right) \quad (2.15)$$

J_{SD} = Doyma akımı, V_d = Difüzyon gerilimi, ϵ_S = Yarıiletken dielektrik sabiti,

D_n = Elektron difüzyon sabiti, N_c = İletkenlik bandı kıyısındaki elektron yoğunluğu,

N_D = Verici yoğunluğu, V = Potansiyel, k = Boltzmann sabiti,

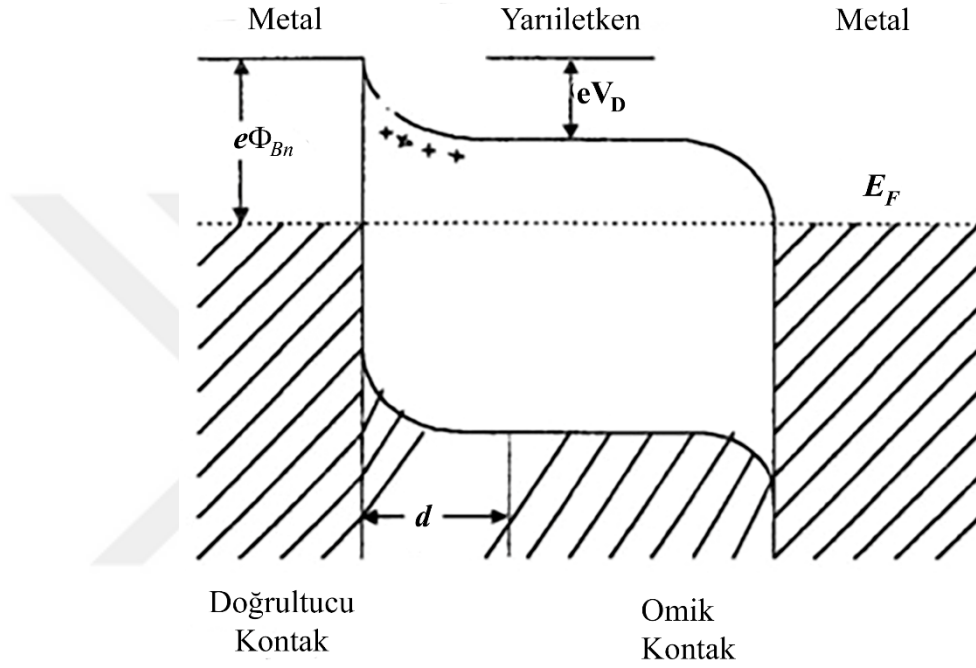
T = Sıcaklık, q = Elektronik yük.

Difüzyon Teorisi ve Termioyonik Emisyon Teorisi'nden elde edilen sonuçlar birbirine çok benzerlerdir. Bunun yanında difüzyon teorisindeki doyma akım yoğunluğu (J_{SD}), gerilim ile çok daha hızlı değişir. Fakat Termioyonik Emisyon doyma akım yoğunluğuna göre sıcaklığa daha az bağlıdır [18].

2.7. Schottky Diyotlar

Yarıiletken ile metal arasında doğrultucu bir kontak meydana geldiği zaman bir Schottky kontak veya Schottky diyot oluşur. 1874 yılında F. Braun tarafından metal/yarıiletken arasındaki doğrultucu etki ilk olarak keşfedilmiş olup, 1938 yılında Schottky ve Mott tarafından açıklanmıştır. Bir metal ile bir yarıiletken temas ettirildiğinde, bu iki malzeme arasında Fermi enerji seviyeleri eşit olana kadar bir yük alışverişi olur. Termal denge sonucunda yeni bir yük dağılımı meydana gelir. Yük alışverişi metalden yarıiletkenine doğru olup, bu durum iki malzeme arasında bir potansiyel değişimi meydana getirir. Sonuç olarak bir Schottky kontağı oluşmuş olur. Metal/ n -tipi yarıiletken metal $n + nM$ yapısı; n -tipi yarıiletkenin bir yüzeyine elektron

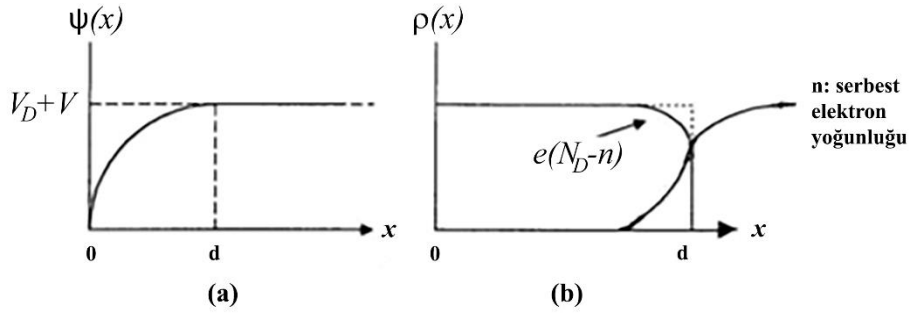
bakımından zengin $n + n$ omik kontağı ile diğer yüzeyine uygulanan nM doğrultucu kontağından oluşmaktadır. Termal dengede bunun gibi bir yapının enerji-bant grafiği Şekil 2.17’de görülmektedir. Bu yapının $n +$ omik kontak tarafı $V < 0$ olacak şekilde beslendiği zaman yapı doğru beslemede olur ve $n +$ tarafı $V > 0$ olacak şekilde beslendiğinde yapı ters beslemede olur. $n + nM$ yapısı diyot özelliğine sahip bir yapıdır. Bunun gibi bir yapıyı kısaca yarıiletken diyot olarak tanımlarız [16].



Şekil 2.17. $n+nM$ yarıiletken diyot yapısının termal dengede enerji-bant grafiği [19].

2.8. Metal Yarıiletken Schottky Diyotlarında Schottky Kapasitesi

Metal/yarıiletken yapılarda tüketim bölgesi birbirine ters yüklenmiş metal tarafındaki yüzey yükleriyle ve yarıiletken tarafındaki uzay yükleriyle bir kondansatör gibi davranır. Ters beslemede gerilim artırmasından dolayı yarıiletkenin iletim bandındaki elektronlar metalden ayrılırlar ve buna bağlı olarak voltajın artmasından dolayı tüketim bölgesinin genişliğinde artar. Kontakın yarıiletken tarafında metale yakın önemli bir boşluk yoğunluğu oluşmuşsa yeni bir Fermi enerji seviyesi metaldeki Fermi enerji seviyesi ile çakışacağından boşluk yoğunluğu azalacaktır.



Şekil 2.18. Metal/n- tipi yapılar da doğrultucu kontağın; (a) Potansiyel dağılım eğrisi (b) Yük dağılım eğrisi [19].

Bu yük değişiminden dolayı, Schottky bölgesinin kapasitesi değişecektir. Bu özelliğinden dolayı Schottky diyotları voltaj kontrollü değişebilen sığalar olarak kullanılabilirler. Schottky bölgesinin kapasitesini hesaplayabilmek için diyotun engel tabakasındaki potansiyel dağılımının Poisson eşitliği denklem 2.16 eşitliği gibi ifade edilebilir.

$$\nabla^2 \psi(x) = \frac{d^2 \psi}{dx^2} = \frac{-\rho(x)}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (2.16)$$

$\rho(x)$ = Uzay yük yoğunluğu, $\psi(x)$ = Potansiyel fonksiyonu,

ϵ_s = Yarıiletken dielektrik sabiti, ϵ_0 = Boşluğun dielektrik sabiti.

Konuma bağlı yük yoğunluğu denklem 2.17 eşitliği gibi yazılabilir.

$$\rho(x) = e(N_D - n) \quad (2.17)$$

N_D = n-tipi yarıiletkenin donör yoğunluğu, $\rho(x)$ = Uzay yük yoğunluğu,

n = Yarıiletkenin iletkenlik bandının elektron yoğunluğu.

Şekil 2.18 'de uzay yük yoğunluğu $\rho(x)$ ile potansiyel fonksiyonu $\psi(x)$ 'in konuma göre değişimleri gösterilmiştir.

Engel yüksekliği difüzyon potansiyelini V_D ve kontağa bağlı potansiyelini $-V$ göstermek üzere $e(V_D - V) \gg kT$ olduğundan $0 \leq x \leq d$ bölgesinde elektronlar d uzunluğunda Debye difüzyon uzunluğu ile verilen bölgede kısmi olarak bulunur

olacaktır. Dolayısıyla n -tipi için $N_D \geq n$ olduğundan uzay yük yoğunluğu için denklem 2.18 eşitliği değeri yazılabilir.

$$\rho(x) \cong eN_D \quad (2.18)$$

Bu değer Poisson denkleminde kullanılırsa denklem 2.19 eşitliği gibi olur.

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{eN_D}{\epsilon_S\epsilon_0} \quad (2.19)$$

ϵ_S = Yarıiletken dielektrik sabiti, ϵ_0 = Boşluğun dielektrik sabiti.

Bu son denklemin çözümü şu sınırlar altında aranabilir.

- 1) $x = 0$ için, $\psi(x) = 0$
- 2) $0 \leq x \leq d$ için, $\psi(x) = V_D \pm V$
- 3) $x = d$ için, $\frac{d\psi(x)}{dx} = 0$

Denklem 2.19 için üçüncü sınır şartı göz önünde bulundurularak, integrali alınırsa tüketim bölgesi elektrik alanı elde edilebilir.

$$E(x) = -\frac{d\psi}{d(x)} = -\frac{eN_D}{\epsilon_S\epsilon_D}(x - d) \quad (2.20)$$

Bu ifadenin birinci sınır şartlarında integrali alınırsa,

$$\psi(x) = -\frac{eN_D}{\epsilon_S\epsilon_D}\left(\frac{1}{2}x^2 - xd\right) \quad (2.21)$$

bulunur. Bu son eşitliğin de çözümü ikinci sınır şartı altında aranırsa,

$$d = \left[\frac{2\epsilon_S\epsilon_0}{eN_D}(V_D \pm V)\right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.22)$$

bulunur. Bu da Schottky bölgesidir. Burada $V > 0$ için kontak ters, $V < 0$ için kontak doğru beslemedir. Yarıiletkende birim alan başına düşen yük yoğunluğu,

$$Q = eN_D d \quad (2.23)$$

ile verilir. Denklem 2.21 ve 2.22 eşitliklerinden denklem 2.24 eşitliği elde edilebilir.

$$Q = [2\varepsilon_S\varepsilon_0eN_D(V_D \pm V)]^{\frac{1}{2}} \quad (2.24)$$

Bu uygulanan gerilim yükün değişimi olarak tanımlanır. Böylece kapasite,

$$C = \frac{\partial Q}{\partial V} \quad (2.25)$$

olarak yazıldığında Q ve V değerleri yerine yazılırsa,

$$C = \left[\frac{\varepsilon_S\varepsilon_0eN_D}{2(V_D+V)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.26)$$

veya

$$C = \frac{\varepsilon_S\varepsilon_0}{d} \quad (2.27)$$

ε_S = Yarıiletken dielektrik sabiti, ε_0 = Boşluğun dielektrik sabiti,

d = Yalıtkan tabaka kalınlığı.

olarak bulunabilir. Buradan tüketim bölgesi kapasitesi, uygulama voltajı ve Schottky bölgesinin genişliği ile ters, donör yoğunluğu ile doğru orantılı olduğu anlaşılır [19]. Bu ifade denklem 2.28 eşitliği şeklinde yazılabilir.

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_D \pm V)}{e\varepsilon_S\varepsilon_0N_D A^2} \quad (2.28)$$

$1/C^2$ 'nin V 'ye göre eğrisi doğrusaldır. Doğrunun V eksenini kestiği nokta V_D difüzyon potansiyelidir. $1/C^2$ 'nin türevi alınıp N_D çekilirse denklem 2.29 elde edilir.

$$N_D = \frac{2}{e\varepsilon_S\varepsilon_0} \frac{dV}{d(1/C^2)} \quad (2.29)$$

N_D = Donör yoğunluğu, ε_S = Yarıiletken dielektrik sabiti,

ε_0 = Boşluğun dielektrik sabiti, d = Yalıtkan tabaka kalınlığı, C = Kapasite.

2.9. MIS (Metal Insulator Semiconductor) Yapılar

Bardeen modelinin açıklamasına göre, metal ve yarıiletkenden kontak oluşturduğu zaman oluşan arayüzey durumları, yalıtkan tabaka ile yarıiletken yüzeyi arasında lokalize olurlar. Bu yüzden metal ya da yarıiletkende elektrik alan yoksa, arayüzey tabakasındaki elektrik alanın büyüklüğü, ara yüzeydeki ve metal yüzeydeki yüklerle ilgilidir. Gauss yasasına göre denklem 2.30 ifadesi elde edilebilir.

$$\varepsilon_i E_i = Q_{SS} = -Q_m \quad (2.30)$$

E_i = Arayüzey tabakasının elektrik alanı, Q_{SS} = Yarıiletken üzerindeki yüzey yükü,

Q_m = Metal üzerindeki yüzey yükü, ε_i = Yalıtkan dielektrik sabiti.

Normalde elektrik alan, Schottky engelinde vardır ve burada önemli olan da bu alanın engel yüksekliğinin nasıl etkilediğini bulmaktır. Eğer yarıiletken içinde bir E_S alanı varsa, bu durumda Gauss yasası denklem 2.31 şeklinde yazılabilir.

$$V_i = \frac{\delta}{\varepsilon_i} (\varepsilon_S E_{mak} + Q_{SS}) \quad (2.31)$$

V_i = Arayüzey tabakasındaki potansiyel düşmesi, ε_i = Yalıtkan dielektrik sabiti,

Q_{SS} = Yarıiletken üzerindeki yüzey yükü, ε_S = Yarıiletken dielektrik sabiti,

E_{mak} = Arayüzey tabakasındaki elektrik alanının en büyük değeri,

δ = Arayüzey tabakasının kalınlığı.

İdealite faktörünün (n) arayüzey parametrelerine (arayüzey hal yoğunluğu ve arayüzey tabaka kalınlığı) ve uygulama gerilimine bağlılığı incelenmiştir. Böylece, evvela bütün arayüzey durumlarının metalle dengede olduğu dikkate alınmalıdır. Yarıiletkenin yüzey tüketim tabakasının ve arayüzey tabakasının var olduğu bir durumda V uygulama gerilimi için denklem 2.32 yazılabilir.

$$V = V_i + V_S \quad (2.32)$$

V_S = Voltaj değişimi.

Burada V_s tüketim bölgesi nedeniyle meydana gelen voltaj değişimidir.

$$I = A \cdot A^* T^2 \cdot \exp\left(\frac{q\phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.33)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu denklem 2.33 eşitliğinin her iki tarafının logaritması alınarak V 'ye göre türev alınacak olursa denklem 2.34 elde edilir.

$$\frac{d \ln I}{dV} = \frac{1}{I} \cdot \frac{dI}{dV} = \frac{q}{kT} \left[1 - \frac{d\phi_b}{dV} + \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]^{-1} \right] \quad (2.34)$$

Düz besleme durumunda $\ln I - V$ eğrisinin doğrusal kısmının eğimi n idealite faktörünü verdiği için denklem 2.34 eşitliğinden denklem 2.35 ifadesi bulunur.

$$n = \frac{q}{kT} \cdot \frac{dV}{d \ln I} = \frac{1}{1-\beta} \quad (2.35)$$

Bu ifadede $\beta = d\phi_b/dV$ ile tanımlıdır. Böylece idealite faktörü için denklem 2.36 eşitliği yazılabilir.

$$\frac{1}{n} = 1 - \frac{d\phi_b}{dV} \quad (2.36)$$

Schottky diyotlarda ϕ_b engel yüksekliği birinci derecede deplasyon bölgesindeki elektrik alana bağlı olduğu için, engel yüksekliği ϕ_b yerine etkin engel yüksekliği ϕ_e olarak alınmalıdır. Etkin engel yüksekliği denklem 2.37 ifadesi ile verilir.

$$\phi_e = \phi_b + \left(\frac{d\phi_e}{dV}\right)V = \phi_b + \beta \quad (2.37)$$

ϕ_b = Engel yüksekliği, ϕ_e = Etkin engel yüksekliği.

Bu ifadede etkin engel yüksekliğinin (ϕ_e) besleme voltajına bağlı olarak değişimidir. Yine denklem 2.36 ve 2.37 eşitliklerinden görüleceği gibi $\beta = d\phi/dV$ şeklindedir. Bu eşitlik dikkate alınarak denklem 2.34 eşitliği aşağıdaki gibi denklem 2.38 şeklinde yazılabilir.

$$I = I_0 \cdot \exp\left(\frac{-\beta qV}{kT}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.38)$$

Burada, doyma akımı (I_0) denklem 2.39 eşitliği şeklinde verilir.

$$I_0 = A.A^*.T^2. \exp\left(\frac{-q\phi_b}{kT}\right) \quad (2.39)$$

I_0 = Doyma akımı, T = Sıcaklık, A^* = Richardson Sabiti.

Şayet $d\phi/dV$ sabit ise idealite faktörü de (n) sabittir. n idealite faktörünün birden büyük değerler alması, uygulama voltajının sadece deplasyon (tüketim) tabakası üzerinde düşmediğini, ancak arayüzey tabakası, deplasyon bölgesi ve gövde direnci arasında bölüşüldüğünü göstermektedir.

Şimdi, denklem 2.36 ifadesi ve denklem 2.40 eşitliği dikkate alınır, denklem 2.31 eşitliğinin uygulama gerilimine göre türevi alınarak denklem 2.41 ifadesi elde edilir.

$$\left(\frac{d\phi_b}{dV} = \frac{d\phi}{dV}\right) = \left(\frac{dV_i}{dV}\right) \quad (2.40)$$

$$\left(1 - \frac{1}{n}\right) = \frac{dV_i}{dV} = \frac{\delta}{\varepsilon_i} \left(\varepsilon_s \frac{dE_{mak}}{dV} + \frac{dQ_{ss}}{dV}\right) \quad (2.41)$$

Denklem 2.33 ifadesi kullanılarak denklem 2.42 ifadesi elde edilir.

$$\frac{dE_{mak}}{dV} = \frac{dE_{mak}}{dV_s} \cdot \left(1 - \frac{dV_i}{dV}\right) = \frac{1}{nw} = \frac{1}{w} \frac{dV_s}{dV} \quad (2.42)$$

dQ_{ss}/dV ifadesi denklem 2.43 ile verilmektedir.

$$\frac{dQ_{ss}}{dV} = \frac{dQ_{sa}}{dV_i} \frac{dV_i}{dV} = -qN_{sa} \left(1 - \frac{1}{n}\right) \quad (2.43)$$

w = Yarıiletkenin tüketim tabakası kalınlığı $(2\varepsilon_i(V_d/qN_D))^{1/2}$,

Q_{sa} = Arayüzey yük konsantrasyonu, N_{sa} = Arayüzey durum yoğunluğu,

N_D = yarıiletkendeki verici konsantrasyonu, V_d = Difüzyon potansiyeli.

Denklem 2.43 ifadesi, metalle dengede olan işgal edilmiş arayüzey durumlarındaki değişimi verir ve metalin Fermi enerji seviyesine göre hollerin enerjisindeki değişim olan dV_i ile hesaplanır ve $(dQ_{sa}/dV_i) = -qN_{sa}$ ifadesi yazılabilir. Denklem 2.42 ve 2.43 eşitlikleri denklem 2.39 'da yerine yazılacak olursa,

$$\left(1 - \frac{1}{n}\right) = \frac{\delta}{\varepsilon_i} \left[\frac{\varepsilon_s}{lnw} - qN_{sa} \left(1 - \frac{1}{n}\right) \right] \quad (2.44)$$

ve buradan da,

$$n = 1 + \frac{\delta \varepsilon_s}{w(\varepsilon_s + \delta q N_{sa})} \quad (2.45)$$

w = Yarıiletkenin tüketim tabakası kalınlığı, ε_s = Yarıiletken dielektrik sabiti,

N_{sa} = Arayüzey durum yoğunluğu, δ = Arayüzey tabakasının kalınlığı.

bulunur. Buradan arayüzey durumlarının metalle dengede olduğu durum için elde

edilmiştir.

Arayüzey durumlarının yarıiletkenle denge durumunda olması halinde, arayüzey durum yük yoğunluğu Q_{sb} ve arayüzey durum yoğunluğu N_{sb} alınarak, denklem 2.43 ifadesi denklem 2.46 şeklinde yazılabilir.

$$\frac{dQ_{ss}}{dV} = \frac{dQ_{sb}}{dV_s} \cdot \frac{dV_s}{dV} = \frac{qN_{sb}}{n} \quad (2.46)$$

Denklem 2.46 ifadesi, yarıiletkenle dengede olan işgal edilmiş arayüzey durumlarındaki değişimi verir ve yarıiletkenin Fermi enerji seviyesine göre durumların enerjisindeki değişimi olan dV ile belirlenir. Bu nedenle $(dQ_{sb}/dV_s) = qN_{sb}$ eşitliği yazılabilir. Denklem 2.41 ve 2.46 ifadeleri 2.39 'da yerine yazacak olursak,

$$\left(1 - \frac{1}{n}\right) = \frac{\delta}{\varepsilon_i} \left[\frac{\varepsilon_s}{lnw} + \frac{qN_{sb}}{n} \right] \quad (2.47)$$

ve buradan da,

$$n = 1 + \frac{\delta}{\varepsilon_i} \left[\frac{\varepsilon_s}{w} + qN_{sb} \right] \quad (2.48)$$

δ = Arayüzey tabakasının kalınlığı, w = Yarıiletkenin tüketim tabakası kalınlığı,

q = Elektronik yük, N_{sb} = Yarıiletkenle dengede olan arayüzey yük yoğunluğu,

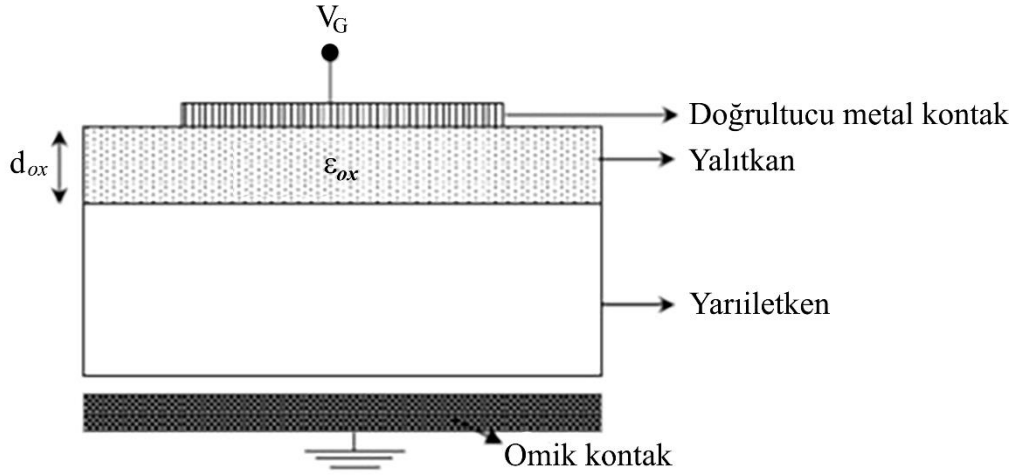
ε_i = Yalıtkan dielektrik sabiti, ε_s = Yarıiletken dielektrik sabiti.

elde edilir [20].

2.10. MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) Yapılar

Metal/oksit/yarıiletken (MOS) yapılar, yarıiletken ile metal tabakalar arasına yalıtkan bir tabakanın doğal ya da yapay bir oksidasyon yöntemi kullanarak oluşturulur. Yalıtkan oksit tabakasının dielektrik özelliğinden dolayı (MOS) yapı, paralel levhali bir sığaya benzemektedir. Metal olarak genelde altın (Au), alüminyum (Al) gibi yüksek saflıktaki metaller kullanılırken yarıiletken olarak silisyum dioksit (SiO_2), kalay dioksit (SnO_2) gibi yalıtkanlar kullanılır. Yarıiletken ile metal arasına oluşturulan yalıtkan tabaka hem metal ve yarıiletkeni birbirinden izole eder hem de yük geçişlerini düzenler [21]. Bu yapıların hazırlanmasında yarıiletkenin p -tipi ve n -tipi olmasına göre metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları, metal ile yarıiletkenin arasında bir potansiyel engel oluşacak uygunlukta seçilmelidir.

Bir MOS yapının şematik gösterimi Şekil 2.19'da gösterilmiştir. Paralel levhali bir kondansatöre benzeyen MOS yapılarda, levhalardan birisinin metal diğerinin yarıiletken olmasından dolayı asimetrik kondansatör olarak tanımlanır. Burada d_{OX} (oksit) kalınlığı, ϵ_{OX} oksit (yalıtkan) dielektrik sabiti V_G gerilimi metal plaka omik kontağa göre pozitif bir gerilim ile beslendiğinde negatiftir. Paralel levhali kondansatörde olduğu gibi bu yapının belirgin özellikleri oksit ve oksit-yarıiletken ara yüzey (oxide-semiconductor interface) özellikleri tarafından belirlenmektedir. Bu arayüzey oksitlenmiş yalıtkan tabaka yarıiletkeni ile metal birbirinden ayırır ve yarıiletken ile metal arasındaki yük geçişlerini düzenler. Bunun için yapıdaki oksit tabakanın çok kaliteli olmasının yanı sıra oksit ile yarıiletken arayüzeyindeki doymamış bağların (dangling band) en az düzeyde olması aranan niteliklerdendir. Oksidasyon anında uygulamaya bağlı olarak oluşan, hareketli iyonlar, tuzaklar (traps), sabit oksit ve ara yüzey yüklerinin bulunması ve doymamış bağlardan veya safsızlıklardan (impurity) kaynaklanan oksit-yarıiletken ara yüzeyindeki arayüzey durumları MOS yapısının özelliklerini değiştirmekte, bu nedenle MOS yapısının ideal özelliklerinden sapmasına neden olmaktadır.



Şekil 2.19. Bir MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) yapının şematik gösterimi [21].

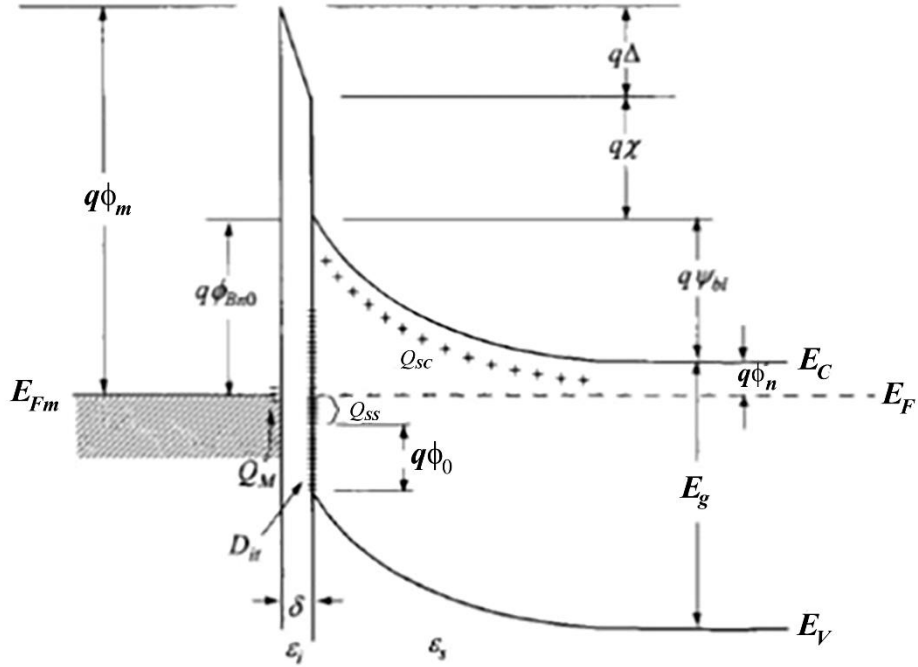
Dielektrikler yani elektriksel olarak yalıtkan olan maddeler, uygulanan bir alternatif elektrik alandan etkilenirler. Bu alternatif elektrik alan etkisi ile dielektrik maddedeki pozitif ve negatif yükler meydana gelen elektrostatik kuvvet altında ters yönlerde küçük yer değiştirirler. Böylece, elektrik yük merkezleri kayar ve elektriksel kutuplaşma meydana gelir. Dielektrik madde bütün olarak yük açısından nötr olmakla birlikte polarize olur. Kutuplaşma neticesinde, dielektrik madde elektrik dipol momentini elde eder. Oluşan bu dipoller, sayesinde dielektrik yüzeyinde elektriksel yük yığılması oluşur. Bu özelliğinden dolayı dielektrik maddeler sığa imalatında kullanılırlar. Frekans ve sıcaklıktaki değişim MOS yapıların dielektrik ve elektrik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [22].

2.11. Aygıt Karakterizasyonu

Schottky diyotları alçak katkı safsızlıklarına ve yüksek eklem engellerine sahip aygıtlardır. *n*-tipi bir yarıiletken için Schottky eklemının detaylı bir engel yapısı Şekil 2.20'da verilmiştir. Bir metal ile bir yarıiletkenin oluşturduğu bu eklem iki varsayıma dayanır [23].

Birincisi; elektronlar için geçirgen özelliğe sahip bir arayüzey tabakasının, bir metal ile bir yarıiletkenin arasında olması, ikincisi ise; bu tabakadaki yüzey durumlarının metalden bağımsız olup sadece yarıiletkenin bir özelliği olmasıdır. Kontak sağlanmadan önce $q\Phi_0$ yüzey enerjisi Fermi seviyesi ile aynı yerde olup, yük nötralliğinden dolayı bu seviyeler doludur.

Şekil 2.20 'deki gösterimler sırasıyla; Fermi enerjisi (E_F), metalin iş fonksiyonu ($q\Phi_m$), sıfır besleme engel yüksekliği ($q\Phi_{B0}$), engel yüksekliği ($q\Phi_B$), metal üzerindeki yüzey yükü (Q_m), yarıiletken üzerindeki yüzey yükü (Q_{SS}), yarıiletkenin tüketim tabakasındaki uzay yükü (Q_{SC}), yüzeydeki enerji seviyesi ($q\Phi_0$), engel alçalması ($q\Delta\Phi_B$), arayüzey potansiyeli ($q\Delta$), yarıiletkenin elektron yatkinlığı (χ_{yi}), difüzyon potansiyeli (V_d) ve yarıiletkenin yasak enerji band aralığı (E_g)'dir.



Şekil 2.20. n -tipi bir MS kontakın detaylı enerji-bant diyagramı [23].

2.11.1. Kapasitans-Gerilim (C-V) Karakteristikleri

Metal/yarıiletken kontaklardaki metal tarafında bulunan negatif yüzey yükleri ile yarıiletken tarafındaki iyonize olmuş alıcıların oluşturduğu tüketim bölgesi bir kondansatör gibi davranır. Yapıya ters besleme uygulandığında yapının tüketim bölgesi genişler ve bu bölgede yük değişimleri meydana gelir ki, bu da kapasitede değişimlere sebep olur. Schottky yapılara ters besleme uygulandığında değişime uğrayan Schottky kapasitesinden önemli diyot parametreleri elde edilir. Bir yarıiletkende yük yoğunluğu (birim alan başına düşen yük) denklem 2.49 eşitliği ile verilir.

$$Q = qN_A W_D = \sqrt{2\epsilon_s q N_A (V_d \pm V)} \quad (2.49)$$

q = Elektronik yük, N_A = Taşıyıcı yoğunluğu, W_D = Tüketim bölgesi,

V_d = Difüzyon potansiyeli, ϵ_s = Yarıiletkenin elektrik geçirgenliği.

Ekleme küçük bir AC sinyal uygulandığında, yük değişimleri sonucu küçük bir sinyal ortaya çıkar. Bu kapasite, tüketim kapasitesi olup denklem 2.50 eşitliği ile tanımlanabilir.

$$C = \frac{dQ}{dV} \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_A}{2(V_d+V)}} \quad (2.50)$$

Denklem 2.50 ifadesinden görüldüğü gibi eklem kapasitesi, uygulanan gerilim ile ters taşıyıcı yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Taşıyıcı yoğunluğu oranı arttığında eklem kapasitesi de artacaktır. Denklem 2.51 eşitliği ise denklem 2.50 ifadesinin ters çevrilip karesi alınmış haldir.

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_d+V)}{q\epsilon_s N_A} \quad (2.51)$$

Bu ifadeye göre $1/C^2 - V$ eğrisinin düz bir doğru olması beklenir. Bu doğrunun eğimi bize taşıyıcı yoğunluğunu yani bir başka deyişle yarıiletkene yerleştirilmiş katkı atomlarının yoğunluğunu (N_A) vermekte olup denklem 2.52 eşitliği ile ifade edilir.

$$\frac{d(1/C^2)}{dV} = \frac{2}{q\epsilon_s N_D} \quad (2.52)$$

Eğrinin gerilim eksenini kestiği nokta (V_0),

$$V_0 = V_d - \frac{kT}{q} \quad (2.53)$$

k = Boltzman sabiti, T = Kelvin cinsinden sıcaklık, q = Elektronik yük,

V_d = Difüzyon potansiyeli.

ifadesi yardımıyla yapının difüzyon potansiyelini verir [23].

2.12. Düşük ve Yüksek Frekans Kapasitans Yöntemi ile Arayüzey Durumlarının Bulunması

Kapasite ölçümleri kullanılarak yapılan hesap tekniklerinden birisi yüksek-düşük frekans kapasite yöntemidir. Bu yöntemde yüksek frekans (C_{HF}) ve düşük frekans (C_{LF}) ölçüm değerleri kullanılarak yüzey durumları denklem 2.54 eşitliği kullanılarak elde edilir.

$$N_{SS} = \left(\frac{C_{LF}}{C_{OX}-C_{HF}} - \frac{C_{HF}}{C_{OX}-C_{LF}} \right) \quad (2.54)$$

C_{OX} = Oksit kapasitesi, N_{SS} = Arayüzey Durumları,

C_{HF} = Yüksek frekans ölçüm değeri, C_{LF} = Düşük frekans ölçüm değeri.

Oksit kapasitesi yüksek frekans ve kuvvetli akümülyasyonda sabit maksimum kapasiteye eşittir. Denklem 2.55 ifadesinde A kontak alanını, ϵ_{OX} oksit tabakasının dielektrik sabitini, ϵ_0 boşluğun elektrik geçirgenliğini ve d_{OX} ise oksit tabakası kalınlığını tanımlamaktadır.

$$C_{OX} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{OX} A}{d_{OX}} \quad (2.55)$$

C_{OX} = Oksit kapasitesi, A = Kontak alanı,

ϵ_{OX} = Oksit tabakasının dielektrik geçirgenliği (sabiti),

ϵ_0 = Boşluğun dielektrik geçirgenliği, d_{OX} = Oksit tabakası kalınlığı.

Arayüzey durumlarını tayin etmekte kullanılan bir diğer yöntem de Chattopadhyay yöntemidir. Bu yöntemde elde edilen deneysel ölçüm değerleriyle yarıiletkenlerde bulunan arayüzey durumlarının enerji dağılımı elde edilir.

Yarıya bir AC sinyali uygulandığında tüketim tabakası yük yoğunluğu, yüzey potansiyeli ve tünelleme akım yoğunluğu değişir. Düşük frekanslarda arayüzey durumları bu sinyali takip eder ve kapasite denklem 2.56 eşitliği ile ifade edilebilir.

$$C_{LF} = \frac{dQ_{sc}}{dV} - \frac{dQ_{it}}{dV} \quad (2.56)$$

Q_{sc} = Uzay yükü, Q_{it} = Arayüzey durumu yükleri, C_{LF} = Düşük frekans ölçüm değeri.

Yüksek frekanslarda yüzey durumları uygulanan AC sinyali takip edemez ve kapasite,

$$C_{HF} = \frac{\sqrt{\frac{q\epsilon_s N_A}{2\Psi_s}}}{\left(1 + \frac{qJR_s}{kT} + \frac{\delta}{\epsilon_{ox}} \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_A}{2\Psi_s}}\right)} \quad (2.57)$$

Ψ_s = Yüzey potansiyeli, R_s = Seri direnç, J = Akım yoğunluğu,

C_{HF} = Yüksek frekans ölçüm değeri.

şeklinde ifade edilir. Ψ_s yüzey potansiyeli denklem 2.58 eşitliği ile tanımlanabilir.

$$\Psi_s(V) = \Phi_B - C_2V - \Phi_F \quad (2.58)$$

$C_2 = (1/C^2)$ – V eğrisinin eğim parametresi, Φ_B = Engel Yüksekliği,

Ψ_s = Yüzey potansiyeli.

Denklem 2.55 ve 2.56 ifadeleri kullanılarak arayüzey durum yoğunluğu denklem 2.59 eşitliği ile tanımlanabilir.

$$N_{ss} = \frac{1}{q} \cdot \frac{C_{OX}}{C_{HF}} \cdot \frac{C_{HF} - C_{LF}}{C_{LF} - C_{OX}} \cdot \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_A}{2\Psi_s}} \quad (2.59)$$

N_A = Alıcı atomlarının yoğunluğu, q = Elektronik yük, C_{OX} = Oksit kapasitesi,

C_{HF} = Yüksek frekans ölçüm değeri, C_{LF} = Düşük frekans ölçüm değeri,

N_A = Taşıyıcı yoğunluğu, ϵ_s = Yarıiletkenin elektrik geçirgenliği,

Ψ_s = Yüzey potansiyeli [23].d

2.13. Maser-Laser

Birçok bilim adamının çabası ile 1950'lerin başında Maser denilen önemli bir aygıt yapıldı. 1964'te Fizik Nobel Ödülünü paylaşan A.B.D'den C.H. Townes ile S.S.C.B'den Prokhorov ve Basov bu bilim adamları arasında en ünlüleri idi. Son derece alçak gürültülü mikrodalga yükseltici anlamına gelen MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) İngilizce sözcüklerinin baş harflerinin alınmasıyla Maser sözcüğünün Türkçe 'de kullanılmıştır. Madde ile ışığın enerjisinin kuantum mekaniksel olarak etkileşiminin doğrudan kullanılmasıyla o zamanlarda bilinenin dışında bir tarzda çalışıyordu. Maserin kullanılmaya başlamasından hemen sonra bu tekniğin optik bölgede uygulanıp uygulanamayacağı tartışılmaya başlandı. 1958'lerde Townes ve Schawlow, LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)'ı elde edebilmek için gereken genel fiziksel koşulları öne sürdükten sonra 1960'ta bir laserin ilk başarılı işleyişi duyuruldu. Böylece optiğin en önemli buluşlarından biri gerçekleşmiş oldu.

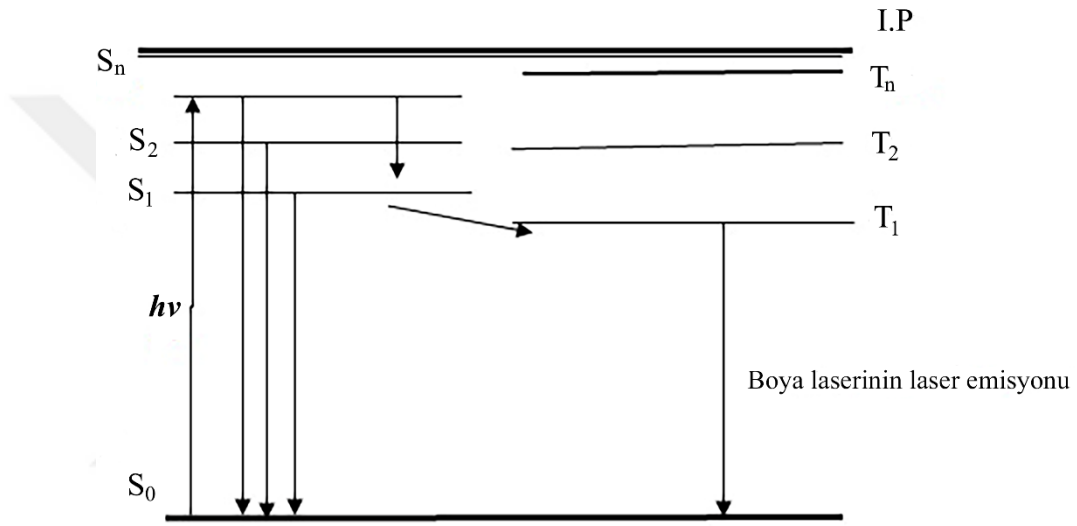
Laser ışığının önemli bazı özellikleri aşağıdaki gibidir.

1. Laser ışığı çok az dağılan bir ışıktır.
2. Laser ışını monokromatiktir. Hemen hemen tek frekanslıdır. Bir elektromanyetik dalganın tek frekanslı olması elektromanyetik dalganın üretim tekniğinden ve dalganın kaynağından ileri gelir.
3. Spektral güç yoğunluğu (parlaklık) çok yüksektir. Laser ışığının güç yoğunluğu diğer ışık kaynaklarından çok yüksektir. Örneğin güneşin güç yoğunluğu sadece 500 W/cm^2 iken Ruby laserin güç yoğunluğu $4,1016 \text{ W/cm}^2$, He-Ne laserinde ise $4,105 \text{ W/cm}^2$ dir.
4. Laser ışını oluşturulan elektromanyetik dalgalar birbiri ile uyum içinde ilerler.

2.13.1. Laserin Elde Edilişi

Şekil 2.21'de görüldüğü gibi enerjisi taban durumunun $h\nu$ kadar üstünde olan bir foton taban durumunda bulunan bir atom veya molekül tarafından absorbe edilerek, atom veya molekül uyarılıyor ve singlet enerji seviyelerinde enerjisine bağlı olarak üst enerji seviyesine taşınır, burada uyarılmış atom veya molekül ya radyasyonlu emisyon

yaparak ya da radyasyonsuz geçiş yaparak triplet ara kararlı enerji seviyelerine geçer. Bu enerji seviyesindeki uyarılmış atom veya molekülleri ömür suresi ömür suresi bitmeden benzer şekilde birçok atom ve molekülün aynı seviyeye yığılması, ters nüfus dağılımına (Taban durumundan daha fazla atom bulunması) sebep olur. Enerji düzeyindeki uyarılmış atom veya moleküllerin aynı anda emisyon yapmaları laser ve boya laserlerinin oluşmasına sebep olur. Sonuçta başlangıçtaki ışığın şiddetinden daha şiddetli ve dağılmayan bir laser ışığı oluşur. Laserlerin çalışmasındaki temel düşünce budur.



şekil 2.21. Farklı enerji düzeylerinden elde edilen Boya Laseri [7].

Laser işleyişinin gerçekleşmesi için bu koşulların yerine getirilmesi lazım.

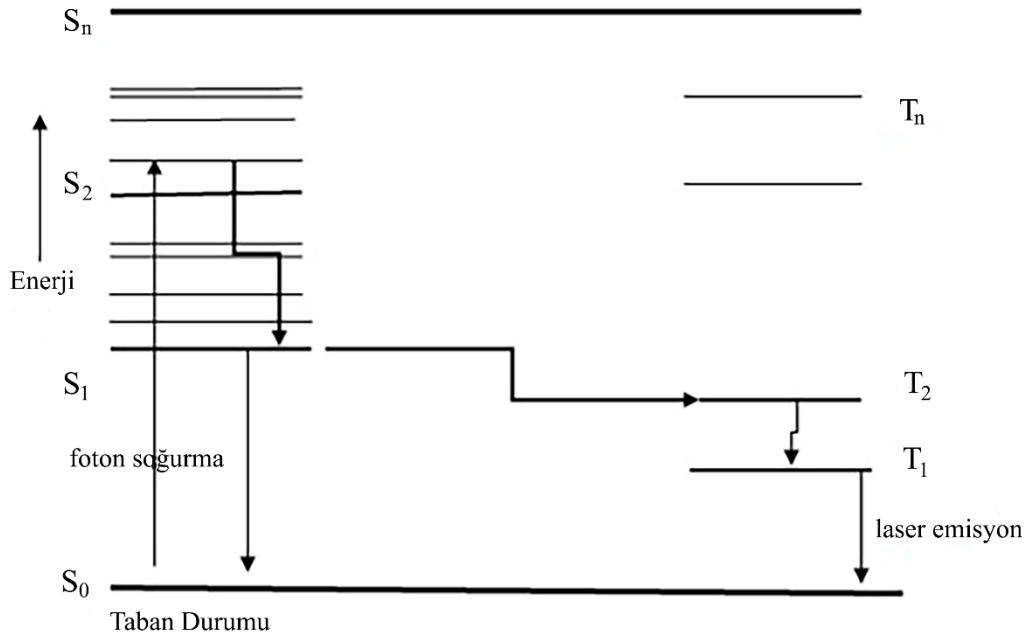
1. Uyarılmış durumdaki atom veya molekül sayısının taban durumundaki enerji seviyesinden daha fazla olacak şekilde sistem tersine çevrilerek nüfus terslenmesi dağılım durumu sağlanmalıdır.
2. Uyarılmış atom veya moleküllerin bulunduğu enerji seviyelerinin durumu yarı kararlı bir durum olmalıdır. Yarı kararlı durumun ömrü, genelde kısa olan uyarılmış atom veya moleküllerin bulunduğu enerji seviyelerinin durumunun ömürleriyle kıyaslandığında daha uzundur.
3. Uyarılma ile fotonlar diğer uyarılmış atom veya moleküllerden, uyarılma ile ışınım yaptırmaya yetecek kadar uzun bir süre sistemin içinde tutulması gerekir. Sistemin uçlarına yansıtıcı aynaların konulması ile bu durum gerçekleşir.

Uçlardaki aynalardan birisi tamamen yansıtıcı olur, diğeri ise laser demetinin çıkışına izin verecek şekilde biraz geçirgen yapılır [7].

2.13.2. Boya Lazerlerinin Özellikleri

Optik uyarma yapmak için boya laserleri kullanılmaktadır. Optik uyarma neticesinde geniş spektrum aralığında laser ışınması yapabilen etanol, metanol veya alkol benzeri bir çözücü içerisinde seyreltilerek hazırlanmış organik olan boya maddesi, bu organik boya maddesinden yayınlanan çok dalga boylu ışını, istenilen bir dalga boyunda yayılabilmesi için hazırlanmış düzenek, organik boya maddesinden çıkan geniş spektrumlu ışının filtre edebilmek için farklı dalga boylarına farklı filtreler kullanılır.

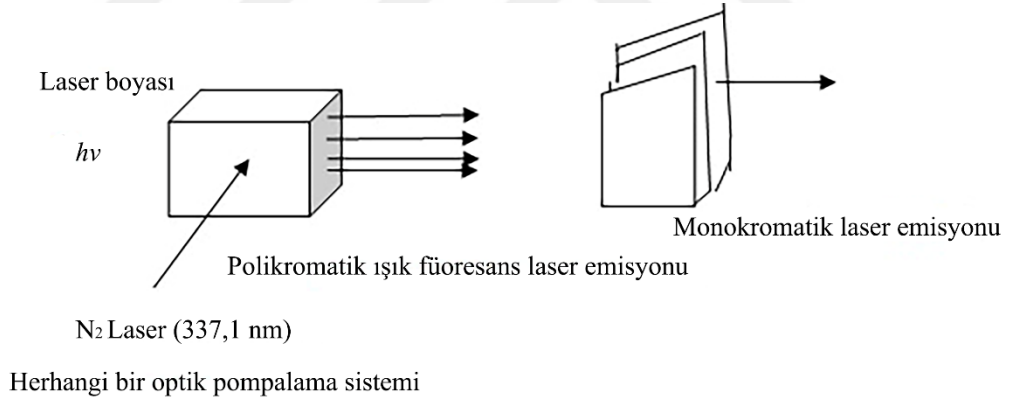
Organik boya maddelerin laserde kullanılmasının nedeni atom ve moleküllerin uyarılmış durumda bulunma süresinin saniyenin kesri kadar küçük olmasına ve yayınlanan ışığın dar bir bantta toplanmasının imkân vermesine karşılık, bu organik boya maddelerinin geniş bir dalga boyu aralığında ayarlanabilme özelliği göstermesidir. Coronene benzeri organik boya maddeler başka bir laserle uyarılma neticesinde laser etkisi gösterir. Organik boya moleküllerinin enerji seviyeleri ve bu enerji seviyelerinin arasındaki geçişler Şekil 2.22’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.22. Organik bir boya molekülünün enerji düzeyleri arasındaki geçişler [7].

Bir organik boya molekülünde elektronik enerji seviyeleri $E_0, E_1, E_2 \dots E_n$ ve bu elektronik enerji seviyelerine ait dönme enerji seviyeleri; $j_0, j_1, j_2 \dots j_n$ ile titreşim enerji seviyeleri; $v_0, v_1, v_2 \dots v_n$ vardır. Bu enerji bantları, organik boya molekülünün ışığın uyarılması ile oluşur. Taban durumundan bulunan herhangi enerji seviyesinde uyarılan molekül bu seviyeden herhangi bir üst enerji seviyesine değişik frekanslarda ışıma yapabilir. Bu şekilde bu dalga boylarının toplamını ihtiva eden geniş dalga boylu ışıma, laser boyasının bir optik pompalama laseri ile uyarılması neticesinde meydana gelen ışımadır.

Kullanılan laserin ışıma genişliği dar bir bantta olmasına rağmen organik boya maddesinden alınan ışımın dalga boyları çok geniştir ve bu spektrumda birçok dalga boyunu ihtiva etmektedir. Değişik ayarlamalar yapılarak, istenilen dalga boyu seçilerek daraltılmış bir laser ışması elde edilir. Geniş spektrumlu laser ışmasının çizgi genişliği değişik filtre düzenekler kullanılarak daraltılmış laser elde edilmiş olur (Şekil 2.23) [7].



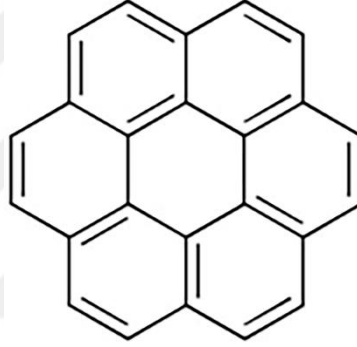
Şekil 2.23. Boya laserinin oluşum aşaması [7].

2.14. Coronene

Coronene ($C_{24}H_{12}$), Hexabenzobenzene eş anlamlı, yedi aromatik halkalar ile moleküler ağırlığı yüksek bir aromatik hidrokarbondur. Coronene polisiklik aromatik yapılu hidrokarbon molekülü kütle ağırlığı 300,9351 amb 'dir. Organik materyallerin yarım yanmış genel bir ürünüdür. Farklı büyüme mekanizmaları arasındaki geçişi belirlediklerinden dolayı kütle ağırlığında kurum oluşumunda bir poli aromatik hidrokarbon (Poly aromatic hydrocarbon, PAH) olan coronene, ilgi çekici bir malzeme

olmuştur. PAH molekülleri hidrojen çıkarma, karbon ekleme (Hydrogen abstraction/carbon addition, HACA) mekanizmalarıyla gelişir ve irileşirler [24].

Coronene iyi bir deşik taşıma ve ışık yayıcı malzeme olarak kullanılabilir. Güçlü flüresans ve taşıyıcı yeteneği bu malzemelerin organik LED'ler imalatı için uygundur. Tipik bir polisiklik aromatik yarıiletken olarak coronene yüksek termostabilite (erime noktası; 438-440 °C, kaynama noktası; 525,6 °C - 760 mmHg, alevlenme noktası; 265,2 °C ve kırılma indis; 2,139), güçlü fotoluminesans ve taşıyıcı ulaşım için iyi bir yetenek güçlü bir özelliğe sahiptir. Organik LED üretiminde yayıcı malzeme olarak kullanıma ilişkin çok sayıda çalışma yapılmıştır. Coronene'nin yapısal simetrisi yüksek derecede katı halde güçlü bir kristalleştirme eğilimi yapar [25].



Şekil 2.24. Organik yarıiletken Coronene molekülünün yapısı [25].

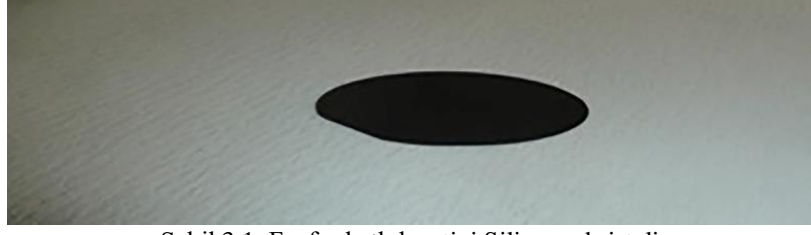
BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Yapıların Hazırlanması

Bu proje çalışmasında diyot yapımında kullanılacak olan Silisyum alt tabaka bir dizi kimyasal temizlik işlemlerinden geçirilmiştir. Bu işlemler, aygıt üretilmeden önce titizlikle yapılması gereken ve aygıtın elektriksel karakterizasyonuna etki edebilecek önemli bir aşamadır. Kimyasal temizlik aşamasının ardından sıra alt tabaka üzerinde kontak oluşumlarına gelir ki bu da Al/Coronene/*n*-Si (metal/organik/yarıiletken) yapısını oluşturmuştur. Son olarak oluşturulan yapılardan gerekli elektriksel bağlantıları alınarak ilgili ölçüm cihazlarıyla karakterizasyon işlemlerine başlanmıştır.

3.2. Kristal Temizleme İşlemi

Kullanılan kristal yurtdışından ‘‘Wacker – Siltronic’’ firmasından satın alınmış olup yaklaşık 5 cm çapında, 380 µm kalınlığında 20 Ω-cm özdirençli, fosfor katkı ve (100) düzleminde kesilmiştir (Şekil 3.1). Öncelikle kristal üzerindeki organik artıkları ve yağları temizlemek için bir beher içine trikloretilen konuldu ve silikon alt tabakalar beher içine atıldı. Beher, Bandelin Sonorex marka ultrasonik banyo içerisinde 10 dakika titreştirildi. Bir miktar aseton bir cam beher içerisine konuldu ve yaklaşık 55 dereceye kadar ısıtıldı. Silikon alt tabakalar daha sonra bunun içine atılarak 10 dakika bekletildi. Buradan çıkarılan alt tabakalar önceden beher içerisinde hazırlanmış metenol içerisine atıldı ve burada 5 dakika bekletildi. Sonrasında metenol içerisinden çıkarılan Silikon alt tabakalar, ‘‘Innovation Water Purification’’ sistemi ile üretilen 18,3 MΩ-cm özdirençli deiyonize su ile bolca durulandı. Durulanan silikon kristali kuru azot ile kurutuldu. Buraya kadar yapılan tüm işlemler silikon alt tabaka üzerindeki olası yağları almak içindir.



Şekil 3.1. Fosfor katkılı *n*-tipi Silisyum kristali.

Organik artıkları uzaklaştırmak için ise RCA işlemine geçildi. Bunun için bir beher içine 325 ml deiyonize su, 65 ml amonyum hidroksit (27%) (NH_4OH) konuldu ve 70 dereceye kadar ısıtıldı. Daha sonra ısıtılan bu karışımın içerisine 65 ml hidrojen peroksit (30%) (H_2O_2) eklendi ve çözelti içinde kabarcıklar oluşana kadar beklendi. Çözeltide etkileşme başlamasından yani kabarcıkların oluşmasından hemen sonra silikon kristali bu karışımın içine atılarak 15 dakika bekletildi. İşlem sonunda silikon kristali yine $18,3 M\Omega\text{-cm}$ özdirençli deiyonize su ile bolca durulandı. Sonra sıra silikon üzerindeki oksit tabakasını uzaklaştırma işlemine geldi. Bunun için HF (Hidroflorik asit) kullanıldı. Bir teflon beher içerisine 480 ml deiyonize su konuldu ve üzerine 20 ml HF ilave edildi. Silisyum alt tabakalar bu karışım içerisinde 2 dakika kadar bekletildi. Daha sonra kristal bolca deiyonize su ile çalkalanıp sonrasında azot gazı ile kurutuldu. Diğer taraftan diyot yapımında kullanılacak olan alüminyum metalleri de aynı temizlik aşamalarından geçirildi.

3.3. Al/Coronone /*n*-Si Yapılarının Oluşturulması

Al/Coronene/*n*-Si yapılarını oluşturmak için “Edwards” marka evaporasyon sistemi kullanıldı (Şekil 3.2). Bu sistem, bir rotary (dönerek işleyen) ile difüzyon pompasından oluşmuş olup, evaporasyon işlemleri vakum altında bir cam fanus içerisinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Al/Coronene/*n*-Si yapısının oluşturulması sırasında kullanılan “Edwards” marka evaporasyon sistemi [26].

Evaporasyon sisteminin hazır hale getirilebilmesi için kimyasal temizlik işlemi sırasında dönerek işleyen pompa ve difüzyon pompası çalıştırıldı. Doğrultucu omik kontaklar için uygun maskeler seçildi ve sistemin numune tutucularına yerleştirildi. Kimyasal temizleme işlemi bitirilen *n*-tipi silisyum alt tabakalar atmosfer ortamında fazla bekletilmeden evaporasyon sistemine yerleştirildi. Sistemin elektrotları arasına buharlaştırılması yapılacak olan malzemeye (Al) uygun pota takıldı. Pota içerisine buharlaştırılacak olan alüminyum (%99,999'luk) metali yerleştirildi ve sistemin cam fanusu kapatıldı. Gerekli olan ön basınç değerine inildikten sonra bir yüksek vakum vanası yardımıyla difüzyon pompası devreye sokuldu. İstenilen basınç değerine gelindikten sonra (6×10^{-6} Torr) elektrotlara gerilim uygulanmaya başlandı. Gerilim artırılması ile potadan geçen akım da arttı ve metali buharlaştıracak sıcaklığa gelince evaporasyon işlemi başladı. İstenilen film kalınlığına (2000 Å) gelince bir shutter (kesici kapak) yardımıyla evaporasyon işlemi sonlandırıldı. Potaya uygulanan gerilim kesildi. Böylece omik kontak için gerekli tabaka oluşturulmuş oldu. Evaporasyon sırasında oluşturulan film kalınlığı ve biriktirme hızı “Edwards FTM6” marka bir kalınlık ölçer ile 10-20 Å/s olarak ölçüldü.

Evaporasyon ile Al film oluşturma işlemi tamamlandıktan sonra cam fanus içerisine yavaş yavaş hava verilmeye başlandı ve sistem atmosfer ortamına açıldı. Elektrotlar arasındaki pota çıkartılarak yerine tungsten bir levha takıldı. Bu levha üzerine silisyum, alt tabaka kaplanmış yüzeyi üste gelecek şekilde yerleştirildi. Cam fanus

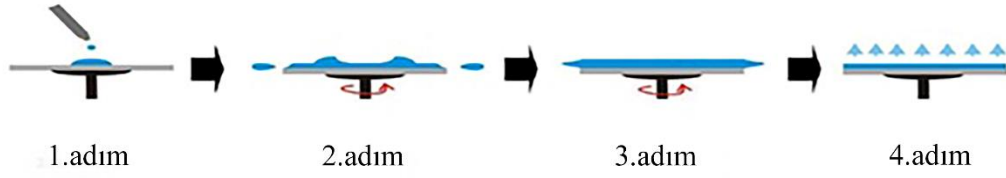
tekrar yerine yerleştirilerek sistem vakum altına alındı. İstenilen vakum değerine erişildiğinde levhaya gerilim uygulanarak ısınması sağlandı. Bir süre sonra alüminyum kaplı yüzey silisyum içerisine çökertildi ve böylece omik kontak oluşmuş oldu. Levhanın soğuması beklendikten sonra evaporasyon sistemi atmosfere açılarak önceki pota takıldı ve omik kantağın, ölçümler sırasında elektriksel iletkenliğinin sağlanabilmesi için çökertilen tabaka üzerine tekrar 2000 Å kalınlığında alüminyum kaplandı.

Silisyum kristalinin Coronene kaplanacak yüzeyinde oksit tabakaların oluşma ihtimalini ortadan kaldırmak için, silisyum kristali tekrar hidroflorik asit (HF) için 60 saniye kadar bekletildi ve daha sonra deiyonize su ile çalkalandı. Tetrahidrofuranda (THF) çözülen coronene çözeltisi silisyum temizlenmiş yüzeyine VTC-100 vacuum spin coater cihazı yardımıyla büyütüldü (Şekil 3.3).



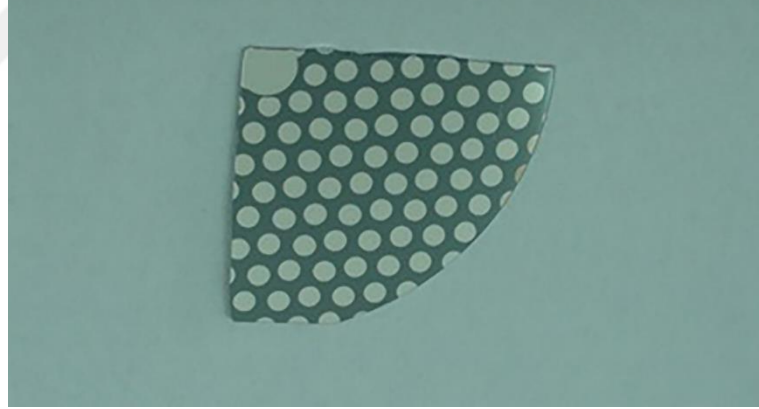
Şekil 3.3. VTC- 100 Vacuum Spin Coater.

Şekil 3.4'te ince film oluşturmak için kullanılan döndürme ile kaplama yönteminin dört aşaması verilmektedir. Birinci adımda; çözelti sabit hızla dönmekte olan alt tabaka üzerine uygulanmaktadır. İkinci adımda; Durmakta olan taşıyıcı yüksek hızla döndürülmektedir. Dönme sırasında alt tabaka üzerine damlatılmış çözelti merkezkaç kuvvetinin etkisiyle ince film şeklinde yayılmaktadır. Üçüncü adımda açılmal hız sabit tutulur ve bu adımda filmin kalınlığı azaldıkça fazla sıvının savrulması engellenir. Dördüncü adımda ise; çözelti filmden buharlaştırılarak istenilen inceliğe ulaştırılır. Böylece silisyum üzerinde coronene ince filmi oluşturur.

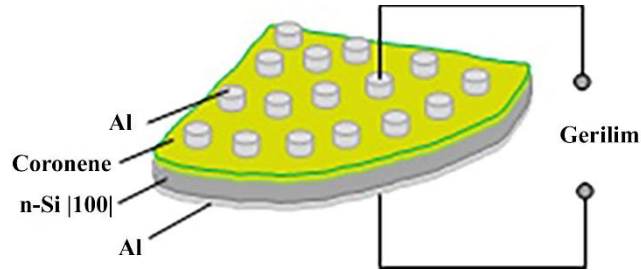


Şekil 3.4. Döndürme ile kaplamanın dört aşaması.

Son olarak doğrultucu kontak için gerekli olacak 1,7 mm çaplı delikleri olan metal maske epeporasyon sisteminin numune tutucularına takıldı ve silisyum coronene kaplanmış yüzeyi alta gelecek şekilde maske üzerine yerleştirildi. Sistem tekrar vakum altına alınarak (6×10^{-6}) 1500 Å kalınlığında Al kaplaması gerçekleştirildi. Böylece bütün işlemler sonucunda çeyrek silisyum alt tabaka üzerinde birçok Schottky tabanlı Al/Coronene /n-Si yapısı elde edilmiş oldu. Şekil 3.5 ve 3.6'da bu yapıların görüntüsü ve şematik diyagramı görülmektedir.



Şekil 3.5. Çeyrek Silisyum alt tabaka üzerinde oluşturulan Schottky tabanlı Al/coronene/n-Si yapılarının görüntüsü.



Şekil 3.6. Oluşturulan Schottky Tabanlı Al/Coronene/n-Si yapılarının şematik diyagramı.

3.4. Kullanılan Ölçüm Cihazları ve Düzenekleri

Elde edilen Schottky tabanlı Al/Coronene/*n*-Si diyotlarının elektriksel karakterizasyonu için, “Edwards” marka evaporasyon sistemi, IEEE-488 AC/DC arayüz kart ile bağlantılı bilgisayar kontrollü ölçüm cihazları kullanıldı. Kapasite-gerilim (C-V) ölçümleri için ise Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer cihazı kullanılmıştır. Silisyum alttabakaya coronene ince filmi kaplamak döndürme ile kaplama (spin coater) metoduyla yapılmıştır. Silisyum alt tabakanın, kimyasal temizleme ve deiyonize su ile çalkalama (18,3 MΩ) işlemleri sırasında WiseClean marka su banyosu kullanılmıştır.



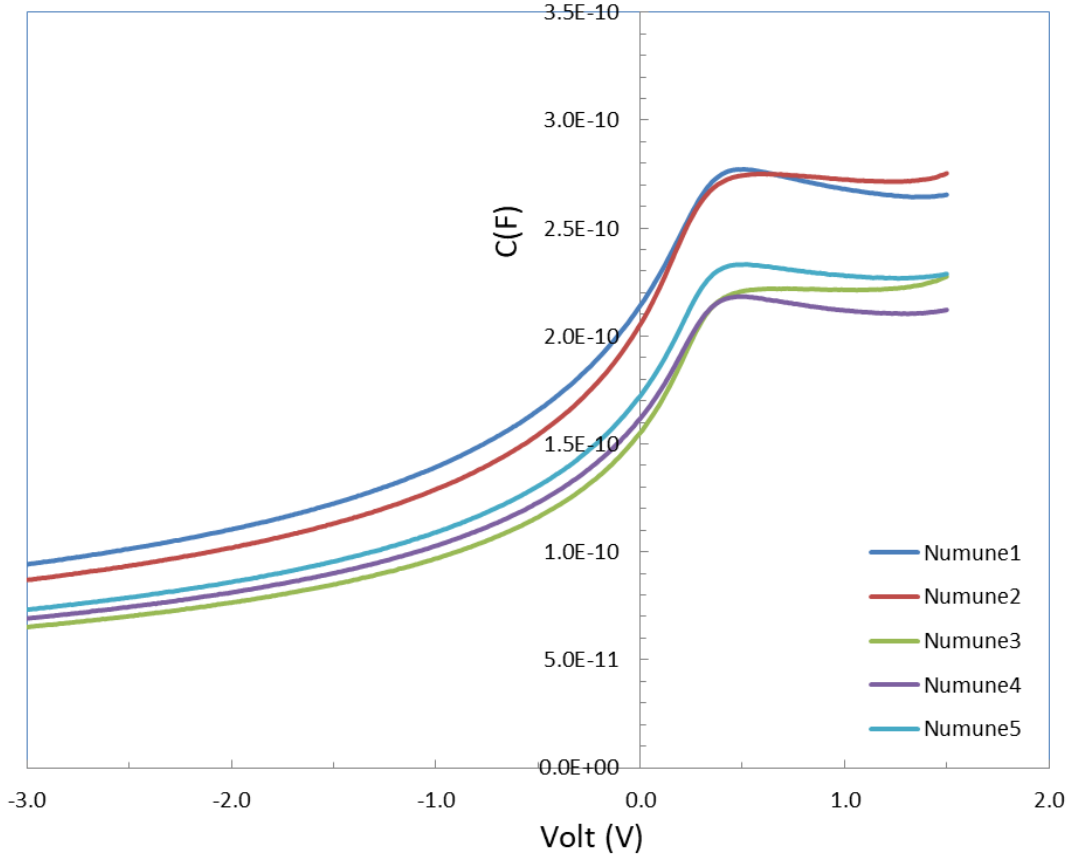
BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

Üretilen Schottky tabanlı Al/Coronene/*n*-Si(100) diyotlarının detaylı aygıt parametreleri kapasite-gerilim (C-V) eğrileri yardımıyla elde edilmiştir. Tüm elektriksel ölçümler karanlık ortamda oda sıcaklığında alınmıştır. C-V ölçümleri 1 MHz 'de -3 ile +5 volt arasında yapılmıştır. C-V ölçümlerinden hareketle, başlıca diyot parametreleri olan difüzyon potansiyeli (V_d) ve engel yüksekliği (Φ_B)'nin yanında yine her bir diyot için tüketim tabakası genişliği (W_D), Schottky alçalması ($\Delta\Phi_B$), maksimum elektrik alan (E_m), Fermi enerji seviyesi (E_F), yapıların taşıyıcı yoğunluğu (N_d) gibi diyot parametreleri tayin edilmiştir.

4.1. Kapasite-Gerilim (C-V) Karakteristikleri

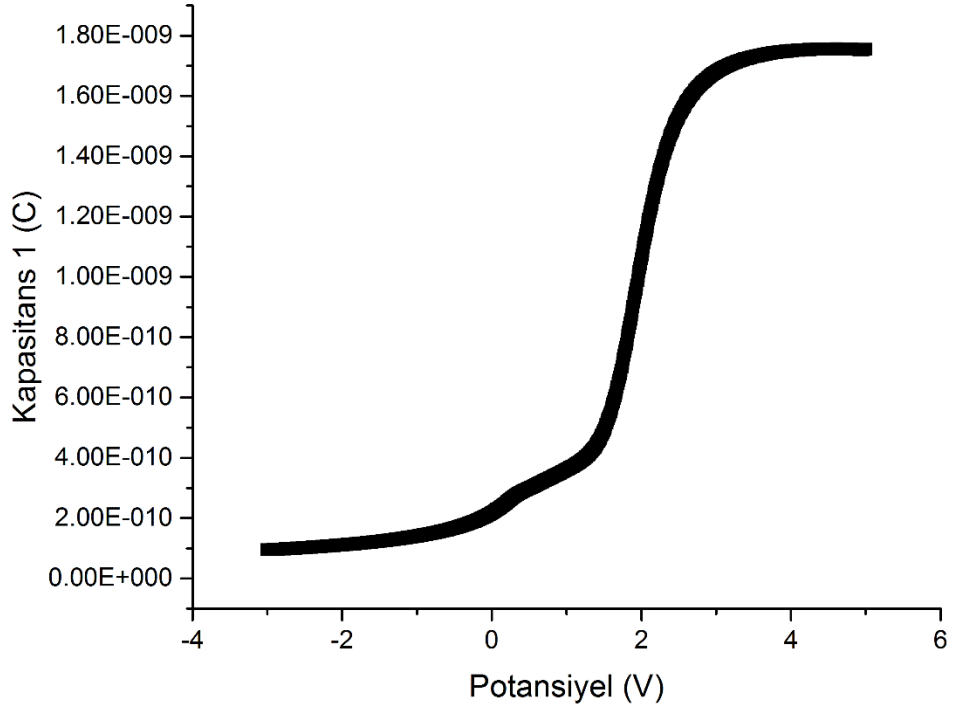
Üretilen Schottky tabanlı bir Al/Coronene/*n*-Si(100) diyotunun kapasite gerilim (C-V) ölçümleri 1 MHz sabit frekansta ve -3 ile +5 volt ve 0,01 aralıklar için alınmıştır. Küçük frekanslarda alınan ölçümler, uzun zaman sabitine sahip arayüz durumlarını uygulanan AC sinyali takip etmesi ve engel kapasitesine katkıda bulunması sonucu hesaplanacak olan taşıyıcı yoğunluğu (*katkı atomlarının yoğunluğu*) gerçek değeri yansıtmayacağından dolayı ölçümler yüksek frekansta ($f \geq 500 \text{ kHz}$) alınmıştır. Böylece arayüzey durumlarının diyot parametrelerine olası etkisi ihmal edilmiştir. Elde edilen C-V ölçümleri yapıların taşıyıcı yoğunluğu (N_d), difüzyon potansiyeli (V_d), engel yüksekliği (Φ_B), Fermi enerji seviyesi (E_F), elektrik alan (E_m), tüketim tabakası genişliği (W_D) ve Schottky alçalması ($\Delta\Phi_B$) gibi elektriksel parametreler elde edilmiştir. C-V ölçümleri karanlık ortamda ve oda sıcaklığında alınmıştır.

Şekil 4.1 'de seçilmiş 8 adet Al/Coronene/*n*-Si(100) yapısının C-V eğrileri görülmektedir.



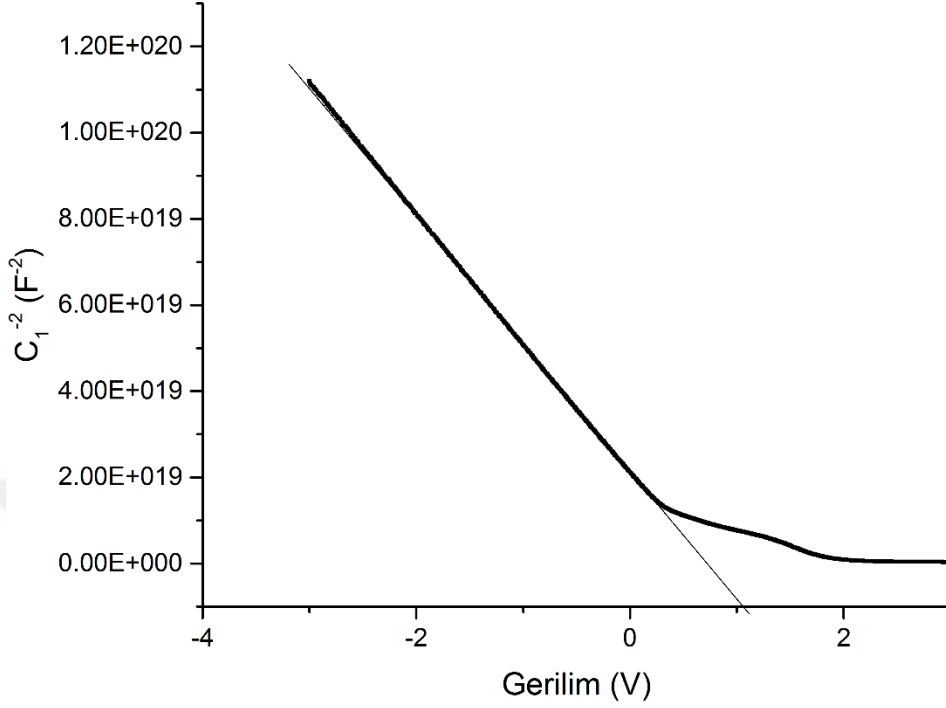
Şekil 4.1. Al/Coronene/*n*-Si(100) diyotlarının C-V eğrileri.

Şekil 4.1’ de görüldüğü gibi her bir diyot için kapasite eğrileri 0,5 volt düz belseme yakınlarında pikler vermektedir. Bu da bize arayüzey durumlarının lokalize olduğunu göstermektedir. Şekil 4.1’de görülen bu durum pik bölgesinde arayüzey durumlarının lokalize olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.2. Al /Coronene/*n*-Si(100) seçilmiş bir diyodun C-V eğrisi.

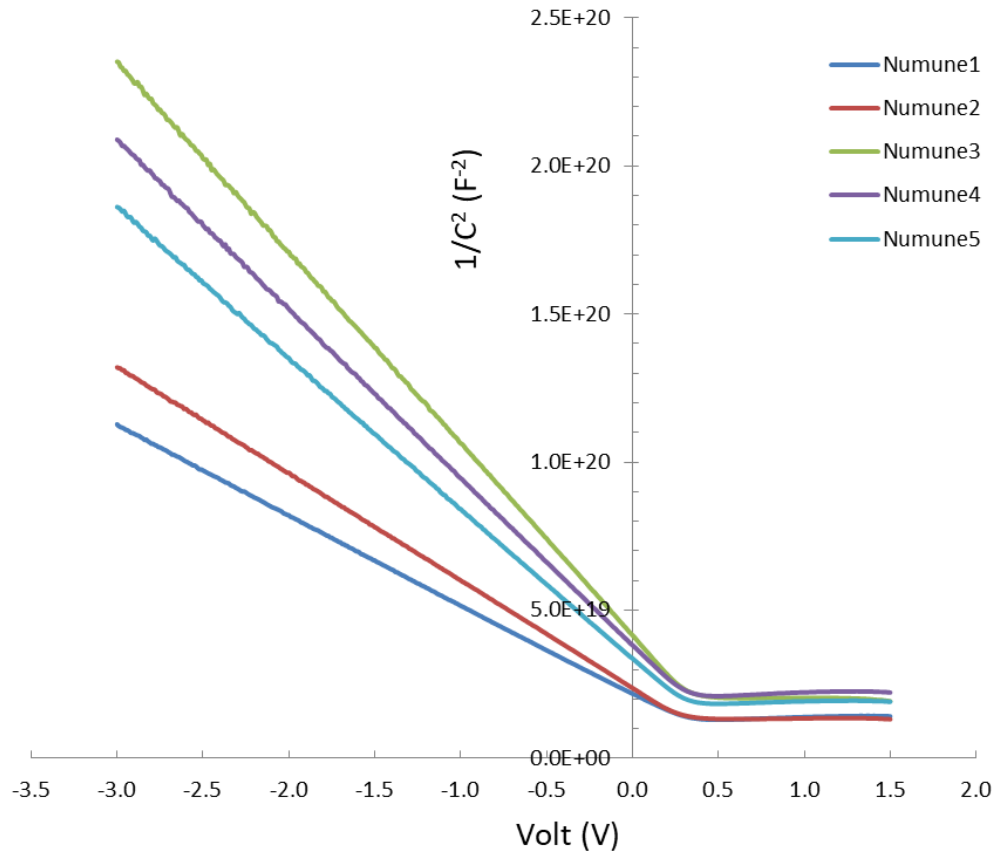
Yapılar için $1/C^2-V$ eğrisi Şekil 4.3'de verilmiştir.



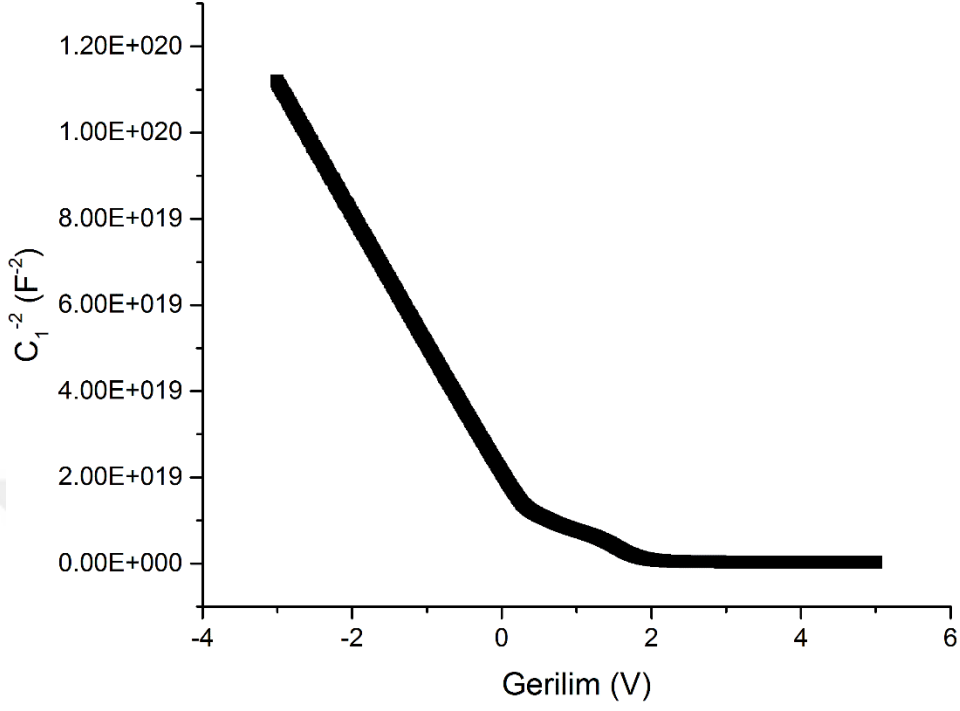
Şekil 4.3. Al/Coronene/n-Si(100) diyot için $1/C^2 - V$ eğrisi.

Şekil 4.3'a bakıldığında eğrinin geniş bir voltaj aralığında lineer olduğu görülmektedir. Alt tabaka olarak kullanılan silisyum için üreticinin vermiş olduğu 15 $\Omega\text{-cm}$ 'lik öz direnç ve elektronlar için $\mu_n = 1400 \text{ cm}^2/\text{V-s}$ 'lik mobilite değerleri kullanılarak $\rho = 1/q\mu_p N_d$ ifadesi yardımıyla n -tipi yarıiletken için teorik taşıyıcı yoğunluğu (N_d) $2,23 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulunmuştur. Bu değer, Şekil 4.3'daki $1/C^2 - V$ eğrilerinin eğimlerinden hesaplanan taşıyıcı yoğunlukları ile aynı mertebededir. Yapıların $1/C^2 - V$ eğrilerinin voltaj eksenine extrapolasyonu (*ekseni kestiği noktadan*) yardımıyla difüzyon potansiyeli (V_d) elde edildi. Bu değerlerden yararlanılarak engel yükseklikleri tayin edildi.

Şekil 4.4 'de çeyrek silisyum alttabaka üzerine oluşturulmuş Schottky diyotlarının seçilmiş olanlarından $1/C^2 - V$ eğrilerinin voltaja bağlılığı görülmektedir.



Şekil 4.4. Çeyrek silisyum alttabaka üzerine oluşturulmuş Schottky diyotlarının $1/C^2 - V$ eğrileri.



Şekil 4.5. Al/Coronene/n-Si(100) seçilmiş bir diyodun $1/C^2 - V$ eğrisi.

Yapıların tüketme tabakası genişliği,

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 V_D}{q N_D}} \quad (4.1)$$

ifadesinden hesaplanmıştır. Fermi seviyesi,

$$\Phi_F = \frac{kT}{q} L_n \left(\frac{N_C}{N_D} \right) \quad (4.2)$$

bağıntısından hesaplanmıştır. Burada N_C iletkenlik bandındaki etkin durumların yoğunluğu olup sıcaklığa,

$$N_C = 4,82 \times 10^{15} \cdot T^{3/2} \cdot \left(\frac{m^*}{m_0} \right)^{3/2} \quad (4.3)$$

ifadesiyle bağlıdır. Burada m^* elektronların etkin kütlesi olup değeri $m^* = 0,15 m_0$ 'dır. Oda sıcaklığındaki ölçümler için iletkenlik bandındaki etkin durumların

yoğunluğu $2,78 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulunmuştur. Yapılarda oluşan maksimum elektrik alanı (E_m) ve Schottky engel alçalması ($\Delta\Phi_B$) sırasıyla denklem 4.4 ve 4.5 ifadelerinden elde edilmiştir.

$$E_m = \sqrt{\frac{2qN_D V_d}{\epsilon_s \epsilon_0}} \quad (4.4)$$

$$\Delta\Phi_B = \sqrt{\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s\epsilon_0}} \quad (4.5)$$

Yapıların engel yükseklikleri, Φ_B , V_d sıcaklığa bağlı difüzyon ifadesi, Φ_F Fermi enerjisi ve $\Delta\Phi_B$ Schottky engel alçalması cinsinden, $\Phi_B = (V_d + \Phi_F - \Delta\Phi_B)$ olarak ifade edilir. Burada Φ_F , E_i gerçek Fermi enerji seviyesi ile E_F Fermi seviyesi arasındaki enerji farkıdır. Yapıların oda sıcaklığındaki ve karanlık ortamdaki $1/C^2-V$ eğrileri kullanılarak elde edilen engel yüksekliği (Φ_B), difüzyon potansiyeli (V_d), taşıyıcı yoğunluğu (N_d), maksimum elektrik alanı (E_m) ve tüketim tabakası genişliği (W_D) gibi elektriksel parametreleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Al/Coronene/n-Si(100) diyotlarının $1/C^2-V$ eğrilerinden elde edilen Φ_B , V_d , N_d , E_m , W_D ve $\Delta\Phi_B$ parametreleri.

Diyot	Φ_B (eV)	V_d (eV)	N_d (10^{14} cm^{-3})	E_m (10^3 V/cm)	W_D (nm)	$\Delta\Phi_B$
1	0,983	0,705	3,96	9255,43	1520	0,0106
2	0,954	0,671	3,37	8326,08	1610	0,0100
3	0,918	0,618	1,86	5951,03	2080	0,0085
4	0,885	0,588	2,08	6129,38	1920	0,0086
5	0,900	0,606	2,35	6608,77	1840	0,0089

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu projede son yıllarda elektronik cihazlarda aktif bileşen olarak kullanılan organik malzeme içeren Schottky tabanlı metal/organik/yarıiletken yapılar çalışılmıştır. Bunun için (100) düzleminde kesilmiş, 380µm kalınlıklı, 20 Ω-cm öz dirençli bir *n*-tipi silisyum kristali alttabaka olarak kullanılmıştır. Çeşitli kimyasal temizlik aşamalarından sonra evaporasyon sistemleri ve döndürme ile kaplama tekniği kullanılarak aynı kristal üzerinde 16 adet Schottky tabanlı Al/coronene/*n*-Si yapıları oluşturulmuş olup, bunlardan 8 adedinin oda sıcaklığında ve karanlık ortamda bilgisayar kontrollü ölçüm cihazları yardımıyla kapasite-gerilim (C-V) ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümlerden elde edilen veriler grafiklere aktarılmıştır. Bu grafiklerden her bir yapı için başlıca diyot parametreleri olan difüzyon potansiyeli (V_d) ve engel yüksekliği'nin (Φ_B) yanında, Fermi enerji seviyesi (E_F), tüketim tabakası genişliği (W_D), Schottky alçalması ($\Delta\Phi_B$) maksimum elektrik alan (E_m), taşıyıcı yoğunluğu (N_d) gibi diyot parametreleri tayin edilmiştir.

Yapıların C-V ölçümleri, arayüzey durumlarının uygulanan AC sinyali takip edemeyeceği yeterince yüksek bir frekans (1 MHz) alınmıştır. Böylece diyot parametrelerinin elde edilmesinde yüzey durumlarından gelebilecek katkılar minimuma indirilmiştir. Ölçümlerden elde edilen veriler yardımıyla yapıların C-V eğrileri çizilmiştir. Kapasite eğrilerinden görüldüğü üzere her bir yapı 0,5 volt düz belsem yakınlarında bir pik vermiş olup, bu piklerin yapılarında arayüzey durumlarının var olduğunun bir göstergesi olduğu sonucuna varılmıştır.

Aynı şartlarda ve aynı kristal üzerinde oluşturulmuş olan diyotların engel yüksekliği değerleri birbirine çok yakın olarak bulunmuştur. Bu durum yarıiletken üzerindeki organik (coronene) malzemenin son derece düzgün (homojen) olmasından kaynaklanmaktadır.

Yapıların $1/C^2-V$ eğrileri, 1 MHz 'de alınmış C-V ölçümlerinden elde edilmiştir. Eğriler oldukça geniş bir voltaj aralığında doğrusal bölge vermektedir. Bu lineer bölge kullanılarak her bir diyot için taşıyıcı yoğunluğu (N_d), Difüzyon potansiyeli (V_d),

Fermi enerji düzeyi (E_F), engel yüksekliği (Φ_B), Schottky alçalması ($\Delta\Phi_B$), tüketim tabakası genişliği (W_D) ve maksimum elektrik alan (E_m) gibi önemli diyot parametreleri elde edilmiştir. Deneysel olarak elde edilmiş N_d değerleri teorik olarak hesaplanmış olan N_d değeri ($2,23 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) ile uyum içerisinde dir.

İçerisinde coronene gibi ışığa duyarlı bir organik malzeme bulunduran Al/coronene/ n -Si yapıları doğrultucu özellik göstermiş olup, elde edilen sonuçlara bakıldığında bu yapıların fotodiyot gibi anahtarlama ve güneş pilleri gibi optoelektronik devre elemanlarında kullanılabileceği görülmüştür.



KAYNAKLAR

- [1] Nalçacıgil, Z., Perylene Türevi Organik Yarıiletken İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin İncelenmesi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [2] Önal, F., Silikon Alttaban Üzerinde Üretilen Organik Alan Etkili Transistörler ve Karakterizasyonları, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [3] Gonca, A.F., Al/Poly(Methyl methacrylate)/p-Si Organik Schottky Diyotların Üretimi, Elektrik ve Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2015.
- [4] Tozlu, C., Yeni Perilen ve Naftalen Türevi Organik Yarıiletkenlerin Alan Etkili Transistör Uygulamalarında Karakteristik Özelliklerinin Analizi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Doktora Tezi, 2010.
- [5] Bengin Akgül, K., Aynı Şartlar Altında Üretilen Özdeş Au/n-Si (100) Schottky Diyotlarda Karakteristik Parametrelerin Belirlenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2015.
- [6] Yazıcı, D., Fosfin Metal Komplekslerinin Fiziksel Özellikleri, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2007.
- [7] Kanlı, F.Y., Rodamin-610 Molekülünün UV ile Işınlanması Durumunda Fotofiziksel Özelliklerinin İncelenmesi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2008.
- [8] Gürel Özdemir, H., Spin Kaplama Yöntemiyle Rubrene İnce Filmlerinin Hazırlanması ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi, Giresun Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2013.
- [9] Arslan, A., Sol-Jel Yöntemiyle Büyütülen Kalay Oksit Filmlerin Elektriksel ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [10] Özmenteş, R., Schottky Diyotlarının Karakteristik Parametrelerinin Belirlenmesinde Frekans Optimizasyonu, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [11] Gündüz, B., Organik Yarıiletken Fotodiyotların Hazırlanması ve

- Optoelektronik Özelliklerinin Araştırılması, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2007.
- [12] Metin, B., GaN Schottky Güneş Gözelerinin İki Boyutlu Modellenmesi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2014.
- [13] Yazıcı, D., Fosfin Metal Komplekslerinin Fiziksel Özellikleri, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2007.
- [14] Asimov, A., Si Yarıiletkeni Üzerine İletken Polimer Kaplanarak Oluşturulmuş Schottky Diyotların Özelliklerinin İncelenmesi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Doktora Tezi, 2014.
- [15] Bulgurcuoğlu, A.E., Cr/Si Schottky Eklemlerin Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2008.
- [16] Bayram, A., Al/p-Si/Al Schottky Diyotlarında I-V, C-f, C-V Karakteristiklerinden Diyod Parametrelerinin Hesaplanması, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [17] Çekinmez, A., Metil Mavisi ve Metil Yeşili Organik Bileşenli Schottky Diyotların Elektriksel Karakteristiklerinin İncelenmesi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2015.
- [18] Fener, F., Al/P-Si/Al Schottky Kontakların Yük Depolama Kabiliyeti, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [19] Batı, B., İdeal ve İdeal Olmayan Omik Doğrultucu Kontaktlı Au/n-Si Schottky Diyotlarda Doğru Beslen Kapasite-Voltaj-Frekans Karakteristikleri, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Doktora Tezi, 1998.
- [20] Ocak, Y.S., Al/ Metil Kırmızısı /p-Si Schottky Diyotların Elektriksel Karakterizasyonu, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [21] Nurtan, Y., Au/SiO₂/N-Si MOS Yapıların C-V-F ve G-V-F Karakteristiklerinin İncelenmesi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [22] Barış B., Analysis of device parameters for Au/tin oxide/n-Si(1 0 0) metal–

- oxide–semiconductor (MOS) diodes *Phys. B Condens. Matter*, vol. 438, pp. 65–69, Apr. 2014.
- [23] BAYRAM, B.A., P-Si Yarı İletkeni ile Hazırlanan Schottky Eklemlerin Elektriksel Parametrelerinin Hesaplanması, Giresun Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2014.
- [24] Schmidt, M., Masson, A., & Bréchnac, C., Coronene cluster experiments: Stability and thermodynamics. *Int. J. Mass Spectrom.*, vol. 252, no. 2, pp. 173–179, 2006.
- [25] ZHANG, R., ZHENG, H., & SHEN, J., Blue light-emitting diodes based on coronene-doped polymers, *Synthetic. China: Synthetic Metals*, 1999.
- [26] TAEK Ölçüm ve Analiz Hizmetleri GB Birimi. Ankara, 2019.

ÖZGEÇMİŞ

1974 yılında Ordu 'da doğdu. İlk , orta ve Lise öğrenimini Ordu' da tamamladı. 1993 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fatih Eğitim Fakültesi Fizik öğretmenliği bölümünden mezun oldu. 1994 yılında İlk görev yeri olan Bitlis Zübeyde Hanım Anadolu Kız Meslek Lisesinde 2 yıl çalıştıktan sonra memleketi olan Ordu ili Merkez Yağzlı İlköğretim okuluna Fen Bilgisi öğretmeni olarak atandı. 2004 Ordu Lisesinde Fizik öğretmeni olarak görevine devam etti. İki yıldır Altınordu Ordu Anadolu lisesinde fizik öğretmeni olarak görevine devam etmektedir. 2013 yılında girdiği Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans eğitimine başladı ve halen Yüksek Lisans Eğitimine devam etmektedir.