



T.C.

**BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**TRİMETİLOLPROPANE TRİAKRİLAT (TMPTA) ARAYÜZE SAHİP
METAL-POLİMER-YARIİLETKEN (MPS) AYGITLARIN ELEKTRİKSEL
KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Emin ÖZENÇ

**Danışman
Prof. Dr. Osman PAKMA**

**Haziran 2022
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet Emin ÖZENÇ tarafından hazırlanan “TRİMETİLOLPROPANE TRİAKRİLAT (TMPTA) ARAYÜZE SAHİP METAL-POLİMER-YARIİLETKEN (MPS) AYGITLARIN ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU” adlı tez çalışması 10/06/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. İ. Afşin KARİPER

Danışman

Prof. Dr. Osman PAKMA

Üye

Doç. Dr. Şerif RÜZGAR

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Osman PAKMA
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdür V.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Mehmet Emin ÖZENÇ

10/06/2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TRİMETİLOLPROPANE TRIAKRİLAT (TMPTA) ARAYÜZE SAHİP METAL-POLİMER-YARIİLETKEN (MPS) AYGITLARIN ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

Mehmet Emin ÖZENÇ

BATMAN ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

Danışman: Prof. Dr. Osman PAKMA

2022, 67 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Osman PAKMA

Doç. Dr. Şerif RÜZGAR

Doç. Dr. İ. Afşin KARİPER

Bu çalışmada Trimetilolpropane Triakrilat (TMPTA) Polimer arayüze sahip Metal-Polimer-Yarıiletken (MPS) aygıtların oda sıcaklığında akım - gerilim (I-V) ve kapasite-gerilim (C-V) analizleri incelenmiştir. Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapısının karanlık altındaki akım-gerilim (I-V) ölçümleri gerçekleştirilerek; doğrultma oranı (R_R), idealite faktörü (n), engel yüksekliği (ϕ_B) ve seri direnç (R_s) gibi aygıt parametreleri belirlenmiştir. Ayrıca kapasite-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G-V) ölçümleri ile diğer elektriksel parametreler belirlenmiştir. Sonuçlar literatür ile karşılaştırılmış, TMPTA fotopolimer organik arayüzey tabakasının MPS aygıtlarının fabrikasyonu için iyi bir aday olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Polimer, Trimetilolpropan Triakrilat (TMPTA), Metal-Polimer-Yarıiletken(MPS), Seri direnç

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF METAL-POLYMER- SEMICONDUCTOR (MIS) DEVICES WITH TRIMETHYLOLPROPANE TRIACRYLATE (TMPTA) INTERFACE

Mehmet Emin ÖZENÇ

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN PHYSICS**

Advisor: Prof. Dr. Osman PAKMA

2022, 67 Pages

Jury

Prof. Dr. Osman PAKMA

Asos. Prof. Dr. Şerif RÜZGAR

Asos. Prof. Dr. İ. Afşin KARİPER

In this study, current-voltage (I-V) and capacitance-voltage (C-V) analyzes of Metal-Polymer-Semiconductor (MPS) devices with Trimethylolpropane Triacrylate (TMPTA) Polymer interface were investigated at room temperature. By performing current-voltage (I-V) measurements of the Al/TMPTA/p-Si (MPS) structure under dark; Device parameters such as rectification ratio (R_R), ideality factor (n), barrier height (ϕ_B) and series resistance (R_s) were determined. In addition, capacitance-voltage (C-V) and conductivity-voltage (G-V) measurements and other electrical parameters were determined. The results were compared with the literature and it was seen that the TMPTA photopolymer organic interfacial layer is a good candidate for fabrication of MPS devices.

Keywords: Polymer, Trimethylolpropane Triacrylate (TMPTA), Metal-Polymer-Semiconductor (MPS), Series Resistance

ÖNSÖZ

Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne Yüksek Lisans tezi olarak sunulan bu çalışmamın çoğu yerinde yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Osman PAKMA'ya, Deneysel çalışmalar boyunca yardımlarını gördüğüm Arş. Gör. Dr. Pınar Özden, Doç. Dr. Necmettin Avcı, Öğr. Gör. Dr. Şadan Özden, Doç. Dr. İ. Afşin Kariper hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tüm çalışmamda benden desteklerini esirgemeyen eşime ve çocuğuma sevgilerimi sunuyorum.

Mehmet Emin ÖZENÇ
BATMAN-2022

İÇİNDEKİLER

TEZ BİLDİRİMİ	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
ŞEKİLLER.....	xii
TABLOLAR.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK BİLGİ	3
2.1. Atomun Yapısı	3
2.1.1. Elektron Yörüngeleri	3
2.1.2. Kimyasal Bağlar	4
2.1.2.1. İyonik Bağlanma.....	4
2.1.2.2. Kovalent Bağlanma.....	4
2.2. Enerji Bantları.....	5
2.3. Yarıiletkenler	6
2.3.1. Katkısız Yarıiletkenler	6
2.3.2. Katkılı Yarıiletkenler	7
2.3.2.1. N-Tipi Yarıiletkenler	7
2.3.2.2. P-Tipi Yarıiletkenler	8
2.4. PN Ekleme.....	10
2.5. Metal-Yarıiletken Kontaklar	12
2.6. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken Kontaklar	15
2.6.1. İdeal Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Yapısı	15
2.6.1.1. Yığılım (Accumulation).....	17
2.6.1.2. Tükenim (Depletion).....	18
2.6.1.3. Tersinim (Inversion)	19
2.6.2. İdeallik Faktörü (İdealite Faktörü).....	19
2.6.3. İdeal Durumdan Sapma Nedenleri.....	20
2.6.3.1. Seri Direnç Etkisi.....	20
2.6.3.1.1. Cheung fonksiyonları yardımı ile diyot parametrelerinin elde edilmesi.....	22
2.6.3.1.2. Norde fonksiyonu yardımı ile diyot parametrelerinin elde edilmesi	24
2.6.4. Arayüzey Durumları	29
2.6.4.1. Arayüzey durumlarını belirleme yöntemleri.....	29
2.6.4.1.1. Akım yöntemi	29
2.6.4.1.2. Kapasitans yöntemi.....	30
2.7. Taramalı Elektron Mikroskobu - SEM	31
2.7.1. Taramalı Elektron Mikroskobunda Görüntü oluşumu.....	34

3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	35
3.1. Silisyum Yüzeylerinin Temizlenmesi.....	35
3.2. Omik Kontakları Hazırlama.....	35
3.3. Polimer Filmlerin Kaplanması.....	35
3.4. Doğrultucu Kontakları Hazırlama	36
3.5. Deneylerde Kullanılan Cihazlar.....	36
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	39
4.1. SEM Analizi	39
4.2. Oda Sıcaklığında Akım-Gerilim (I-V) Karakteristikleri	40
4.3. Seri Direnç Analizi	41
4.4. Arayüzey durumlarının tayini	45
4.5. Kapasite-Gerilim (C-V) Analizleri	47
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	50
KAYNAKLAR	52
ÖZGEÇMİŞ	55

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

He	: Helyum
Ne	: Neon
Ar	: Argon
Na	: Sodyum
Cl	: Klor
Si	: Silisyum
Ge	: Germanyum
E_v	: Valans Bandı
E_c	: İletkenlik Bandı
k	: Boltzman Sabiti
n	: İletkenlik Bandındaki Elektron Konsantrasyonu
N_c	: İletkenlik Bandında Enerji Düzeyleri konsantrasyonu
T	: Kelvin Cinsinden Sıcaklık
E_g	: Yasak Enerji Aralığı
As	: Arsenik
P	: Fosfor
Sb	: Antimon
E_F	: Fermi Enerji Seviyesi
E_d	: Donör Enerji Seviyesi
In	: İndiyum
Al	: Alüminyum
B	: Bor (Boron)
E_A	: Akseptör Enerji Seviyesi
E	: Elektrik yükü
ϕ_m	: Metalin iş fonksiyonu
ϕ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
$^{\circ}K$	: Kelvin mutlak sıcaklık
C	: MIS yapının kapasitansı
C_{sc}	: Uzay yükü kapasitansı
C_{ox}	: Yalıtkan Oksit tabakanın kapasitansı
n_n	: N iletkenlik Bandındaki Elektron Konsantrasyonu
n_p	: P iletkenlik Bandındaki Elektron Konsantrasyonu
N_{ss}	: Ara yüzey durum yoğunluğu
δ	: Yalıtkan kalınlığı
V_0	: Kontak Potansiyeli
d_{ox}	: Yalıtkan malzemenin tabaka kalınlığı
V_G	: Metal plakaya uygulanan gerilim
V_{ox}	: Yalıtkan Oksit Tabaka üzerine düşen gerilim
Ψ_s	: Arayüzeydeki bant gerilimi
ϵ_s	: Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ_i	: Oksit Tabakasının geçirgenliği
N_{sa}	: Metal ile dengede olan arayüzey durum yoğunluğu
N_{sb}	: Yarıiletken ile dengede olan arayüzey durum yoğunluğu
W_d	: Tükenim Bölgesi Genişliği
C_{LF}	: Düşük frekansta alınmış kapasite ölçümleri

A	: Diyot kontakt alanı
C_{HF}	: Yüksek frekansta alınmış kapasite ölçümleri
C_i	: Arayüzey tabaka kapasitesi
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik sabiti
d_i	: Arayüzey tabaka kalınlığı
D_{it}	: Arayüzey durumları
w	: Açısal frekans
$G_{m,maks}$	: Biriktirme bölgesinde ölçülen maksimum iletkenlik
C_m	: Maksimum iletkenlik değerine karşılık gelen kapasite
n	: İdealite Faktörü
G_{ma}	: Yığılma bölgesinde ölçülen iletkenlik
C_{ma}	: Yığılma bölgesinde ölçülen kapasite
A	: Diyotun alanı,
A^*	: Etkin Richardson sabiti
I_0	: Doyma Akımı
I	: Akım
V	: Gerilim
Ω	: Ohm
γ	: Gama

Kısaltmalar

E_F	: Fermi Enerji Seviyesi
MS	: Metal-Yarıiletken
MIS	: Metal-Yalıtkan-Yarıiletken
W_D	: Tükenim Tabakası Kalınlığı
N_{ss}	: Arayüzey durum yoğunluğu
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
RCA	: Radio Corporation of America
TMPTA	: Trimetilolpropan Triakrilat
UV	: Ultraviyole
MPS	: Metal-polimer-yarıiletken
TE	: Termoiyonik Emisyon

ŞEKİLLER

Şekil 1.1. TMPTA nın Kimyasal Yapısı.....	2
Şekil 2.1. Helyum (He), Neon(Ne) ve Argon(Ar) atomlarının yapısı	3
Şekil 2.2. Sodyum (Na) ve Klor (Cl) Atomları arasında iyonik bağlanma	4
Şekil 2.3. Silisyum (Si) Atomları Arasında Kovalent Bağlanma Şeması	5
Şekil 2.4. Yalıtkan , Yarı iletken, İletken Maddelerde Band Aralığı	6
Şekil 2.5. N-Tipi Yarıiletkenin Yapısı.....	7
Şekil 2.6. N Tipi Yarıiletkenin Band Yapısı.....	8
Şekil 2.7. P-Tipi Yarıiletkenin Yapısı.	9
Şekil 2.8. P-Tipi Yarıiletkenin Band Yapısı.....	9
Şekil 2.9. PN Eklemine Birleşmeden Önceki Yapısı	10
Şekil 2.10. PN Eklem Yapısının Birleştikten Sonraki Yapısı	11
Şekil 2.11. Diyod Sembolü.....	11
Şekil 2.12. PN Eklem diyod Enerji Diyagramı	12
Şekil 2.13. $\phi_m > \phi_s$ olduğu durumda metal-n tipi yarıiletken doğrultucu kontağın a) Kontak oluşumundan önce metal ile yarı iletkenin enerji bant diyagramı, b) Kontak oluşumundan sonra termal denge durumu, c) Metal-n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın pozitif uygulama voltajı altındaki enerji-bant diyagramı, d) Metal-n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın negatif uygulama voltajı altındaki enerji-bant diyagramı.....	13
Şekil 2.14. $\phi_m < \phi_s$ olduğu durumda metal-n tipi yarıiletken ohmik kontakta, a) Kontak oluşumundan önce metal ile yarıiletkenin enerji-bant diyagramı, b) Kontak oluşumundan sonra termal denge durumu, c) Metal-n-tipi yarıiletken ohmik kontağın doğru pozitif gerilim altındaki enerji-bant diyagramı, d) Metal- n-tipi yarıiletken ohmik kontağın ters öngerilim altındaki enerji bant diyagramı	14
Şekil 2.15. Bir MIS Yapısının Şematik Gösterimi.	15
Şekil 2.16. MIS Yapısının Kapasitans Gösterimi.....	16
Şekil 2.17. $V \neq 0$ Durumunda MIS yapının enerji – bant durumu (a) Yığılım (b) Tükenim (c) Tersinim	18
Şekil 2.18. Taramalı elektron mikroskopunun (SEM) şematik gösterimi.....	33
Şekil 3.1. Al/ TMPTA/p-Si (MPS) yapısı	36
Şekil 3.2. 0-1200 °C ayarlı Protherm PTF 12/75/800 tüp fırın	37
Şekil 3.3. Nanovak NVTH-350 termal buharlaştırma sistemi.....	37
Şekil 3.4. Keithley 4200 SCS yarıiletken karakterizasyon cihazı	38
Şekil 4.1. p-Si alt tabaka üzerine kaplanmış TMPTA foto-polimerin kesit SEM görüntüsü	39
Şekil 4.2. Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapısının LnI-V eğrisi	41
Şekil 4.3. Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapısının F(V)-V grafiği.....	42
Şekil 4.4. Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapısının dV/d(LnI)-I grafiği	44
Şekil 4.5. Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapısının H(I)-I grafiği	44
Şekil 4.6. Al/TMTPA/ p-Si (MPS) için ara yüzey durum enerji dağılım eğrileri.	46
Şekil 4.7. Farklı frekanslardaki Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapısının oda sıcaklığında (a) C-V (b) G/ω-V eğrileri	48
Şekil 4.8. Al/TMTPA/ p-Si (MPS) yapısının yüksek frekanslardaki C^{-2} -V eğrileri	49

TABLÖLAR

Tablo 4.1. Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapısının I - V ölçümünden hesaplanmış elektriksel parameter değerleri	45
Tablo 4.2. Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapısının oda sıcaklığında yüksek frekanslarda C - V ölçümlerinden elde edilmiş temel belirtken değerleri.....	49

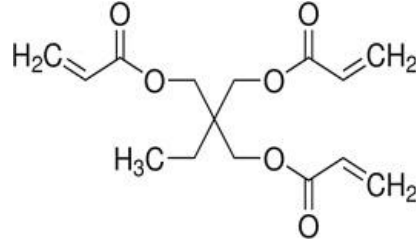
1. GİRİŞ

Metal-Yarıiletken (MS) kontaklar elektronik aygıt endüstrisinde önemli bir yere sahiptir. Ayrıca elektronik aygıt teknolojisinde MS kontaklarına uygun özellikler sağlama için metal ile yarıiletken arasına farklı oksit ve yalıtkan, inorganik ve organik malzemeler arayüz tabakası olarak kullanılabilir. Genellikle uygulamalarda arayüzey tabakası olarak SiO_2 ve SnO_2 kullanılmaktadır. Arayüzey tabakalı MS yapılarında, kullanılan arayüzey tabakasıyla metal, yarıiletkenden yalıtılmış olur ve yarıiletken ile arayüzey arasında arayüzey durumlarının sürekli bir dağılımı oluşur. Son yıllardaki bazı çalışmalarda bu tip arayüzey tabaka malzemeler yerine polimer ve polimer kompozit malzemelerin ara tabaka malzeme olarak kullanıldığı görülmektedir. Kolay sentezlenebilirlik ve uygulanabilirliği sayesinde polimer arayüzey tabakaları, yapının arayüzey durumlarını düşürmek için etkin rol oynamaktadır. Arayüzey tabakası polimer olan MS yapılar, metal/polimer/yarıiletken (MPS) yapılar olarak isimlendirilir. MPS yapılar öne çıkan yeni ve benzersiz özellikleri nedeniyle son yıllarda uygulama alanlarında öne çıkmaktadır.

Özellikle Optoelektronik aygıtlarda Ultraviyole (UV) ile kürlenebilen fotopolimerler sıkça kullanılmaktadır. UV kürlleme sistemleri günümüz endüstrisinin birçok alanında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Genel kullanım alanları yanında sıvı kristal ve yarıiletken yapılar için yapı ve desen maskeleme elemanı olarak da işleve sahiptirler. UV kürlleme sistemi içerisindeki foto-başlatıcı, UV ışığa maruz kaldığında bir fotopolimerizasyon reaksiyonu başlatır; polimerin ana bileşenleri olan monomerler ve oligomerler anında 3 boyutlu (3D) bir ağ polimeri oluşturur (Park ve Ark., 2018). Bu tip UV kürlleme metodu uçucu organik bileşiklerde hızlı kürlenme kabiliyetine sahip süreç oluşturduğu için büyük öneme sahiptir.

UV ile kürlenebilir malzemeler uygulama alanına bağlı olarak bileşimde değişiklik gösterebilir. UV kürlleme sistemleri; monomerler, oligomerler, foto-başlatıcılar, dolgu maddeleri ve geniş bir yelpazeyi içeren çoklu bileşenli katkı maddelerinden oluşur. İyi bilinen foto-polimerlerden biri olan Trimetilolpropan Triakrilat (TMPTA); plastik, yapıştırıcı, sızdırma önleyici ve mürekkep üretiminde kullanılan 3 fonksiyonlu akrilat ester (çift bağlı) bir monomerdur. Düşük uçuculuğa ve hızlı kürlenmeye (saniyeler mertebesinde) sahip olması en önemli avantajlarından. Hava koşullarına, kimyasallara ve suya dayanıklılığı yanında düşük viskozitesi çözücü

içermeyen kaplama ve mürekkep yapımında kullanılmasını sağlamaktadır. TMPTA'nın kimyasal yapısı Şekil 1'deki gibidir (Kirkland ve Fowler, 2018).



Şekil 1.1. TMPTA'nın kimyasal yapısı (Kirkland ve Fowler, 2018).

Literatürde TMPTA kullanılarak yapılan bazı çalışmalar: mikrokapsüller (Ouyang ve ark., 2020), optik-enkoderler (Tian ve ark., 2016), dış dolguları (Xu ve ark., 2005), termoplastinkiler (Zhang ve ark., 2020), lityum piller için elektrot (Kim ve ark., 2014), nem sensörü (Cho ve ark., 2007), sıvı kristal uygulamaları (Kim ve Jung, 2015) şeklindedir. Bu yaygın kullanıma rağmen yarıiletken aygıtlarda TMPTA'nın arayüzey malzemesi olarak kullanımı ile ilgili bir çalışma rapor edilmemiştir.

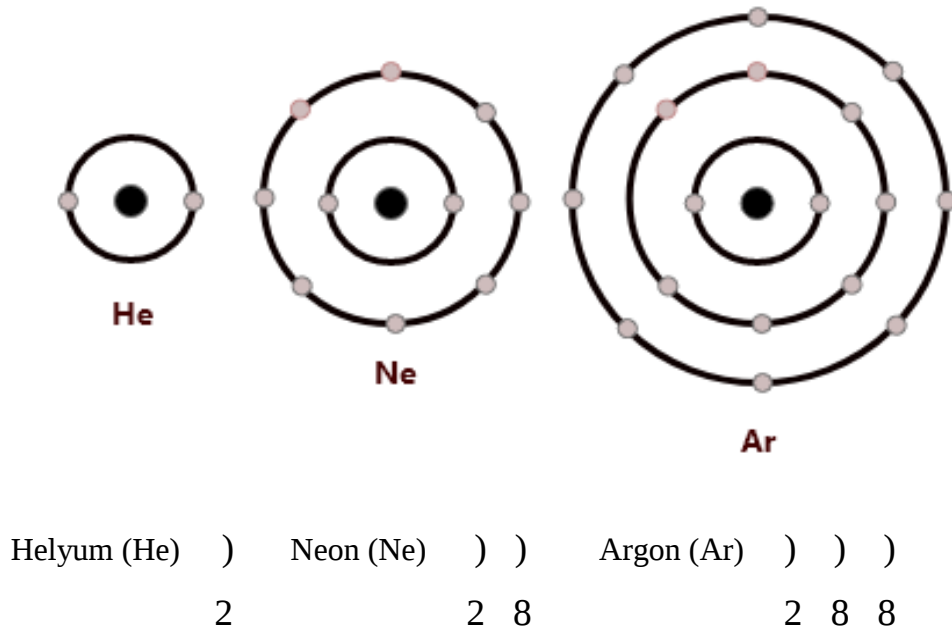
Bu çalışmada arayüzey tabakası olarak TMPTA fotopolimer kullanılarak Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapısının elektriksel özellikleri incelenmiştir. Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapısının karanlık altındaki akım-gerilim (I - V) ölçümleri gerçekleştirilerek; doğrultma oranı (R_R), idealite faktörü (n), engel yüksekliği (ϕ_B) ve seri direnç (R_s) gibi aygıt parametreleri belirlenmiştir. Bu çalışmada TMPTA fotopolimer organik arayüzey tabakasının MPS aygıtlarının fabrikasyonu için iyi bir aday olduğu görülmüştür.

2. TEORİK BİLGİ

2.1. Atomun Yapısı

2.1.1. Elektron Yörüngeleri

Elektronlar çekirdek etrafında bir veya birden fazla yörüngede dönme hareketi gerçekleştirirler. Bu yörüngeler belirli bir enerji düzeine karşılık gelmektedir. Her yörüngede bulunan elektronların maksimum sayısı atom numarasına göre farklılık göstermektedir. Örneğin Helyum (He) atomunun son yörüngesi olan birinci yörüngede 2 elektron varken Neon (Ne) atomunun son yörüngesi olan ikinci yörüngesinde 8 elektron bulunmaktadır. Atomların 1. yörüngesinde maksimum 2 elektron bulunurken 2. Ve 3. yörüngesinde en fazla 8 elektron bulunabilir. Atom numarası 20' den büyük olan atomlar için ise 3., 4., 5., 6. yörüngelerde 8 den fazla elektron bulunabilir. Yalnız en dış yörüngede en fazla 8 elektron bulunabilir. Atomun en dış yörüngesindeki elektronlar Valans Elektronlarıdır. Yörüngelerini tamamlamış atomlar kararlı yapıda olduklarından diğer atomlarla bağ kurmaya yatkın değildirler. Aşağıda bu atomlardan bazıları örnek gösterilmiştir.



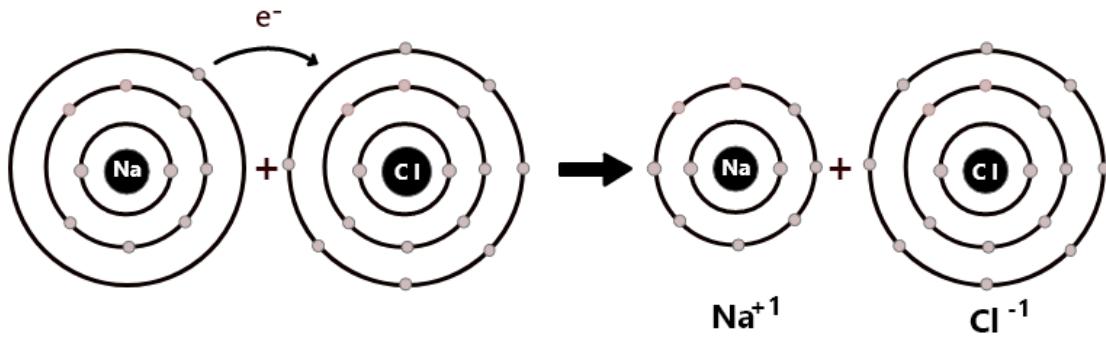
Şekil 2.1. Helyum (He), Neon(Ne) ve Argon(Ar) atomlarının yapısı

2.1.2. Kimyasal Bağlar

Atomlar iki şekilde bağ kurarlar. Bu bağlar İyonik ve Kovalent bağlardır. Bu bağları kurabilmeleri için en dış yörüngelerindeki elektroni 8'e tamamlamaları gerekir. Şimdi bu kavramları açıklayalım.

2.1.2.1. İyonik Bağlanma

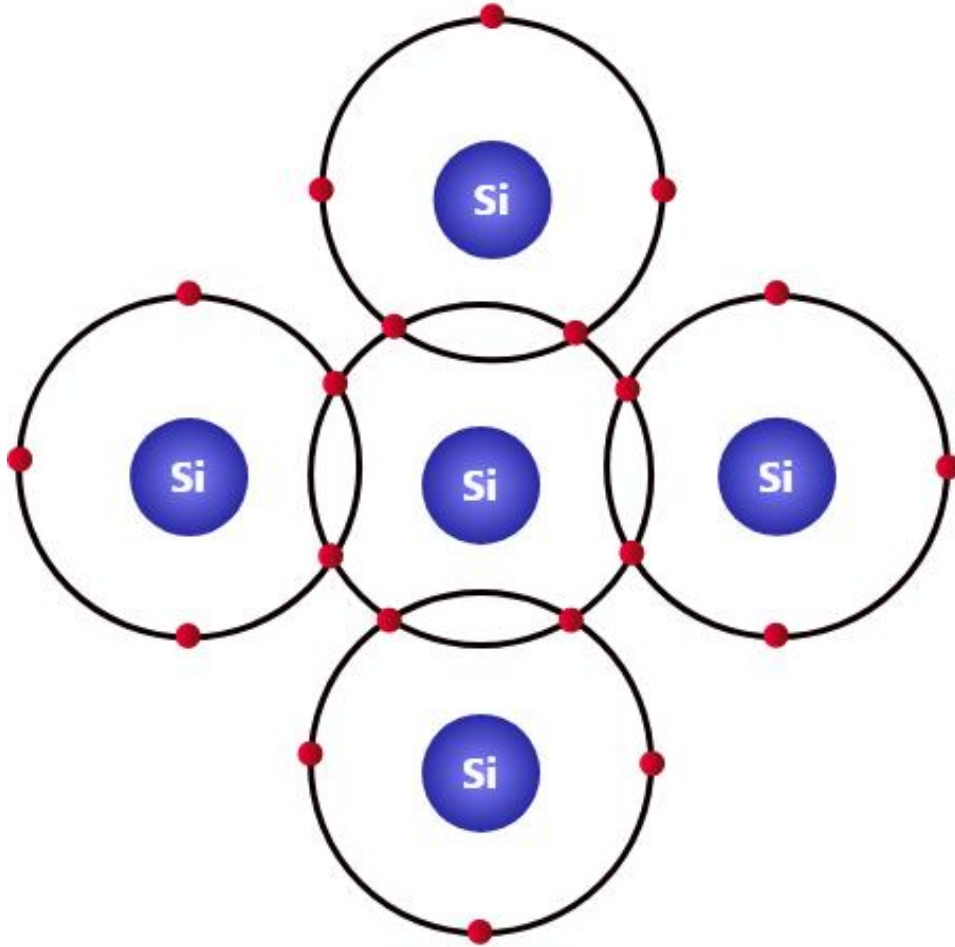
Elektronlar bir atomdan diğer atoma geçerken elektron kaybederek pozitif iyon halini alır. Diğer atom ise elektron alarak dış yörüngesini tamamlayıp negatif yüklü iyon oluştururlar. Zıt yükler birbirini çekerek iyonik bağlanmayı gerçekleştirir.



Şekil 2.2. Sodyum (Na) ve Klor (Cl) Atomları arasında iyonik bağlanma

2.1.2.2. Kovalent Bağlanma

Madde içindeki atomların elektron dizilimleri kimyasal olarak 8'li bağlarla birbirine bağlanırlar. Son yörüngedeki elektronların ortaklaşa kullanılmasıyla oluşan bağlara kovalent bağlar denir. Kovalent bağlar aynı cins atomlara arasında olabildiği gibi farklı cins atomlar arasında da olabilir. Kovalent bağların oluşması için 8 elektrona ihtiyaç vardır. Bu bağ, yarı iletken atomlarının son yörüngelerindeki elektronların ortaklaşa kullanımıyla gerçekleşir. Yarıiletken atomu olan Silisyumu (veya germanyumu) ele alırsak, dört elektronu komşu silisyum atomlarının elektronlarını ortak olarak kullanır. Bu durumdaki Silisyum(Si) atomları arasında kovalent bağ oluşmu olur. Silisyum ya da germanyum kristali ısıtılırsa yada elektrik akımına maruz kalırsa, çok az sayıdaki elektron serbest hale geçer. Bu durumda çok az da olsa iletken yapı oluşur. Aşağıda Silisyum(Si) atomlarının bağlanma şeması gösterilmektedir.

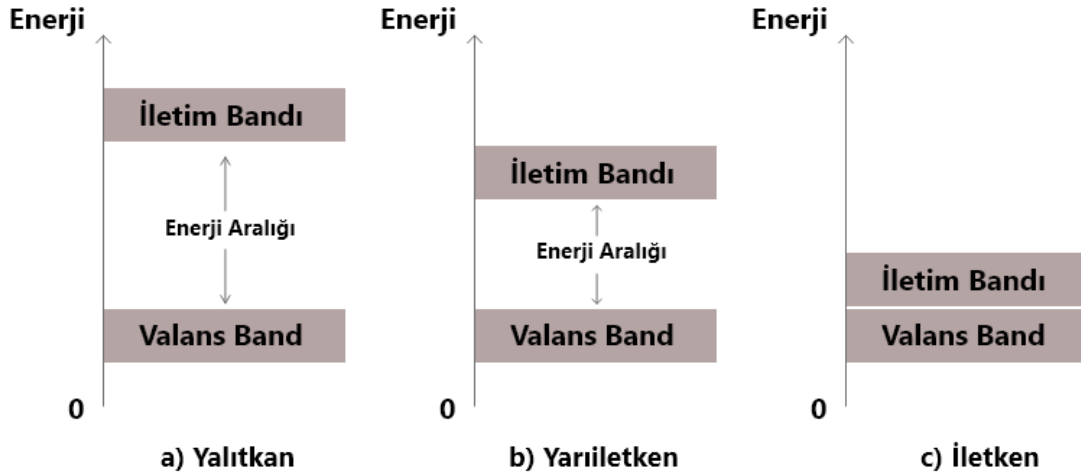


Şekil 2.3. Silisyum (Si) Atomları Arasında Kovalent Bağlanma Şeması

2.2. Enerji Bantları

Maddelerin iletken, yalıtkan veya yarıiletken durumlarına göre sınıflandırılmasında enerji bantları önemli bir etkidir. Yalıtıkanda enerji bandı çok geniştir. Ayrıca serbest elektronu çok az sayıdadır. Bu durumda serbest elektronlar, iletkenlik bandına geçemezler. İletkenlerde ise valans bandı ile iletkenlik bandı birbiri içerisine geçmiş durumdadır. Farklı bir enerji uygulamaya gerek kalmadan valans elektronların çoğu iletkenlik bandına geçebilir. Yarıiletkenlerde ise enerji bant aralığı; yalıtıkana göre dar, iletkenine göre ise geniştir (GÜMÜŞ, 2013).

Elektronların her yörüngesi bir enerji düzeyini ifade eder. Atomlar birbirine yaklaşıp atomlararası mesafe azaldıkça enerji düzeyleri üst üste biner ve düzeyler BAND oluşturacak şekilde genişlerler.



Şekil 2.4. Yalıtkan, Yarı iletken, İletken Maddelerde Band Aralığı

2.3. Yarıiletkenler

Maddenin iletkenliğindeki en önemli kriter atomların son yörüngesindeki elektron sayılarıdır. Bu son yörünge ‘Valans Yörüngesi ‘ , üzerindeki elektronlara ise ‘Valans Elektron’adı verilir. Son yörüngesindeki elektron sayısı 4 ten büyük olan maddeler Yalıtkan, 4 ten küçük olan maddeler ise İletken adını alır. Yarıiletkenlerde ise Valans yörüngesinde 4 elektron bulunduran maddelerdir. Bu maddeler ne tam iletken ne de tam yalıtkan özellik gösterirler. Bunlara Silisyum (Si), Germanyum (Ge) olarak örnek gösterebiliriz . Yarıiletkenleri Katkılı ve Katkısız olmak üzere iki sınıfa ayırabiliriz.

2.3.1. Katkısız Yarıiletkenler

Yarıiletken içinde safsızlık olmayanlardır. 0 °K (-273 °C) ‘de yük taşıyıcısı bulunmaz. Isı alan Valans Elektronları iletkenlik bandına geçebilir. Bu nedenle iletken duruma geçer. Taşıyıcılar çift olarak oluşur ve iletkenlik bandındaki elektron yoğunluğu (n) ile valans bandında meydana gelen hole (p) yoğunluğu birbirine eşit(n=p) olur. Elektronların iletkenlik bandına bulunma olasılığını Boltzmann Faktörü belirler.

$$\text{Boltzman Faktörü: } \exp(-E_g/2kT) = n/N_c \quad (2.1)$$

k: Boltzmann Sabiti = $8.6 \times 10^{-5} \text{ eV/}^\circ\text{K} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ Joule /}^\circ\text{K}$

n : İletkenlik Bandındaki Elektron Konsantrasyonu

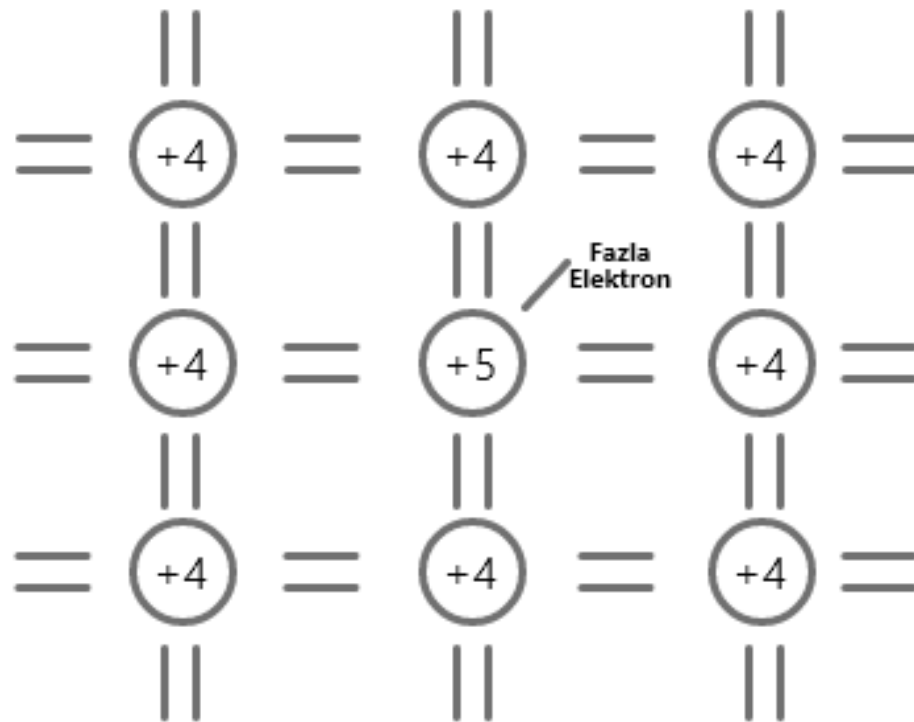
N_c : İletkenlik Bandında enerji düzeyleri konsantrasyonu

2.3.2. Katkılı Yarıiletkenler

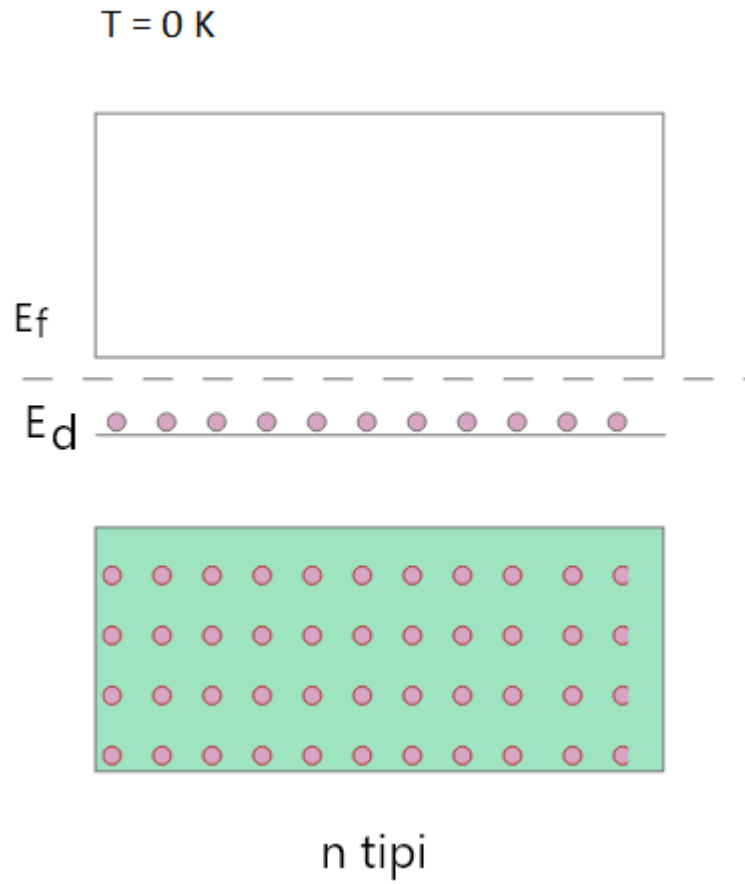
Yarıiletkenlerin katkılanmasıyla oluşur. Bunu N-Tipi ve P-Tipi olmak üzere sınıflandırabiliriz.

2.3.2.1. N-Tipi Yarıiletkenler

As, P, Sb gibi 5 valans elektrona sahip safzıklık elementleri Silisyum veya Germanyum kristal yapısına eklenmesiyle oluşur. Safsızlık elementinin 4 valans elektronu, Si veya Ge'un valans bandını 8'e tamamlar. Geriye kalan 5. Elektron negatif yük taşıyıcısı olarak ortaya çıkar.



Şekil 2.5. N-Tipi Yarıiletkenin Yapısı



Şekil 2.6. N Tipi Yarıiletkenin Band Yapısı

E_f : Fermi Enerji Seviyesi

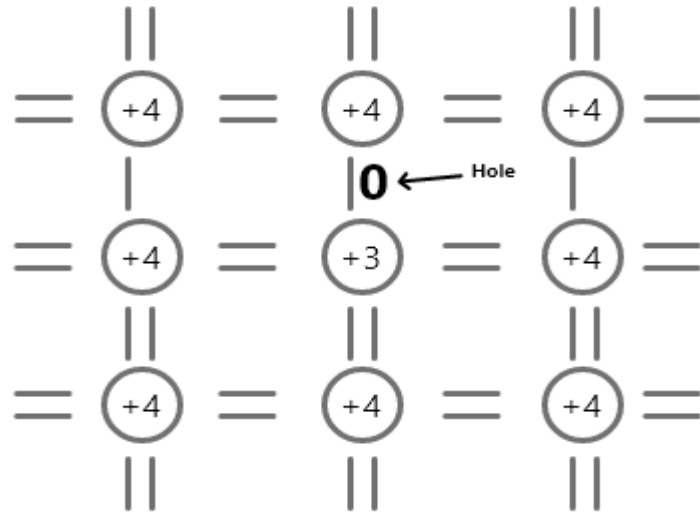
E_d : Donör Enerji Seviyesi

Elektronu Donör seviyesinden iletkenlik seviyesine çıkarmak için gerekli $E_f - E_d$ enerjisi Germanyum (Ge) için yaklaşık olarak 0.01eV, Silisyum (Si) için ise yaklaşık olarak 0.04 eV ‘tur

2.3.2.2. P-Tipi Yarıiletkenler

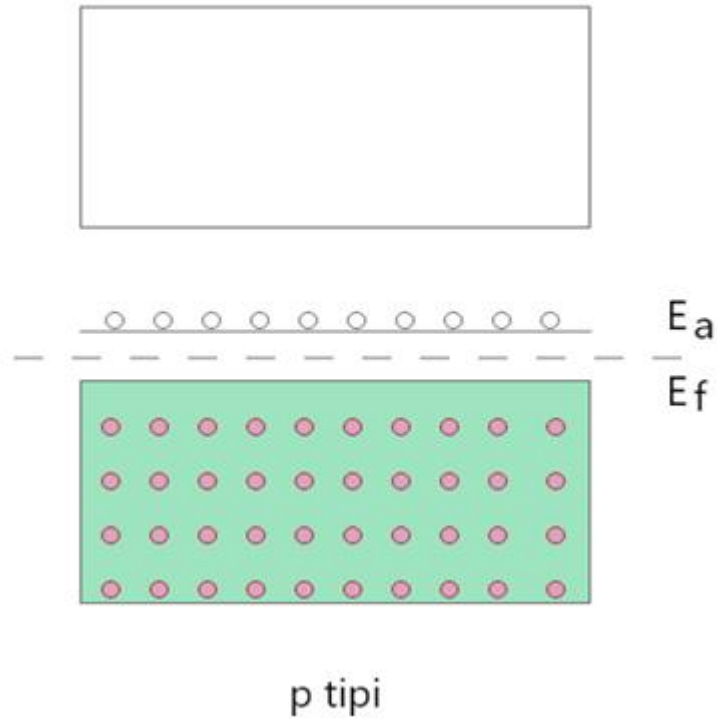
In, Al, B gibi 3 valans elektronla sahip safsızlık elementleri Si veya Ge eklendiğinde elektron yoksunluğu nedeniyle ‘Hole’ yani boşluk oluşur. Bu durumda Silisyum (Si) veya Germanyum (Ge) ‘un valans bandına çok yakın enerji düzeyi meydana getirir. Sıcaklığın artmasıyla Valans bandındaki elektronlar E_A düzeyine

geçerek geride Valans bandında 'Hole' (Boşluk) bırakırlar. Bu hole (boşluk) katkısızza göre daha fazladır. Bu sebeple maddenin iletkenliğini artırır.



Şekil 2.7. P-Tipi Yarıiletkenin Yapısı

$T = 0 \text{ K}$



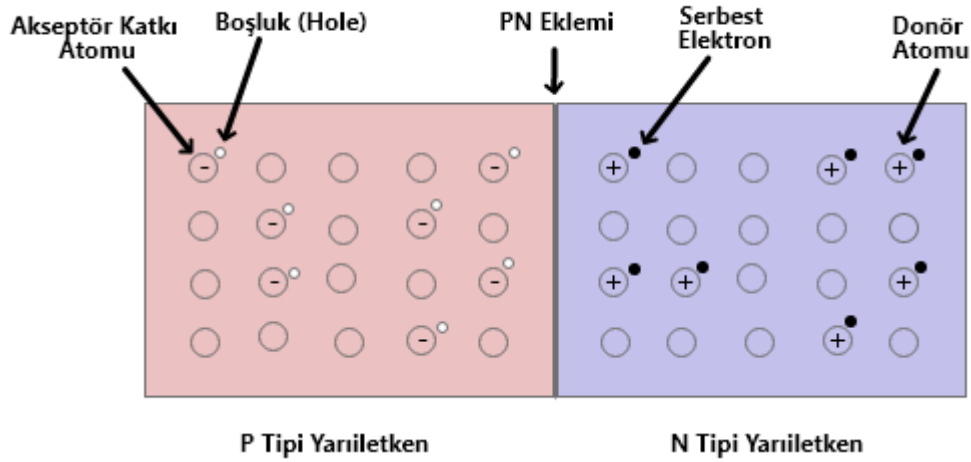
Şekil 2.8. P-Tipi Yarıiletkenin Band Yapısı

E_A : Akseptör Enerji Seviyesi

E_f : Fermi Enerji Seviyesi

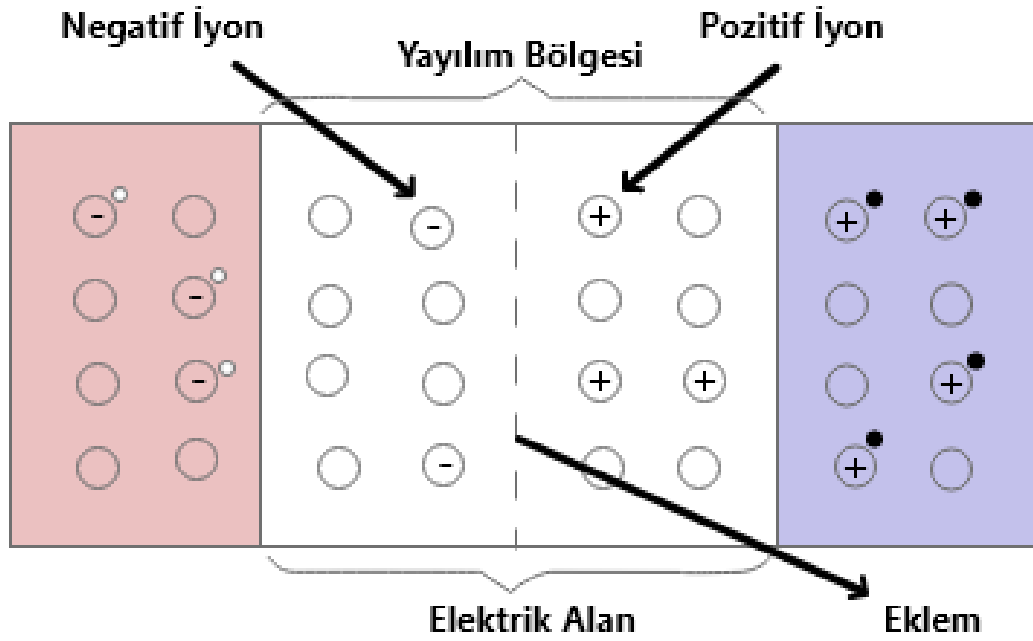
Akseptör Enerji seviyesi Germanyum (Ge) için 0.01 eV, Silisyum (Si) için 0.04 eV kadar yukarıdadır.

2.4. PN Eklemleri



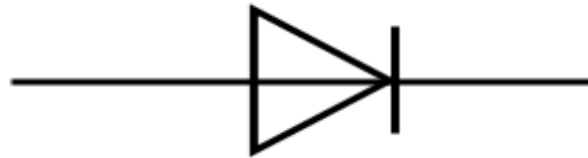
Şekil 2.9. PN Ekleminin Birleşmeden Önceki Yapısı

P-Tipi ve N-Tipi iki yarıiletkenin birleşmesiyle 'PN Eklemleri' meydana gelir. PN Eklemleri doğrultucu diyod diye adlandırdığımız akım doğrultmada, Foto-Diyod diye adlandırdığımız foton dedektörü, LED (ışık yayan diyod), Transistör ve diğer elektronik devrelerin temelini oluşturur. Hole diye nitelendirdiğimiz boşluklar P-Tipi yarıiletkenlerde çoğunlukta ve elektronlar ise azınlıktadır. N-Tipi yarıiletkenlerin yapısında ise Hole dediğimiz boşluklar azınlıkta ve elektronlar ise çoğunluk durumundadır. Bu iki tip yarıiletken olan P-Tipi ve N-Tipi birleşip PN Eklemleri diye nitelendirdiğimiz yapı oluşturulduğunda N tipi yarıiletken tarafındaki elektronlar P tarafına geçip, geride pozitif yüklü safsızlık atomları oluştururken, P tarafına geçişi gerçekleştiren elektronlar, holler ile birleşme işlemi gerçekleştirip nötr atomlar ortaya çıkar. Elektronların P tarafına geçişi gerçekleşerek P deki azınlık elektronlarını itmesiyle bir noktada durdurarak N elektronları eklemin sol tarafında birikmiş olur. Bu durum aynı N tarafında da gerçekleşip aşağıdaki gibi bir durum meydana gelir.



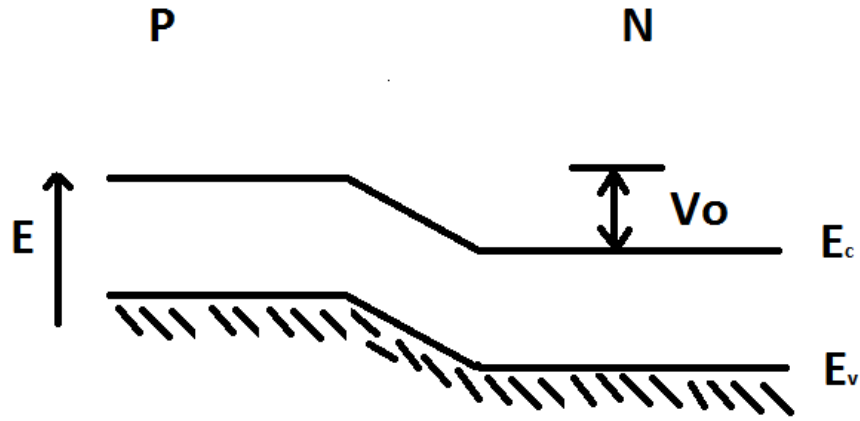
Şekil 2.10. PN Eklem Yapısının Birleştikten Sonraki Yapısı

P-Tipi ve N-Tipi yarıiletkenler birleşmeyi gerçekleştirdiğinde eklem bölgesi meydana gelir. Bu bölgeye ‘Deplasyon Bölgesi’ veya ‘Yayılm Bölgesi’ adı verilir. Bu bölge nötr durumdadır. Deplasyon bölgesinde ayrıca bir elektrik alan meydana gelir. Deplasyon bölgesinde N tarafının yakınında pozitif bir tabaka, Deplasyon bölgesinin P tarafının yakınında ise negatif yüklü tabaka oluşmuştur. Ayrıca Deplasyon bölgesinin solunda P bölgesi ve sağında ise N bölgeleri oluşmuştur. Oluşturulan bu PN eklem yapısına ayrıca Diyod denir. Şekli ise Şekil 2.11 de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Diyod Sembolü

PN eklem diyodunun enerji diyagramı Şekil 2.12 de gösterilmiştir. Daha düşük enerjili N tarafı, P tarafına iletkenlik elektronu verirken, ayrıca P tarafına da enerji transferi gerçekleşmiş olur. Bunun nedeni N iletkenlik elektronlarının daha yüksek enerji düzeyinde olmalarıdır.



Şekil 2.12. PN Eklem diyod Enerji Diyagramı

$$\text{Eklem Potansiyel farkı } V_0 = (kT/e) \cdot \ln(n_n/n_p) \quad (2.2)$$

k : Boltzman Sabiti

T : Mutlak Sıcaklık (K)

e : Elektron Yüğü = 1.6×10^{-19} Coulomb

n_n : N iletkenlik Bandındaki Elektron Konsantrasyonu

n_p : P iletkenlik Bandındaki Elektron Konsantrasyonu

V_0 : Kontak Potansiyeli

2.5. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklar

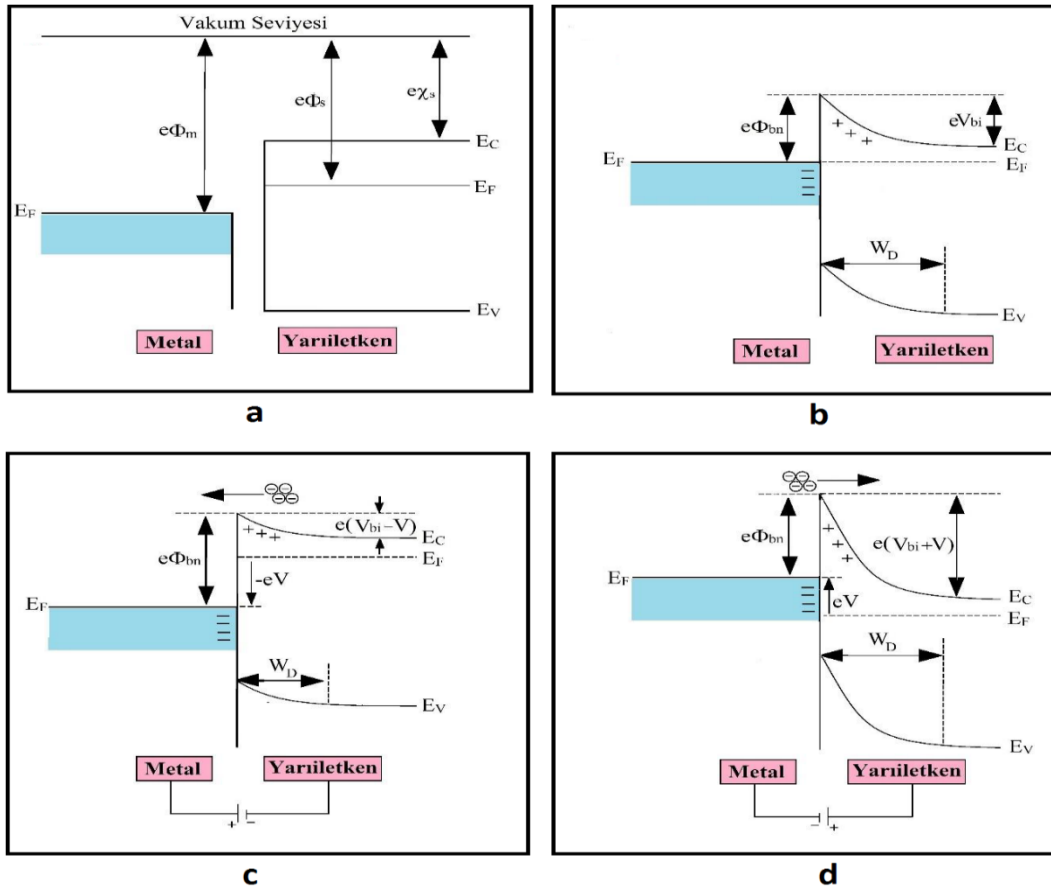
Metal ile yarıiletken çeşitli yöntemlerle kontak durumuna getirildiğinde oluşan yapıya metal/yarıiletken kontak ya da Schottky kontağı adını alır. Metal/Yarıiletken kontakların iletkenlik özelliklerinin incelenebilmesi için uygun kontakların yapılması gerekmektedir. Kontak yapıldığında, iki materyalin de Fermi seviyeleri ısısal dengede uyuşmak zorundadır. Bir metal ve yarıiletken eklem yapmak üzere birleştirildiğinde, her iki maddenin Fermi enerji düzeyleri eşit oluncaya kadar bir taraftan diğer tarafa elektron akışı olur. Yeni bir yük dağılımı sonucunda da bir potansiyel engeli oluşur. Oluşan engelin doğrultucu ya da omik olması yarıiletkenin tipine, metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonuna bağlıdır. Buna göre;

Metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda:

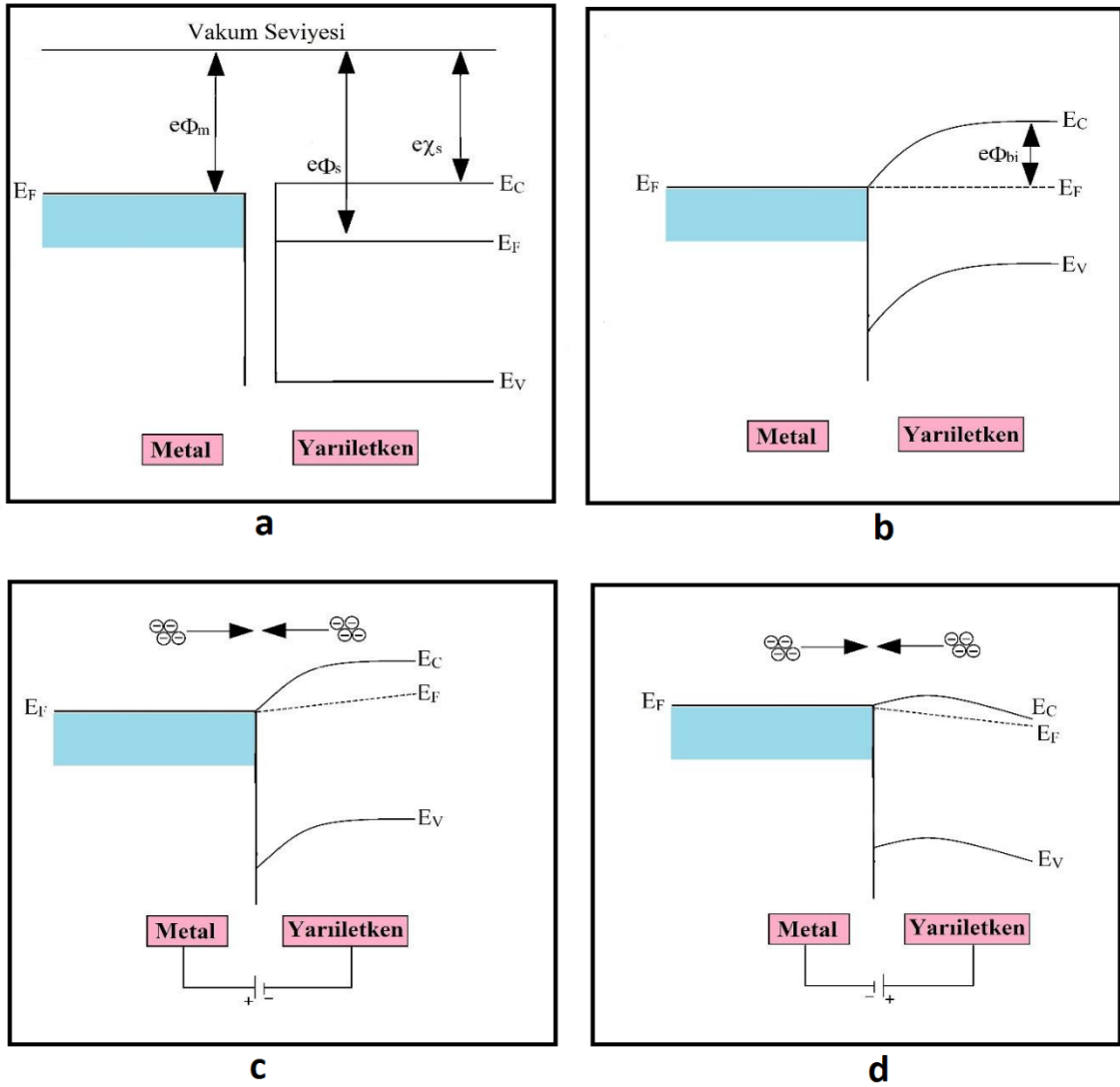
$\phi_m > \phi_s$ ise kontak doğrultucu veya Schottky Kontak

$\phi_m < \phi_s$ ise kontak omik

Metal/n-Tipi yarı iletken yapılarda metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyükse ($\phi_m > \phi_s$) bu ara bölgede potansiyel engeli oluşur. Temas ettirilen bu bölge doğrultucu kontak veya Schottky Kontakı adını alır. Bu ara bölge uygulanan gerilimle bir yönde akım geçirirken diğer yönde ise potansiyel engeli sebebiyle akım geçirmez. İkinci durumda metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçükse ($\phi_m < \phi_s$) bu durumda potansiyel engeli oluşmaz ve akımın iki yönde de geçmesine neden olur. Bu durumda temas bölgesi Omik Kontak adını alır. Bu durumu şekilde özetlemek gerekirse;



Şekil 2.13. $\phi_m > \phi_s$ olduğu durumda metal-n tipi yarıiletken doğrultucu kontakın a) Kontak oluşumundan önce metal ile yarı iletkenin enerji bant diyagramı, b) Kontak oluşumundan sonra termal denge durumu, c) Metal-n-tipi yarıiletken doğrultucu kontakın pozitif uygulama voltajı altındaki enerji-bant diyagramı, d) Metal-n-tipi yarıiletken doğrultucu kontakın negatif uygulama voltajı altındaki enerji-bant diyagramı.



Şekil 2.14. $\phi_m < \phi_s$ olduğu durumda metal-n tipi yarıiletken ohmik kontakta, a) Kontak oluşumundan önce metal ile yarıiletkenin enerji-bant diyagramı, b) Kontak oluşumundan sonra termal denge durumu, c) Metal-n-tipi yarıiletken ohmik kontağın doğru pozitif gerilim altındaki enerji-bant diyagramı, d) Metal-n-tipi yarıiletken ohmik kontağın ters öngerilim altındaki enerji bant diyagramı

Metal/p-tipi yarıiletken kontaklarda:

$\phi_m < \phi_s$ ise kontak doğrultucu

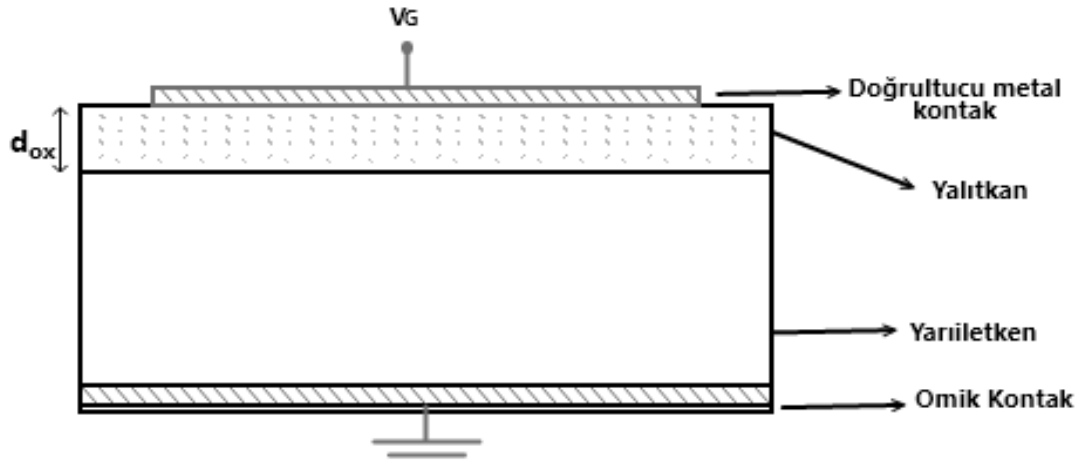
$\phi_m > \phi_s$ ise kontak omik

Metal/p-tipi yarıiletken kontaklarda ise tam tersi bir durum söz konusu olur. Metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçükse ($\phi_m < \phi_s$) bu ara bölgede potansiyel engeli oluşur. Temas ettirilen bu bölge doğrultucu kontak veya Schottky Kontakı adını alır. Bu ara bölge uygulanan gerilimle bir yönde akım geçirirken diğer yönde ise potansiyel engeli sebebiyle akım geçirmez. İkinci durumda metalin iş

fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyükse ($\phi_m > \phi_s$) bu durumda potansiyel engeli oluşmaz ve akımın iki yönde de geçmesine neden olur. Bu durumda temas bölgesi Omik Kontak adını alır.

2.6. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Kontaklar

Metal ve yarıiletken arasına katkılanan yalıtkan malzemeler metali ile yarıiletkeni birbirinden izole ederek Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) yapıları meydana getirir. Bu yalıtkan yapay olabildiği gibi doğal olarak ta oksitlenip MIS yapıyı oluşturabilir. MIS yapılarda genelde yarıiletken malzeme olarak Silisyum(Si) alt tabaka kullanılır. Bir MIS yapısının şematik gösterimi Şekil 2.15'teki gibidir.



Şekil 2.15. Bir MIS Yapısının Şematik Gösterimi

d_{ox} : Yalıtkan malzemenin tabaka kalınlığı

V_G : Metal plakaya uygulanan gerilim

2.6.1. İdeal Metal-Yalıktan-Yarıiletken(MIS) Yapısı

İdeal bir MIS yapıya gerilim uygulandığında yarıiletken tabakada yük kayması meydana gelir. Yarıiletkende serbest ve hareketli olan yükler metaldekine göre daha azdır. Fakat uygulanan gerilimle değişiklik gösterir. Yarıiletken bölgesindeki arayüzeyde bantların bükülmesi sonucu uzay yükü meydana gelir. Termal denge

sağlandığında uygulanacak gerilimin büyüklüğüyle uzay yükü belirlenmiş olur. Yarıiletken bölgesindeki yükler katkı durumlarına göre çoğunluk taşıyıcı ve azınlık taşıyıcı olup, uygulanan gerilime göre yükler uzay yükü bölgesi veya arayüzey bölgesinde yığılmalar meydana getirir. Bu gerilimin bir kısmı yarıiletken bir kısmı da yalıtkan malzeme üzerine düşer. Bu durumu şöyle formülize edebiliriz;

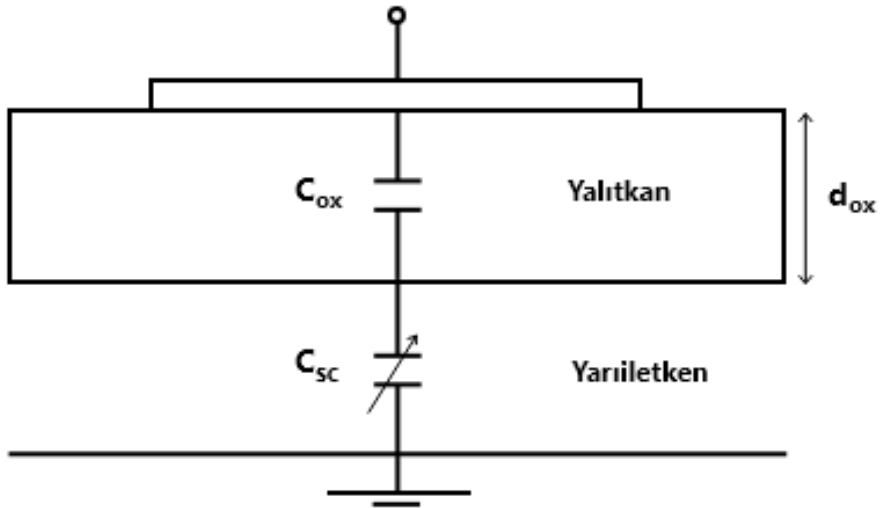
$$V_G = V_{ox} + \psi_s \quad (2.3)$$

V_G : Metal plakaya uygulanan gerilim

V_{ox} : Yalıtkan oksit tabaka üzerine düşen gerilim

ψ_s : Arayüzeydeki bant gerilimi

Arayüzey tabakadan kaynaklı metal ile yarıiletken arasında bir kapasitans meydana gelir. Bu kapasitansa MIS kapasitansı adı verilir. Bu kapasitansın özelliğini yalıtkan malzeme ve yalıtkan/yarıiletken arayüzeyi belirler. Bir MIS yapının kapasitansı Şekil 2.16 ' da gösterilmiştir.



Şekil 2.16. MIS Yapının Kapasitans Gösterimi

bu MIS yapının Kapasitans formülü aşağıdaki gibidir;

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{SC}} = \frac{1}{C_{OX}} \quad (2.4)$$

C : MIS yapının kapasitansı

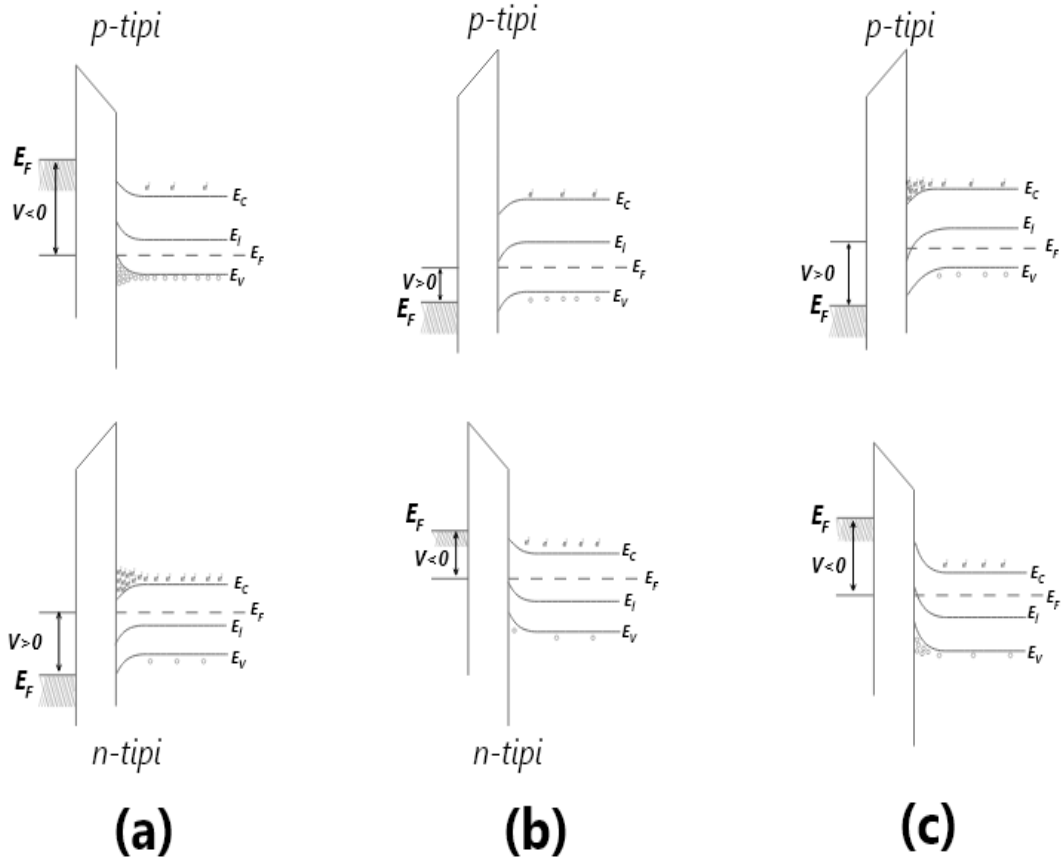
C_{SC} : Uzay yükü kapasitansı

C_{OX} : Yalıtkan oksit tabakasının kapasitansı

bu denklemde de görüldüğü gibi MIS yapının kapasitansı Uzay yükü kapasitansı ve Yalıtkan oksit tabakasının kapasitansına seri bağlanmasına eşdeğerdir.

2.6.1.1. Yığılm (Accumulation)

Metal plakaya uygulanacak bir negatif gerilim ($V_G < 0$) sonucu oluşacak olan elektirik alan, yarıiletkende çoğunluk durumundaki yük taşıyıcıları olan boşlukları (hole) yarıiletkenin arayüzeyine çekecektir. Bu durum Şekil 2.17.a 'da gösterilmektedir. Yük akışının olmadığı ideal bir diyotta Fermi enerji (E_f) seviyesi yarıiletkende sabit kalır. Taşıyıcı yoğunluğu üstel olarak enerji farkına ($E_f - E_v$) bağlı olması sebebiyle yarıiletken yüzeyi yakınınlarda bant bükülmesi çoğunluk taşıyıcısı olan boşlukların (hole) yığılmasına neden olur. Valans bandının yarıiletken ara yüzeyinde Fermi seviyesine yaklaştığı, iletkenlik bandının ise buna duruma bağlı olarak yukarı yönlü büküldüğü bu duruma, çoğunluk yük taşıyıcılarının ara yüzeyde birikmeleri sebebiyle "yığılma" adını alır.



Şekil 2.17. $V \neq 0$ Durumunda MIS yapının enerji – bant durumu (a) Yığılım (b) Tükenim (c) Tersinim

Bundan ötürü arayüzeyde birikmiş olan yükün yüzey yükü olması nedeniyle $C_{sc} \rightarrow \infty$ ve böylece eşdeğer kapasite $C \rightarrow C_{ox}$ olur.

2.6.1.2. Tükenim (Depletion)

Metal/yalıtkan/p-tipi yarıiletken (MIS) yapısının metal plakasına düşük bir pozitif gerilim ($V_G > 0$) uygulanması durumunda yalıtkan içinde meydana gelen elektrik alan yarıiletkenin ara yüzeyindeki boşlukları(hole) yüzeyden uzaklaştırır. Bu sebeple yarıiletkenin yüzeyinde bulunan boşluk(hole) yoğunluğu, iç kısımlarında bulunan boşluk(hole) yoğunluğundan küçük olmaya başlar ve bantlar aşağı doğru bükülür. İletkenlik bandının yarıiletkenin yüzeyine yakın bölgelerinde, elektronlar birikmeye başlar. Yarıiletken yüzeyinde, uygulanan gerilim sebebiyle değişen W genişliğinde bir bölgede, boşlukların(hole) azaldığı bir tüketim bölgesi olduğu bu bölgeye tüketim bölgesi, bu olaya ise "tükenim" olayı denir (Şekil 2.17.b).

2.6.1.3. Tersinim (Inversion)

Metal plakaya daha büyük bir pozitif gerilim uygulandığı zaman ($V_G \gg 0$) bantlarda aşağı doğru bükülme gerçekleşir. Saf durumdaki enerji seviyesi E_i , Fermi enerji seviyesinin (E_f) altına yerleşir. Bu sebeple yarıiletkenin yüzeyinde azınlık taşıyıcı olan elektronlar çoğalmaya başlar ve elektron yoğunluğu, boşluk(hole) yoğunluğundan büyük olur. Bu aşamadan sonra p-tipi yarıiletkenin yüzeyi, n-tipi yarıiletken gibi davranır. Bu olay, Şekil (2.17.c) 'deki enerji bant şemasında gösterildiği gibi yarıiletken yüzeyinin tersinimi olarak isimlendirilir.

2.6.2. İdeallik Faktörü (İdealite Faktörü)

İdeallik faktörü yalıtkan kalınlığına (δ) ve ara yüzey durumlarının yoğunluğuna (N_{ss}) bağlı olarak denklem 2.5 teki gibidir(Card and Rhoderick 1971, Card 1976),

$$n = 1 + \frac{\left(\frac{\delta}{\epsilon_i}\right) \left(\frac{\epsilon_s}{W_d + qN_{sb}}\right)}{1 + \left(\frac{\delta}{\epsilon_i}\right) qN_{sa}} \quad (2.5)$$

ϵ_i : Oksit tabakasının geçirgenliği

ϵ_s : Yarıiletkenin geçirgenliği

N_{sa} : Metal ile dengede olan ara yüzey durum yoğunluğu

N_{sb} : Yarıiletken ile dengede olan durumlarının yoğunluğu

W_d : Tüketim bölgesinin genişliğidir

Bu denklem ara yüzey durumlarına göre üç farklı şekilde ifade edilir; Arayüzey durumu yoğunluğu için;

(1) Küçük olması durumunda

$$n = 1 + \frac{\delta \epsilon_s}{W_d \epsilon_i} \quad (2.6)$$

olur,

(2) Metal ile dengede olduğu durumlarda,

$$n = 1 + \frac{\delta \varepsilon_s}{W_d (\varepsilon_i + \delta q N_{sa})} \quad (2.7)$$

olur,

(3) Yarıiletken ile dengede olduğu durumda,

$$n = 1 + \left(\frac{\delta}{\varepsilon_i} \right) \left(\frac{\varepsilon_s}{W_d + q N_{sb}} \right) \quad (2.8)$$

şeklinde olur.

2.6.3. İdeal Durumdan Sapma Nedenleri

2.6.3.1. Seri direnç etkisi

Metal-yarıiletken ve metal-yalıtkan-yarıiletken yapılarının elektriksel karakteristiği hesaplanırken ideal durumdan sapmalar meydana gelebilir. İdeal durumdan sapma nedenlerinden biri de seri direnç etkisidir. Bu farklı nedenlerden dolayı meydana gelebilir. Bu sapmaların (1) doğrultucu kontakta alınan iletken tel, (2) silisyum kristaline teması bulunan arka omik kontak, (3) gövde ile arka kontak arasına yerleştirilen kirli bir film tabakası veya harici yabancı madde, (4) doğrultucu kontak altındaki silisyum yüzeyi kenarındaki tüketim tabakası ile arka kontak arasındaki gövde direnci (5) doğrultucu kontak altındaki silisyum içerisinde düzgün olmayan katkı dağılımıdır. Bu etki farklı yöntemlerle azaltılabilir. En çok kullanılan yöntem arka kontağa ısı işlemi uygulanarak metalin yarıiletken yüzeyine çöktürülmesidir. Bu işleme “Alloy” işlemi denir. Seri direnç hesaplamaları için son yıllarda daha modern yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemlerden ilk olarak Norde tarafından geliştirilen yöntemdir. Bu yöntemle göre $n=1$ durumu için seri direnç ve engel yüksekliğini, tanımlanan orijinal bir $F(V)$ fonksiyonu yardımı sayesinde elde edilmesi amaçlanmaktadır (Norde, 1979). Bu yöntemle R_s ve ϕ_b 'nin sıcaklıkla değişmediği durumlara uygulanması sebebiyle sadece bir sıcaklıktaki Akım-Gerilim ($I - V$) eğrisine ihtiyaç var. Sonraki zamanlarda

Sato ve Yasamura, Norde yöntemini geliştirerek ideallik faktörünün(n), 1'den büyük olduğu durumlarda($1 < n < 2$) da n , R_s ve ϕ_b 'nin hesaplanabileceğini göstermişlerdir (Sato and Yasamura, 1985). Buna benzer bir yöntem ise McLean tarafından geliştirilmiştir (McLean, 1986). Bohlin, ideallik faktörünün (n) $1 < n < \delta$ yani 1'den çok büyük olması durumunda Schottky engel diyodunun Akım-Gerilim (I - V) ölçümünden elde edilen R_s , ϕ_b ve n değerlerinin belirlenmesini mümkün kılan Norde fonksiyonunu yeniden düzenlemiştir (Bohlin, 1986). Bununla birlikte bu yöntemde bazı parametreleri belirlemek oldukça zordur. Cheung'ler tarafından ise Akım-Gerilim (I - V) ölçümlerinden elde edilen fonksiyonlar yardımıyla seri direnci belirlemek oldukça kolaydır (Cheung and Cheung, 1986). Uygulanan gerilimin(V) tümü diyot üzerine düşmemesi, ideal durumdan sapmaları mümkün kılar. Bu durumda

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.9)$$

denklem 2.9 daki bağıntıya seri direnç etkisi ilave edilmesi durumunda akım(I) ifadesi şu şekilde olacaktır;

$$n = I_0 \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) \quad (2.10)$$

burada IR_s , uygulanan gerilimin seri direnç üzerine düşen kısmıdır. Denklem 2.9'un logaritması alınıp gerekli işlemler yapılması durumunda,

$$V = \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) + n\phi_b + IR_s \quad (2.11)$$

denklemini elde edilir. Denklem 2.11'in $\ln I$ 'ya göre diferansiyeli alınması durumunda ise

$$\frac{d(V)}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (2.12)$$

denklemini elde edilir. Potansiyel engel yüksekliğini bulmak için ise,

$$\ln(I) = \ln(AA^*T^2) - \frac{e\phi_b}{kT} + \frac{eV}{nkT} - \frac{eIR_s}{nkT} \quad (2.13)$$

şeklinde bir $H(I)$ fonksiyonu tanımlayıp, denklem 2.11 ve 2.12'den faydalanabiliriz. Buna göre;

$$H(I) = n\phi_b + IR_s \quad (2.14)$$

bağıntısını elde etmiş oluruz. Denklem 2.14'ten $H(I)$ - I 'nin grafiği çizgisel bir doğru verir. Bu doğrunun eğiminden seri direnç ve düşey eksenini kestiği noktadan ise Denklem 2.12'de bulmuş olduğumuz ideallik faktörü(n) değeri yerine yazılmasıyla engel potansiyelini hesaplayabiliriz. Bununla birlikte seri direnç Kapasite-Gerilim(C - V) ölçümlerinden de hesaplanabilir (Nicollian and Brews, 1982).

2.6.3.1.1. Cheung fonksiyonları yardımı ile diyot parametrelerinin elde edilmesi

Diyot parametrelerinin elde edilmesinin diğer bir yöntemi ise Cheung (1986) tarafından geliştirilen Cheung fonksiyonlarıdır. Diyoda uygulanacak olan gerilimin artan değerlerinde Akım - Gerilim ($I - V$) eğrisinde lineerlikten sapmaya neden olan R_s seri direncin varlığı gözlenmiş olacak. Cheung fonksiyonları bu seri direncin çözümlenmesine yardımcı olacaktır. Bu sebeple denklem,

$$n = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV - IR_s}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.15)$$

olacak. Denklem (2.15)' te 1 değeri $V \gg 3kT / e$ için ihmal edilebileceğinden bu denklem,

$$V = \frac{nkT}{e} \ln\left(\frac{1}{AA^*T^2}\right) + n\phi_b + IR_s \quad (2.16)$$

gibi olur. İki tarafın da logaritması alındığında,

$$\ln(I) = \ln(I_0) + \frac{eV}{nkT} - \frac{eIR_s}{nkT} \quad (2.17)$$

denklem (2.17) elde edilir. Potansiyel ifadesini yalnız bırakırsak,

$$V = \frac{nkT}{e} \ln(I) + IR_s - \frac{nkT}{e} \ln(I_0) \quad (2.18)$$

şeklinde olur. V 'nin $\ln(I)$ ya göre türevi alınırsa,

$$\frac{dV}{d \ln(I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (2.19)$$

bu şekilde birinci Cheung fonksiyonu elde edilmiş olur. Bu denklem $dV/d \ln(I) - I$ grafiği belli bir kısımda bir doğru verir. Bu doğrunun eğimi R_s direncini verir ve $dV/d \ln(I)$ ekseninde $I = 0$ için dikey eksen kesme noktasından n idealite faktörü hesaplanabilir. Diğer Cheung fonksiyonu ise I_0 'ın yerine yazılması durumunda,

$$\ln(I) = \ln(AA^*T^2) - \frac{e\phi_b}{kT} + \frac{eV}{nkT} - \frac{eIR_s}{nkT} \quad (2.20)$$

elde edilir. V 'yi yalnız bırakacak olursak,

$$V = \frac{nkT}{e} \ln\left(\frac{1}{AA^*T^2}\right) + n\phi_b + IR_s \quad (2.21)$$

elde edilmiş olur. Bu denklemden,

$$V - \frac{nkT}{e} \ln\left(\frac{1}{AA^*T^2}\right) = n\phi_b + IR_s \quad (2.22)$$

ifadesine ulaşılmış olur. Böylece,

$$H(I) = V - \frac{nkT}{e} \ln\left(\frac{1}{AA^*T^2}\right) \quad (2.23)$$

$$H(I) = n\phi_b + IR_s \quad (2.24)$$

Cheung fonksiyonları elde edilmiş olur. $H(I) - I$ grafiğinden lineer bir çizgi elde edilecektir. Elde edilmiş olan bu lineer çizginin eğim değeri R_s seri direncini verecek. Eğim çizgisinin $H(I)$ eksenindeki kesme noktası $I = 0$ için $n\phi_b$ değeridir. Birinci fonksiyonda bulunan idealite faktörü diğer fonksiyonda $n\phi_b$ 'de yerine konulması ile engel yüksekliği elde edilecek.

2.6.3.1.2. Norde fonksiyonu yardımı ile diyot parametrelerinin elde edilmesi

Schottky diyot parametrelerini elde edilmesinde kullanılan diğer bir yöntem ise Norde (1979) tarafından geliştirilmiştir. Seri direncin varlığında termoiyonik emisyon teorisi denklem (2.15)'te ve $V \gg 3kT/e$ durumunda denklem (2.16)' de verilmiştir. Denklem (2.20)'i aşağıdaki gibi düzenleyebiliriz.

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{B} \ln\left(\frac{1}{AA^*T^2}\right) \quad (2.25)$$

denklem (2.25) yeniden düzenlenecek olursa, sağdaki eşitlikten,

$$F(V) = \phi_b + IR_s - \frac{V}{2} \quad (2.26)$$

elde edilmiş olacaktır. Denklem (2.26)'da ideal bir durumda $R_s = 0$ için eğimi $-1/2$ olan lineer bir çizgi elde edilecek. Elde edilen bu lineer çizginin $F(V)$ eksenini kestiği nokta, ϕ_b değerini verecek. Bundan farklı olarak denklem (2.25)'in solundaki eşitlikte $e/kT = \beta$ dönüşümü yapılırsa,

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{1}{AA^*T^2}\right) \quad (2.27)$$

olacak. $\ln(I)-V$ eğrisinde doğru beslemde $kT/e < V < IR_s$ aralığındaki beslem voltajlarında lineer bir çizgi görülmektedir (Ayyıldız ve ark., 1995). Ancak seri direncin çok büyük olduğu durumlarda I_0 doyma akımı değerini elde etmek zorlaşmış olacaktır. Ayrıca R_s seri direncin değeri çok büyükse grafikteki lineer kısım dar bir aralığa sahip olacak. Norde tarafından, bu seri direncin etkisini ortadan kaldırmak için $F(V)$ fonksiyonu tanımlanmıştır. Ohm yasasına göre $I = V/R$ olduğundan denklem (2.27)'den $F(V)$ fonksiyonun değeri,

$$\frac{dI}{dV_d} = \beta I \quad (2.28)$$

gibi olur. Denklemden de anlaşıldığı üzere doğal logaritma sebebiyle yüksek voltaj değerlerinde grafiğin eğimi 1/2 değerine yaklaşacaktır.

$$F(V) = \phi_b + IR_s - \frac{V}{2} \quad (2.29)$$

denklem (2.29)'un diferansiyeli V 'ye göre alınır,

$$\frac{dF}{dV} = R_s \left(\frac{dI}{dV} \right) - \frac{1}{2} \quad (2.30)$$

elde edilir. Buradan,

$$V = IR_s + V_d \quad , \quad \frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_d + R_s dI} \quad (2.31)$$

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_d} \left[1 + R_s \left(\frac{dI}{dV_d} \right)^{-1} \right] \quad (2.32)$$

denklemleri elde edilir. İdeal bir diyot için $n=1$ durumunda,

$$I = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV_d}{kT}\right) \right] \quad (2.33)$$

$$\frac{dI}{dV_d} = \beta I \quad (2.34)$$

bulunan ifadeler denklem (2.30)'da yerine yazılırsa,

$$V_d = (I_{\min}) = V_{\min} - I_{\min} R_s \quad (2.35)$$

denklem (2.35) elde edilir ve burada $dF/dV = 0$ için $I_{\min}$ akım ifadesi bulunur.

$$I_{\min} = \frac{1}{\beta R_s} = \frac{kT}{eR_s} \quad , \quad V_d = (I_{\min}) = V_{\min} - I_{\min} R_s \quad (2.36)$$

$F(V) - V$ grafiğinin doğru beslem kısmında $F(V)$ 'nin minimum olduğu nokta $V_{\min}$ noktasına karşılık gelir. Ayrıca akım ifadesi bu noktada $I_{\min}$ olur ve böylece fonksiyon, denklem (2.37)'deki gibi olacak.

$$F(V_{\min}) = \frac{V_{\min}}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{I_{\min}}{AA^*T^2}\right) \quad (2.37)$$

$$R_s = \frac{1}{\beta I_{\min}} \quad (2.38)$$

$$\phi_b = F(V_{\min}) + \frac{V_{\min}}{2} - \frac{1}{\beta} \quad (2.39)$$

böylece diyot parametrelerinin hesaplanmasında kullanılacak denklemler elde edilmiş oldu. Norde fonksiyonu seri direncin küçük olduğu durumlarda geçerliliğini korurken, ideal olmayan yapılar için geçerli olan diyot parametrelerini hesaplama yöntemi, Norde fonksiyonları değiştirilerek gerçekleştirilmiştir (Bohlin, 1986). Daha önce yazılmış olan

$F(V)$ fonksiyonu ifadelerine idealite faktörü eklenecek ve idealite faktöründen büyük bir α sayısı ile fonksiyon tekrar tanımlanmış olacaktır. Seri direnç idealiteden sapmalara neden olacağı için idealite $1 < n < \alpha$ aralığında tanımlanacaktır.

$$F(V, \alpha) = \frac{V}{\alpha} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{I}{AA^* T^2} \right) \quad (2.40)$$

$$F(V, \alpha) = \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{n} \right) V + \phi_b + \frac{IR_s}{n} \quad (2.41)$$

Seri direncin olmadığı bir durumda eğimi $(n - \alpha/\alpha n)$ olan bir $F(V, \alpha)$ fonksiyonu tanımlı olacak ve seri direncin olduğu durumda fonksiyon,

$$F(V, \alpha) = \frac{V}{\alpha} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{V}{R_s AA^* T^2} \right) \quad (2.42)$$

$1 < n < \alpha$ aralığında minimum bir noktaya sahip olur.

$$F(V, \alpha) = \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{n} \right) V + \phi_b + \frac{IR_s}{n} \quad (2.43)$$

Fonksiyonun V 'ye göre diferansiyeli alınıp $F(V)$ 'de yapıldığı gibi ilgili dönüşümler uygulandığında,

$$\frac{dF}{dV} = \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{n} \right) + \frac{R_s}{n} \left(\frac{dI}{dV} \right) \quad (2.44)$$

elde edilir. Seri direnç varlığında ideal durumdan sapma olacağı için termoiyonik emisyon teorisi,

$$I = AA^* T^2 \exp \left(-\frac{e\phi_b}{kT} \right) \left[\exp \left(\frac{eV_d}{nkT} \right) \right] \quad (2.45)$$

ve

$$\frac{dI}{dV_d} = \frac{\beta I}{n} \quad (2.46)$$

olacak. $V_d = V - IR_s$ ifadesinin I 'ya göre diferansiyeli alınırsa,

$$\frac{dV_d}{dI} = \frac{dV}{dI} - R_s \quad (2.47)$$

elde edilir. Gerekli işlemler yapıldığında ise,

$$\frac{dV}{dI} = \frac{dV_d + R_s dI}{dI}, \quad \frac{dI}{dV} = \frac{dI / dV_d}{1 + R_s dI / dV_d} \quad (2.48)$$

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI / dV_d}{1 + R_s dI / dV_d}, \quad \frac{dI}{dV} = \frac{\beta I / n}{1 + \beta IR_s / n} \quad (2.49)$$

olacaktır. Elde edilen değer yerine konulup işlemler yapıldığında,

$$\frac{dF}{dV} = \frac{n - \alpha + \beta IR_s}{\alpha(n + \beta IR_s)} \quad (2.50)$$

olacak. $dF/dV = 0$ değeri için minimum akım değeri elde edilir.

$$I_{\min} = \frac{\alpha - n}{\beta R_s}, \quad V_d(I_{\min}) = V_{\min} - I_{\min} R_s \quad (2.51)$$

$F(V) - V$ grafiğinde doğru beslemde $F(V)$ minimum noktası $V_{\min}$ noktasına karşılık gelir ve bu noktaya karşılık gelen akım değeri ise $I_{\min}$ değerini temsil edecektir. Böylece,

$$F(V_{\min}, \alpha) = \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{n} \right) V_{\min} + \phi_b + \left(\frac{\alpha - n}{n} \right) \frac{1}{\beta} \quad (2.52)$$

$$\phi_b = F(V_{\min}, \alpha) + \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{\alpha} \right) V_{\min} - \left(\frac{\alpha - n}{n} \right) \frac{1}{\beta} \quad (2.53)$$

$$R_s = \frac{\alpha - n}{\beta I_{\min}} \quad (2.54)$$

büyük seri direnç varlığında diyot parametrelerini elde etmede kullanılan denklemler elde edilmiş olacaktır.

2.6.4. Arayüzey Durumları

Periyodik örgü yapısının kesintiye uğraması Arayüzey durumlarının ortaya çıkmasındaki en önemli nedenlerinden biridir (Nicollian, 1982). Bu eklem oluşmadan önceki bir yüzey durumunu ifade eder. Kesintiye uğramış olan bir örgü kolaylıkla bağ yapabilir. Bu, metal / yarıiletken Schottky yapısının arayüzeyinde belirli bir kalınlığa sahip arayüzey tabakasının oluşması anlamına gelir. Bu tabaka, aygıtın temel parametrelerini olumsuz biçimde etkiler. Kontakt oluştuktan sonra oluşan yüzey durumları var ve bunlar yarıiletkenin yüzeyinde dağılmış olan safsızlıklardır (Sze, 1981). Yarıiletken yüzeyi ve gövde içerisinde ortaya çıkan kusurlar sebebiyle meydana gelen yüzey durumları mevcuttur. Kimyasal reaksiyon sonucu meydana gelen bu yüzey durumları, arayüzey durumlarının ortaya çıkmasında önemli sebeplerinden biridir. Bir yarıiletken üzerine buharlaştırma yöntemiyle metal kaplandığı zaman kimyasal bir tepkime oluşur. Bu tepkime sonucunda yeni bir bileşik olan arayüzey durumları meydana gelir (Cowley ve ark., 1965).

2.6.4.1. Arayüzey durumlarını belirleme yöntemleri

Bir yarıiletken aygıtın arayüzey durum yoğunluklarını belirleyebilmek için farklı yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerden en çok kullanılanlar kapasite ve iletkenlik yöntemleridir. Yapıların akım-gerilim ölçümlerinden de hareketle arayüzey durumları belirlenebilir.

2.6.4.1.1. Akım yöntemi

Bu metotla yapıların elde edilmiş akım-gerilim verilerinden yararlanılır. Bir yapının idealite faktörü arayüzey durumlarına ve arayüzey tabaka kalınlığına bağlıdır

(Card ve ark., 1971). İdealite faktörü ile arayüzey durumları arasındaki ilişki (2.55) ve (2.56) denklemlerinde verilmiştir.

$$N_{ss} = \frac{\varepsilon_s}{qW_D} \left(\frac{1}{n-1} \right) - \frac{\varepsilon_i}{\delta q} \quad (2.55)$$

ε_s = Yarıiletkenin dielektrik sabiti

W_D = Tükenim bölgesi genişliği

q = Elektrik yükü

n = İdealite faktörü

ε_i = Arayüzey tabakanın dielektrik sabiti

δ = Arayüzey tabaka kalınlığı

$$N_{ss} = \frac{\delta \varepsilon_s}{q \varepsilon_i} \left(\frac{1}{n-1} \right) - \frac{W_D}{q} \quad (2.56)$$

arayüzey tabakasının ince olması durumunda (2.55) denklemi, arayüzey tabakasının kalın olması durumunda ise (2.56) denklemi kullanılır (Card ve ark., 1971).

2.6.4.1.2. Kapasitans yöntemi

Kapasitans ölçüm verileri kullanılarak arayüzey durumlarının belirlenme yöntemlerinden biri, iki frekans yaklaşımının kullanıldığı yüksek frekans-düşük frekans kapasitans yöntemi olup, (2.57) denklemi ile verilmiştir (Castagne ve Vapaille, 1971).

$$N_{ss} = \frac{C_i}{qA} \left(\frac{C_{LF}}{C_i - C_{HF}} - \frac{C_{HF}}{C_i - C_{LF}} \right) \quad (2.57)$$

C_{LF} = Düşük frekansta alınmış kapasite ölçümleri

A = Diyot kontakt alanı

C_{HF} = Yüksek frekansta alınmış kapasite ölçümleri

C_i = Arayüzey tabaka kapasitesi

arayüzey tabakasının kapasitesi, yüksek frekanslı gerilim altında ve kuvvetli biriktirme bölgesinde sabit olmakla birlikte, yapının maksimum kapasitesine (geometrik kapasite) eşittir ve denklem (2.58) ile verilir.

$$C_i = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_i}{d_i} \quad (2.58)$$

ε_0 = Boşluğun dielektrik sabiti

d_i = Arayüzey tabaka kalınlığı

Kapasitans ölçüm verileri kullanılarak arayüzey durumlarını belirleme yöntemlerinden biri ise tek frekans yaklaşımının kullanıldığı Hill-Coleman yöntemidir (Hill ve Coleman, 1980). Bu yöntemle yüzey durumları ile kapasite ve iletkenliğin ilişkisini veren denklem (2.59)'daki gibidir.

$$D_{it} = \left(\frac{2}{qA} \right) \left[\frac{\frac{G_{m,maks}}{w}}{\left(\frac{G_{m,maks}}{wC_i} \right)^2 + \left(1 - \frac{C_m}{C_i} \right)^2} \right] \quad (2.59)$$

A = Diyot kontakt alanı

q = Elektrik yükü

D_{it} = Arayüzey durumları

w = Açısal frekans

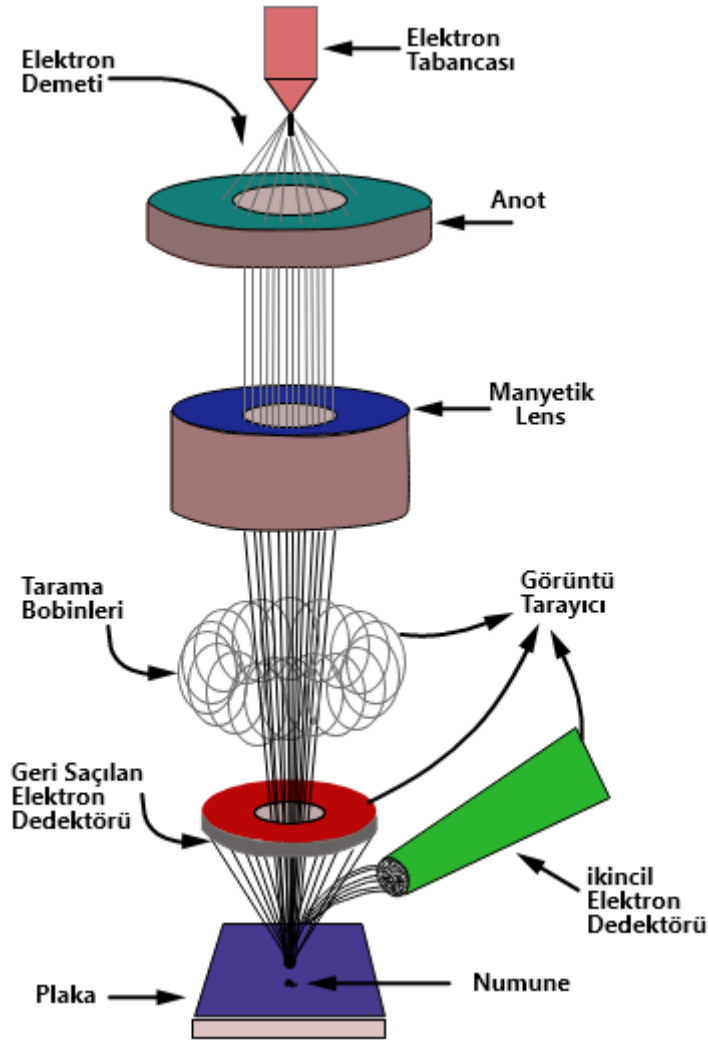
$G_{m,maks}$ = Biriktirme bölgesinde ölçülen maksimum iletkenlik

C_m = Maksimum iletkenlik değerine karşılık gelen kapasite

2.7. Taramalı Elektron Mikroskobu - SEM (Scanning Electron Mikroskopi –SEM)

Teknolojin gelişmesi bilimsel çalışmalara hız kazandırmaktadır. Bilimsel çalışmalar arttıkça yeni bulgular elde edilmekte ve elde edilen bu bulgular bilime yeni kapılar aralamaktadır. İnsanın gözle görebildiği ayrıntıları görebilme yeteneği oldukça sınırlıdır. Bu sebeple maddeyi daha yakından görüp daha iyi analizler elde etmek için mercekler geliştirilmiştir. Çok daha küçük görüntüleri elde etmek için ise ‘Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)’ nu geliştirmiştir. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

yüksek ayırt edebilme yeteneği sayesinde günümüzde bilimsel çalışmalarda çok sık kullanılmaktadır. İlk Ticari Taramalı Elektron Mikroskobu 1965 yılında piyasaya çıktıktan sonra hızla geliştirilmiştir. Günümüz teknolojisinde kullanılacak malzemenin mikro ve nano boyuta kadar büyütülmesiyle Fizik, Kimya, Biyoloji, Tıp, Mühendislik gibi birçok alanda kullanımına olanak sağlanmaktadır. Bilimsel çalışma alanına göre SEM cihazı, farklı mikro ve nano boyutlarda büyütülerek yüksek çözünürlüklü görüntü elde edilip numune hakkında detaylı bilgiye ulaşılması sağlanmaktadır. Şekil 2.18’de SEM cihazının çalışma prensibi şematik gösterimi mevcuttur. Taramalı elektron mikroskobundan (SEM) görüntü almak için önce yalıtkan veya iletkenliği düşük numuneler altın veya karbon elementiyle kaplanır. Bu sebeple daha iyi görüntü elde edilir. Fakat numunenin iletkenliği fazlaysa kaplanmazlar. Numune daha sonra cihazın içine yerleştirilerek ortamı tozlar ve yabancı cisimlerden arındırmak için vakum işlemi başlatılır. Bu işlem sağlıklı veriler elde edilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu işlemin gerçekleşmemesi durumunda ortamdaki gazlarla numune arasında etkileşim söz konusu olabilir. Bu sebeple sağlıklı verileri alabilmemiz zorlaşabilir. Elektron tabancasından yüksek enerjili elektron demeti fırlatılır. Yüksek voltaj uygulanarak anot plaka yardımıyla elektronlar, numunenin inceleneceği yüzeye daha hızlı gitmesi sağlanır. Plakaya doğru hızlanan elektronlar, manyetik mercekler yardımıyla küçülüp ince elektron demetlerine dönüşüp numuneye doğru odaklandıktan sonra elektron demetlerinin yüzeye dağılmasının gerçekleşmesi için tarama bobini kullanılmaktadır. Bu bobinler yüzeye düşen elektron demetlerinin, bilgisayar ekranında eşzamanlı olarak görünmesini sağlamaktadır. Elektron demetlerinin numunenin bulunduğu yüzeye çarptıktan sonra geri saçılan elektronlar ile numune yüzeyine yakın bölgeden koptuktan sonra dönen ikincil elektronlar farklı olan iki dedektör ile toplanır ve voltaj sinyallerine çevrilir. Bu sinyaller bir yükseltici sayesinde güçlendirilir. Daha sonra bu sinyaller, tarama bobininin sağlamış olduğu konum verileriyle bilgisayarda eşzamanlı olarak işlenir. Sonrasında katot ışın tüpü yardımıyla bilgisayar ekranına aktarılır. Böylece bu ekranda görüntülenmekte olan aydınlık ve karanlık olan görüntülere dönüştürülür (Erdin, 1986; Aydoğan, 2014).



Şekil 2.18. Taramalı elektron mikroskobunun (SEM) şematik gösterimi (Anonim, 2022).

Numunenin yüzeyi ve bu yüzeye çarpan elektron demetlerinin etkileşmesinden kaynaklı farklı sinyaller meydana gelir. Bunlar; ikincil elektronlar, geri saçılan elektronlar, karakteristik x-ışınları, Auger elektronlar ve farklı enerji seviyelerindeki fotonlardır. SEM’de oluşan görüntü, ikincil elektronlar ile geri saçılan elektronlarla sağlanmış olur. Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) numune yüzeyinden elde etmiş olduğumuz asıl bilgi, numune yüzeyine yaklaşık 10 nm mesafeden gelen ikincil elektronlardır. Bu yüzeye gelen elektron demetleri yüksek enerjiye sahiptir. Bu nedenle elektronların bazıları yüzeydeki atomlar ile temas edip geri saçılır. Bu elektronlar Geri Saçılan Elektronlar adını alır. Geri saçılan elektronlar çok hızlı hareket ettikleri için düz bir çizgide hareket ederler. Geri saçılan elektronlar ile bir görüntü oluşturmak için geçiş yoluna bir dedektör yerleştirilmiştir. Büyütülmüş yüksek çözünürlüğe sahip görüntüler ikincil elektronlar sayesinde gerçekleşir (Erdin, 1986; Aydoğan, 2014).

2.7.1. Taramalı Elektron Mikroskopunda Görüntü Oluşumu

Ekranında bir görüntü oluşturmak için elektron ışını büyütülecek alanı tarar ve bu görüntüyü TV ekranına aktarır. Elektron ışını, numuneyi yatay ve dikey olarak 1.000 satır aşağı doğru tararken 1.000 noktada durur. Bu bize 1.000.000 puan bilgisini verir. Her noktadan çıkan elektronlardan okunan sinyal, TV ekranında ilgili bir noktaya aktarılır. TV ekranı da yatay olarak 1.000 nokta ve dikey olarak 1.000 çizgiye sahip olduğundan, numune üzerindeki tarama ile TV ekranı arasında 1:1 oranında bir denklik vardır. Numune üzerindeki elektron ışını taramasının uzunluğu TV ekranının uzunluğundan daha küçük olduğundan, aşağıdaki denkleme eşit bir büyütme üretilir:

$$\text{Büyütme} = \text{TV Taraması Uzunluğu} / \text{Elektron Işını Tarama Uzunluğu}$$

numune üzerindeki taramanın boyutu değiştirilerek büyütme değiştirilebilir. Elektron ışını taramasının alanı ne kadar küçükse, büyütme o kadar yüksek olur (Anonim, 2022).

3. MATERYAL VE TÖNTEM

3.1. Silisyum Yüzeylerinin Temizlenmesi

Çalışmamızda (111) kristal yönelimine sahip, 5 Ω .cm öz dirençli tek yüzeyi parlatılmış p-tipi silisyum tekli kristallerden yararlanılmıştır. Öncelikle kristaller $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 'lik boyutlarda kesilmiş ve işlem öncesinde "RCA (Radio Corporation of America)" kimyasal temizleme işlemine bırakılmıştır (Kern, 1993). Bu işlemler sırasıyla:

1- Organik Temizleme: 1:1:5 oranlarına sahip amonyum hidroksit [NH_4OH , Merck], hidrojen peroksit [H_2O_2 Merck] ve 18 M Ω 'luk dirençli deiyonize su bir beher içerisinde karıştırılmıştır. Kristaller bu beher içerisinde 60°C'de on dakika kaynamaya bırakılmıştır.

2- Oksit Temizleme: 1:10 oranlarına sahip hidroflorik asit [HF, Merck] ve dirençli 18 M Ω 'luk dirençli deiyonize su bir beher içerisinde karıştırılmıştır. Kristaller bu beher içerisinde otuz saniye süre ile ultrasonik banyoya bırakılmıştır.

3- İyonik Temizleme: 1:1:6 oranlarına sahip hidroklorik asit [HCl, Merck], hidrojen peroksit [H_2O_2 Merck] ve 18 M Ω 'luk dirençli deiyonize su bir beher içerisinde karıştırılmıştır. Kristaller bu beher içerisinde 60°C'de on dakika kaynamaya bırakılmıştır.

Her bir aşama arasında kristaller 18 M Ω 'luk dirençli deiyonize su ile ultrasonik banyoya konmuştur. Temizleme işleminden sonra oksitlenmesine önlemek amacıyla kristaller azot gazı (N_2) ortamında kuruma işlemine tabi tutulmuştur.

3.2. Omik Kontakları Hazırlama

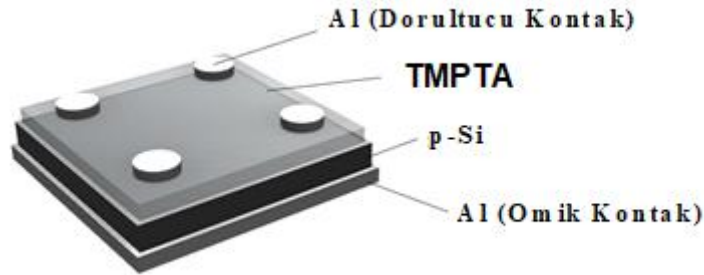
p-tipi silisyum kristallerinin temizleme işlemi sonrasında mat yüzeyine 10^{-7} Torr vakum altında %99,99 saflıkla alüminyum (Al) metali 1200 Å kalınlığında buharlaştırılmıştır. Buharlaştırma işlemi sonrasında seri direnç etkisini azaltmak için bu yüzeyler azot gazı (N_2) ortamında 580 °C'de üç dakika bırakılarak alüminyumun çökmesi (alloying) sağlanmıştır.

3.3. Polimer Filmlerin Kaplanması

Hazır halde olan p-Si alt tabaka üzerine smear (sürme) tekniği ile Trimetilolpropan Triakrilat (TMPTA) foto polimer tabakası kaplanmıştır. Öncelikle RCA yöntemi ile temizlenen p-Si parlak yüzeyine TMPTA sıvı formda damlatılarak üzerine bir lam yerleştirilmiştir. Lam üzerine baskı uygulanarak TMPTA'nın tüm yüzeye yayılması sağlanmış ve daha sonrasında laminin bir kenarı üzerine baskı uygulamaya devam edilerek p-Si üzerinden sürülerek çekilmiştir. Bu şekilde birkaç μm kalınlığında polimer malzemesi düzgün bir şekilde kaplanması sağlanmıştır. Sürecin devamında kaplanan foto polimer malzemenin sertleşmesi için 365 nm dalga boyuna sahip UVGL-58 UV ışık kaynağı altında 60 dakika süreyle UV ışığa maruz bırakılmıştır.

3.4. Doğrultucu Kontakları Hazırlama

Polimer kaplandıktan sonra, Metal-polimer-yarıiletken (MPS) aygıtın fabrikasyonu maske uygulanarak Al üst kontakların buharlaştırılması ile tamamlanmıştır. p-tipi silisyum kristallerinin polimer kaplı yüzeye 10^{-7} Torr yüksek vakum altında %99,99 saflıkla alüminyum metali buharlaştırılmıştır. Al/ TMPTA/p-Si (MPS) yapısı Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Al/ TMPTA/p-Si (MPS) yapısı

3.5. Deneylerde Kullanılan Cihazlar

Kristal temizleme safhasında kullanılan deiyonize saf su “Direct-Q(3UV)” cihazından sağlanmıştır. Bu safhada faydalanan ultrasonik banyolama cihazı da

“Kudos” markadır. Tavlama işlemlerinde Protherm PTF 12/75/800 markalı tüp fırından yararlanılmıştır.



Şekil 3.2. 0-1200 °C ayarlı Protherm PTF 12/75/800 tüp fırın

Polimer yüzey morfolojileri ZEISS marka Gemini SEM 500-71-08 Model SEM (Taramalı elektron mikroskobu) cihazı kullanılarak incelenmiştir. Al/ TMPTA/p-Si (MPS) yapılarının omik ve doğrultucu kontaktları Nanovak NVTH-350 markalı termal buharlaştırma cihazı ile sağlanmıştır.



Şekil 3.3. Nanovak NVTH-350 termal buharlaştırma sistemi

Yapıların oda sıcaklığı ve karanlık altındaki akım-gerilim (I - V) ölçümleri Keithley 4200 SCS (Semiconductor Characterization System) sistemi ile yapılmıştır.

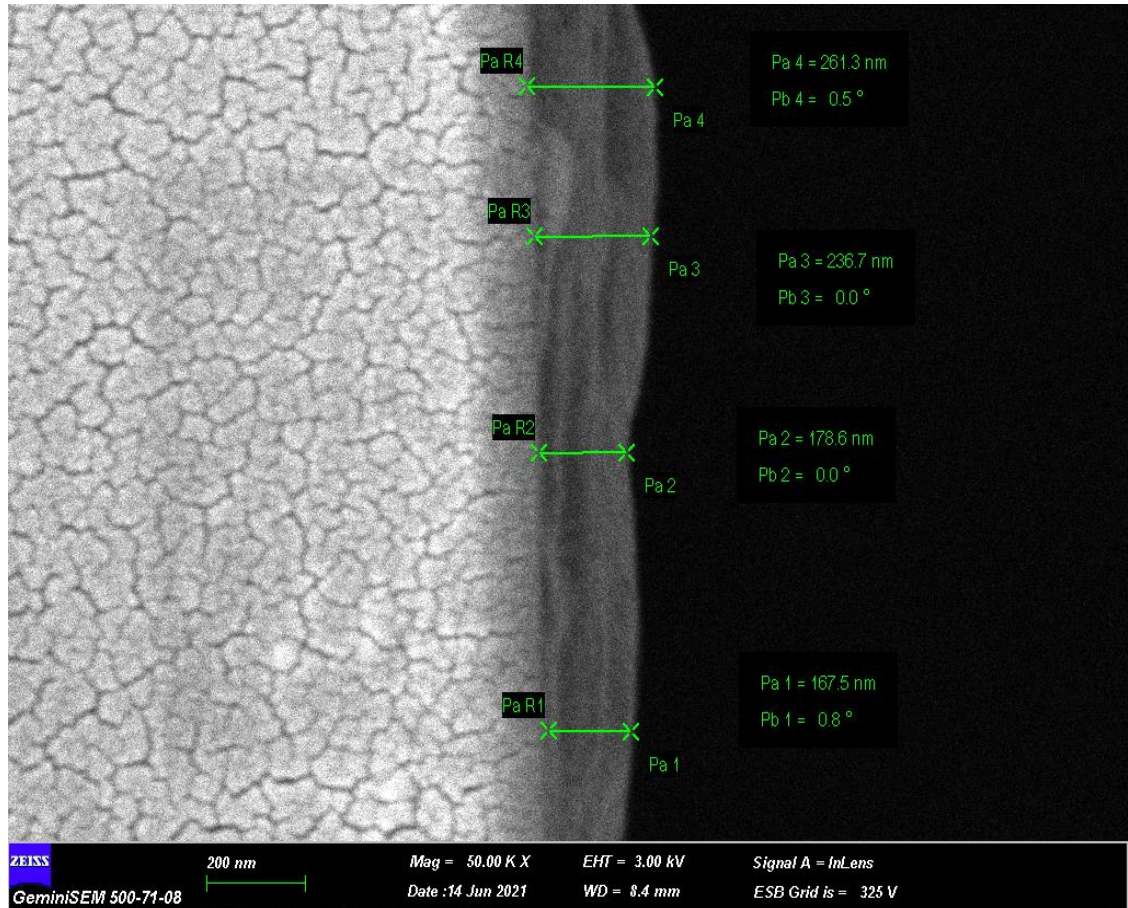


Şekil 3.4. Keithley 4200 SCS yarıiletken karakterizasyon cihazı

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. SEM Analizi

p-Si üzerindeki kaplanmış ince film TMPTA fotopolimer organik tabakanın kesit yapısı SEM cihazı yardımıyla incelenmiştir ve kesit görüntü Şekil 4.1'de gösterilmektedir. SEM görüntülerine göre, TMPTA fotopolimeri p-Si yarıiletken yüzeyine sıkı bir şekilde kaplanmıştır. Ara yüzey tabakasının kalınlığının, SEM görüntüsünden yaklaşık 150 – 270 nm arasında değiştiği hesaplanmıştır. TPA'nın sahip olduğu düşük viskozitesi (25 °C'de 70-115 cps) nedeniyle, benzeri diğer fotopolimerlere kıyaslandığında kaplama işlemi sonucunda çok daha az kalınlıkta bir ara yüz tabakası elde edilebilmiştir (Özden ve ark., 2021; Özden ve ark., 2021; Özden ve ark., 2022).



Şekil 4.1. p-Si alt tabaka üzerine kaplanmış TMPTA foto-polimerin kesit SEM görüntüsü.

4.2. Oda Sıcaklığında Akım-Gerilim (I - V) Karakteristikleri

Çalışmamızda Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapımızın elektriksel parametrelerinin belirlenmesi için oda sıcaklığı ve karanlık altındaki akım-gerilim (I - V) ölçümleri gerçekleştirilerek analizleri yapılmıştır.

Metal/yarıiletken kontaklarında akım-iletimi ifade etmek için kullanılan termoiyonik emisyon (TE) kuramı düz beslemde ($V \geq 3kT/q$), seri direnci (R_s) etkisi de ilave edildiğinde,

$$I = I_o \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{-q(V - IR_s)}{kT}\right)\right] \quad (4.1)$$

halini alır. Burada I_o doyum akımı olup, $\ln I$ - V eğrisinin sıfır beslemde kestiği noktadan bulunur ve

$$I_o = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{b0}}{kT}\right) \quad (4.2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada ϕ_{b0} , R_s , A , A^* , n , q ve T sırasıyla sıfır beslem engel yüksekliği, seri direnç, doğrultucu kontak alanı, etkin Richardson sabiti ($32A/cm^2K^2$, p-tipi Si), idealite faktörü, elektron yükü ve mutlak sıcaklığı verir. Eşitlik 1'den idealite faktörünün değeri,

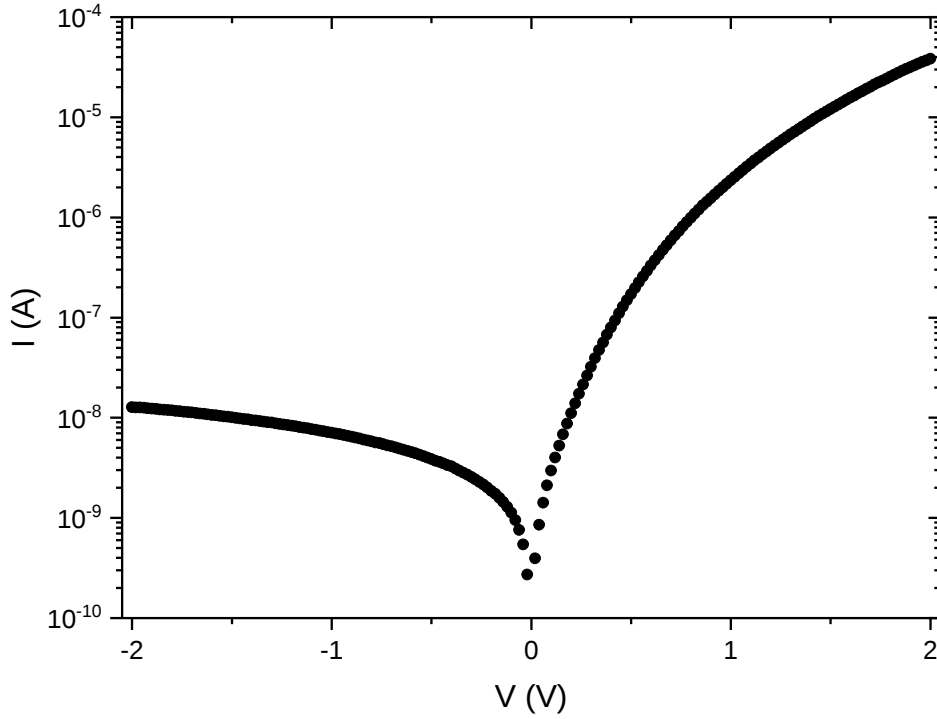
$$n = \frac{q}{kT} \frac{d(V - IR_s)}{d(\ln I)} \quad (4.3)$$

ile bulunur. Yapıların I - V eğrilerinden yararlanarak ara yüzey enerji dağılımlarını bulmak için gerilime bağlı idealite faktörünün değişimi gereklidir ve

$$n(V) = \frac{q}{kT} \frac{d(V - IR_s)}{\ln(I/I_o)} \quad (4.4)$$

ifadesinden yararlanılır.

Şekil 4.2’de Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapısının $\ln I$ - V eğrisi görülmektedir. Görüldüğü gibi yapının doğrultma (rectifying) oranı çok iyidir. Yapının idealite faktörü ve sıfır beslem engel yüksekliği değerleri sırasıyla 3,65 ve 0,79 eV olarak hesaplanmıştır. İdealite faktörü değeri ideal olan 1 değerinden büyük çıkmıştır. Yapımızın idealite faktörü değerinin 1’den büyük çıkması Al/p-Si arasındaki TMPTA polimer ara yüzey tabakasının varlığına, Al/p-Si ara yüzey durumlarının dağılımına ve p-Si yarıiletkenin nötral bölgesinin seri direncinin büyük olmasına atfedilebilir.



Şekil 4.2. Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapısının $\ln I$ - V eğrisi

4.3. Seri Direnç Analizi

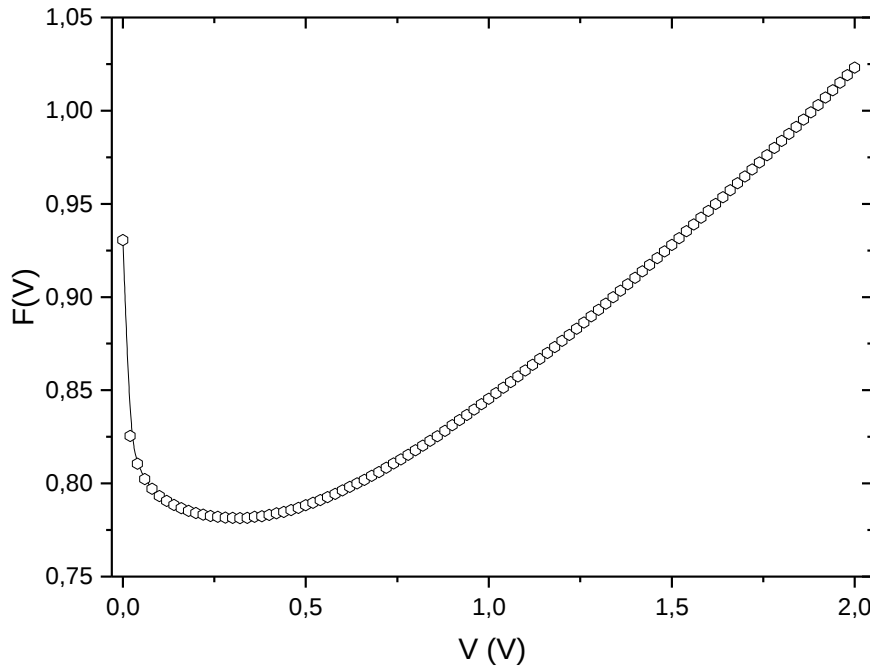
Seri direnç (R_s) gerçek değeri yeterli derecede yüksek gerilimlerde ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.1 dikkatli incelenirse R_s varlığı +1 V’den sonra grafikte bükülmeye sebep olmaktadır. Seri direncin belirlenebilmesi için çeşitli metotlar mevcuttur. Çalışmamızda öncelikli olarak Norde yöntemi uygulanarak seri direnç değeri tayin edilmiştir. Norde metodunda $F(V, \gamma)$ elde edilerek, yapıdaki seri direnç değeri hesaplanabilir. Buna göre;

$$F(V, \gamma) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I}{AA^*T} \right) \quad (4.5)$$

$$\phi_B = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (4.6)$$

$$R_s = \left(\frac{kT}{qI} \right) (\gamma - n) \quad (4.7)$$

eşitlikleri kullanılır. Burada gama (γ) idealite faktöründen büyük en küçük tam sayı, I_{min} ve V_0 sırasıyla Norde fonksiyonundaki minimum akım ve minimum gerilim değerleridir. Eşitlik (4.5) yardımıyla elde edilen Norde fonksiyonu Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapısının $F(V)$ - V grafiği

Eşitlik (4.6) ve (4.7) kullanılarak R_s ve ϕ_B değerleri sırasıyla 231,1 K Ω ve 0,836 eV olarak hesaplanmıştır. Seri direnç hesaplamasında yararlandığımız diğer yöntem ise

Cheung'ler tarafından belirlenen fonksiyonlar yardımıyla hesaplanan metottur. Bu yöntemde, seri direnç etkisinin ileri beslem $\ln I$ - V grafiklerinin tam dönüm noktasından itibaren etkili olacağı belirtilmekte ve bu nedenle de seri direnci belirlerken bu noktaları dikkat etmemiz gerekmektedir. Bu yöntemde göre Eşitlik 1'in her iki tarafının logaritması alınıp yeniden düzenlenirse,

$$V = \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^* T^2} \right) + n\phi_b + IR_s \quad (4.8)$$

halini alır. Bu denklemde $\ln I$ 'ya göre diferansiyeli alınırsa,

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (4.9)$$

elde edilir. Ayrıca

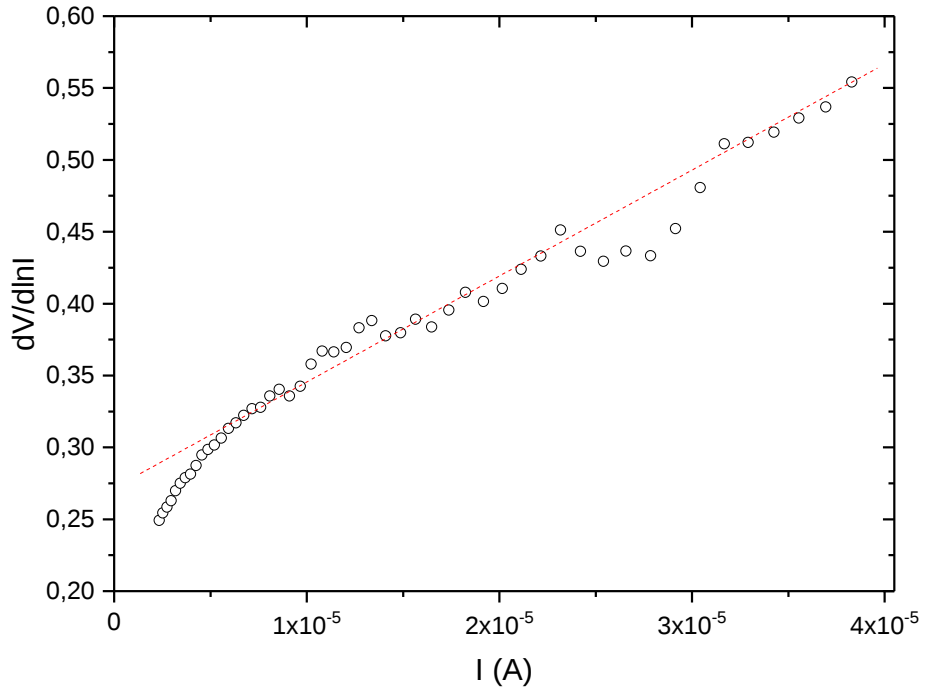
$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^* T^2} \right) \quad (4.10)$$

şeklinde bir $H(I)$ fonksiyonu tanımlanarak da seri direnci belirleyebiliriz. Buna göre $H(I)$ fonksiyonu,

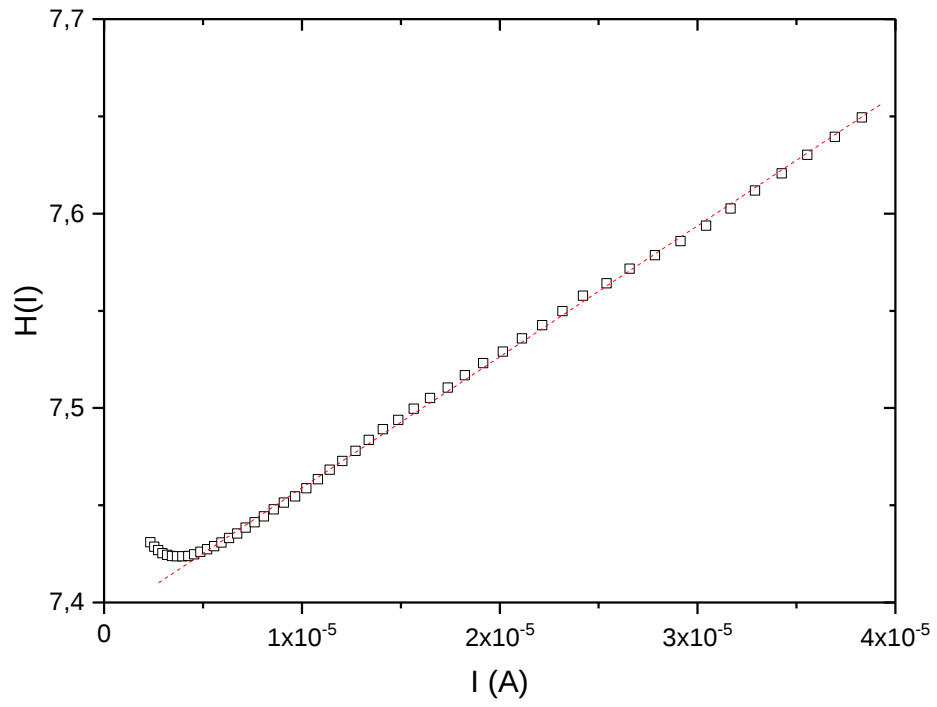
$$H(I) = n\phi_b + IR_s \quad (4.11)$$

elde edilir.

Eşitlik (4.9) ve (4.11)'den yararlanarak yapımızın $dV/d(\ln I)$ - I ve $H(I)$ - I grafiklerini çizdiğimizde Şekil 4.4 ve 4.5.'de görüldüğü gibi çizgisel doğrular elde ederiz. Eşitlik (4.9) ve $dV/d(\ln I)$ - I eğimi kullanılarak hem n hem de R_s hesaplanabilir. n ve R_s için deneysel sonuçlar 10,8 ve 6774,1 Ω olarak elde edilmiştir. Ayrıca, eşitlik (4.11) ve $H(I)$ - I eğimi kullanılarak da hem ϕ_B hem de R_s hesaplanabilir. ϕ_B ve R_s için deneysel sonuçlar 0,684 eV ve 6736,2 Ω olarak elde edilmiştir. Tablo 4.1'de tüm analizlerden elde edilen elektriksel parametreler verilmiştir.



Şekil 4.4. Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapısının $dV/d(\ln I)$ - I grafiği



Şekil 4.5. Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapısının $H(I)$ - I grafiği

Tablo 4.1. Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapısının I - V ölçümünden hesaplanmış elektriksel parameter değerleri.

I - V ($\ln(I)$ - V)			Norde ($F(V)$ - V)		Cheung 1 ($dV/d(\ln I)$ - I)		Cheung 2 ($H(I)$ - I)	
n	Φ_b (eV)	I_0 (A)	R_s (K Ω)	Φ_b (eV)	R_s (Ω)	n	R_s (Ω)	Φ_b (eV)
3,65	0,79	$1,2 \times 10^{-9}$	231,1	0,83	6774,1	10,8	6736,2	0,68

Cheung fonksiyonundan hesaplanan n değeri TE'den hesaplanan değerden oldukça farklıdır. Bu fark ara yüzey durumlarına, arayüzeyin dielektrik sabitine ve TMPTA polimerinin kalınlığı yanında; R_s hesaplamada kullanılan metot farkı (farklı voltaj bölgelerine karşılık gelmesi), engelin homojensizliğine dayanmaktadır. Ayrıca Cheung, TE ve Norde metodundan hesaplanandan engel yükseklikleri ve R_s değeri nispeten birbirlerinden farklıdır. Çünkü TE doğru öngerilimlemedeki I - V eğrisinin lineer kısmını, Norde doğru öngerilimlemedeki I - V eğrisinin tamamındaki verileri ve Cheung fonksiyonu ise I - V eğrisinin bükülmeye başladığı yerdeki lineer olmayan kısmı kullanır. Bundan dolayı Norde metodundan elde edilen R_s değeri Cheung fonksiyonundan elde edilen değerden oldukça büyüktür.

4.4. Ara yüzey durumlarının tayini

I - V eğrisinden saptadığımız idealite faktörünün $n > 1$ olması ara yüzey durumlarından kaynaklanmakta olup aygıtımızın ideallikten sapmaktadır.

Yarıiletken ile denge durumunda olan ara yüzey durumları için idealite faktörünün polimeer tabakası kalınlığına (δ) ve ara yüzey durum yoğunluğuna (N_{ss}) bağlayan ifade (Card ve Rhoderick, 1971),

$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left[\frac{\epsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\epsilon_s}{W_d} \right] \quad (4.12)$$

verilir. İfadeye göre polimer tabakanın kalınlığının ve ara yüzey durum yoğunluğunun artması sonucunda idealite faktörünün de arttığı görülebilir. Metal/p-tipi yarıiletken

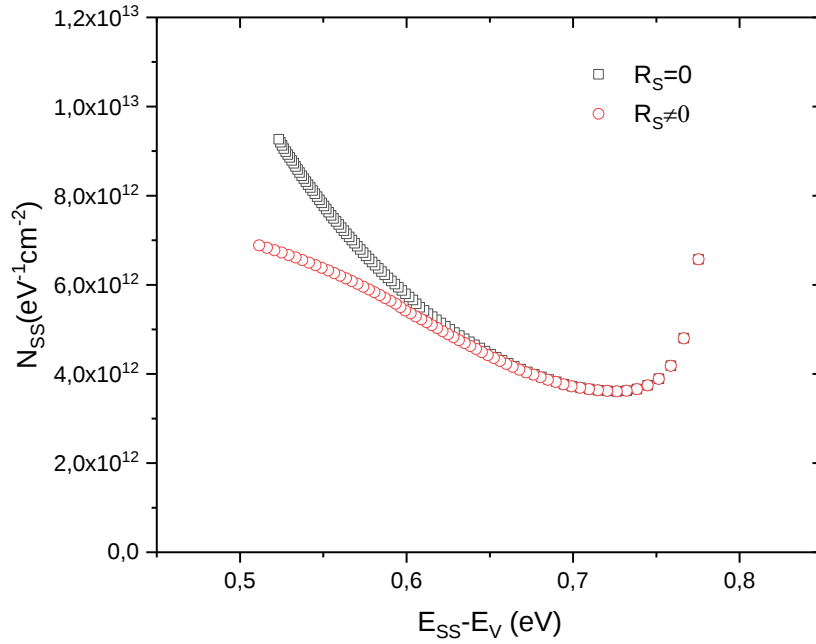
kontaklarda ara yüzey durum yoğunluklarının değerlik bandının üst kenarına göre enerjisi,

$$E_{ss} - E_v = q(\phi_e - V) \quad (4.13)$$

olarak verilir (Singh 1990). Burada ϕ_e etkin engel yüksekliği olup,

$$\phi_e = \phi_{b0} + \left(1 - \frac{1}{n(V)}\right)(V - IR_s) \quad (4.14)$$

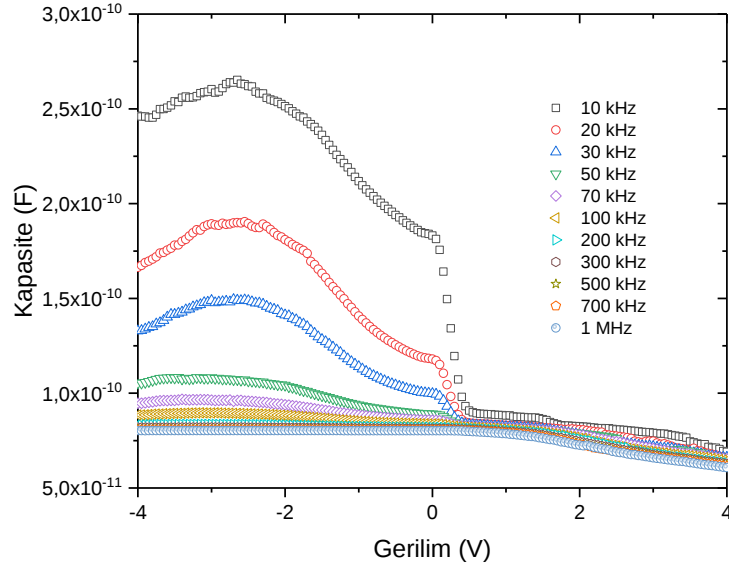
bağıntısıyla verilir. Bağıntı 4.13, 4.14 ve 4.15'ten faydalanarak $R_s = 0$ ve $R_s \neq 0$ durumları için elde edilen ara yüzey durumlarının enerji dağılımları Şekil 4.8'de görülmektedir. Aygıtımız için $N_{ss} - (E_{ss} - E_v)$ grafiğinde seri direnç dikkate alınmadığında $0,5\text{eV} - E_v$ konumunda ara yüzey durum yoğunluğu $9,22 \times 10^{12} \text{ (eV}^{-1}\text{cm}^{-2})$ değerine karşılık gelirken, seri direnç dikkate alındığında aynı konumda ara yüzey durum yoğunluğu $6,88 \times 10^{12} \text{ (eV}^{-1}\text{cm}^{-2})$ değerine karşılık gelmiştir.



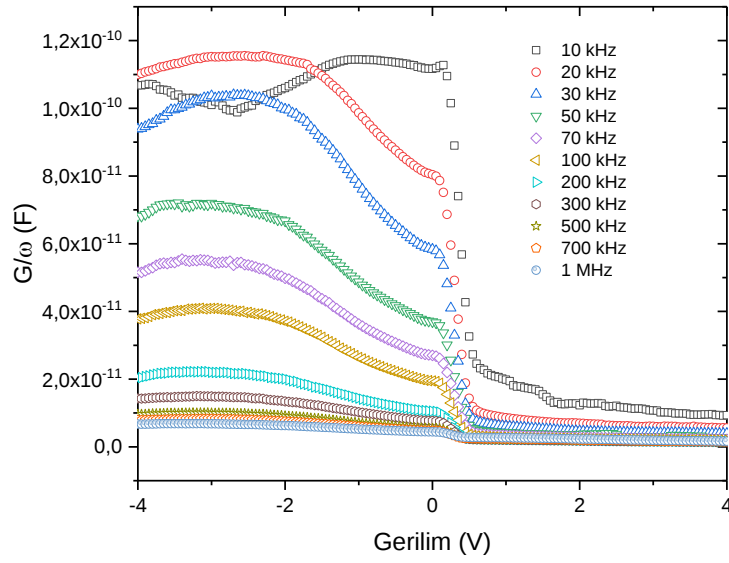
Şekil 4.6. Al/TMTPA/ p-Si (MPS) için ara yüzey durum enerji dağılım eğrileri.

4.5. Kapasite-gerilim (C-V) analizleri

Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapımızın oda sıcaklığındaki kapasite-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G/ω -V) ölçümleri 10 kHz-1 MHz sabit frekans aralığında ölçülmüş ve Şekil 4.6(a)'da verilmiştir. Şekil 4.6(a) dikkatli incelenirse yapımızın kapasitesi frekans arttıkça kuvvetli yığılma bölgesinden kuvvetli tersinim bölgesine doğru azalmaktadır. Aynı şekilde tüketim ve yığılma bölgesinde de yapımızın kapasitesi artan frekansla azalmaktadır. Frekansa bağımlı G/ω -V değişimleri de Şekil 4.6(b)'de görüleceği üzere tüketim bölgesinde artan frekansla azalmış ve yığılma bölgesine doğru kaymıştır.



(a)



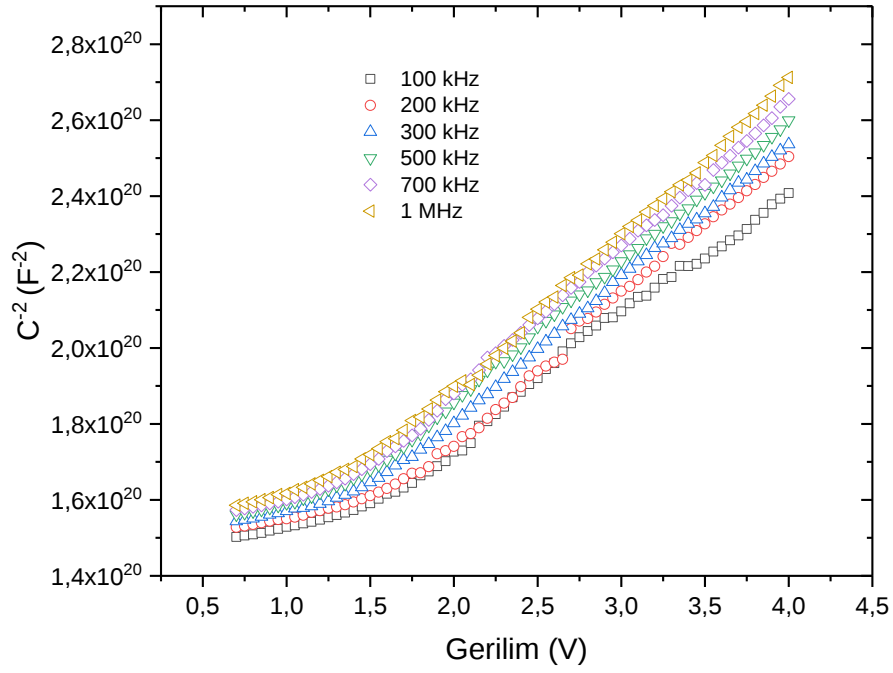
(b)

Şekil 4.7. Farklı frekanslardaki Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapısının oda sıcaklığında (a) C - V (b) G/ω - V eğrileri.

Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapımızın yüksek frekanslarda (500 kHz, 700 kHz, 1 MHz) ölçülen C - V eğrilerinden, alıcı yoğunluklarını (N_a) ve difüzyon potansiyellerini hesaplayabilmek için Şekil 4.7'de görülen C^{-2} - V değişimlerinden faydalanılmıştır. Buna göre C^{-2} - V eğrilerinin gerilim eksenine kestiği noktalarda kesme gerilimleri (V_0) ve eğimlerden de alıcı yoğunlukları (N_a) hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 4.2'de verilmiştir. Yüzey durumları ihmal edildiğinde V_0 ile V_d arasındaki bağıntı

$$V_0 = V_d - \frac{kT}{q} \quad (4.15)$$

ifadesi ile verilir (Sze ve Kwog, 2007).



Şekil 4.8. Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapısının yüksek frekanslardaki C^{-2} -V eğrileri.

Ara yüzey durumlarını ihmal ettiğimizde C^{-2} -V doğrularının eğimi,

$$\frac{dC^{-2}}{dV} = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 N_A} \quad (4.13)$$

ile hesaplanır.

Tablo 4.2. Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapısının oda sıcaklığında yüksek frekanslarda C -V ölçümlerinden elde edilmiş temel belirtken değerleri

Frekans (kHz)	V_0 (V)	$N_a \times 10^{14} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$
100	-2,28	4,87
200	-2,41	4,95
300	-2,53	5,21
500	-2,68	5,26
700	-2,84	5,42
1000	-2,98	5,46

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüz yarıiletken aygıt teknolojilerinde Ultraviyole (UV) ile kürlenebilen fotopolimerler son yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Tez çalışmamızda iyi bilinen foto-polimerlerden biri olan Trimetilolpropan Triakrilat (TMPTA) malzemesini UV ile kürleyerek Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapısını elde ettik. Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapısının karanlık altındaki akım-gerilim (I - V) ölçümleri gerçekleştirilerek; doğrultma oranı (R_R), idealite faktörü (n), engel yüksekliği (ϕ_B) ve seri direnç (R_s) gibi aygıt parametreleri belirlenmiştir. Ayrıca kapasite-gerilim (C - V) ve iletkenlik-gerilim (G - V) ölçümleri ile diğer elektriksel parametreler belirlenmiştir.

Çalışmamızın ilk aşaması p-Si üzerindeki kaplanmış ince film TMPTA fotopolimer organik tabakanın kesit yapısı SEM cihazı yardımıyla incelenmiştir. SEM görüntülerine göre, TMPTA foto polimerinin p-Si yarıiletken yüzeyine sıkı bir şekilde kaplandığı görülmüştür. Kaplanan ara yüzey tabakasının kalınlığının, SEM görüntüsünden yaklaşık 150 – 270 nm arasında değiştiği hesaplanmıştır. TMPTA'nın sahip olduğu düşük viskozitesi (25 °C'de 70-115 cps) nedeniyle, benzeri diğer foto-polimerlere kıyaslandığında kaplama işlemi sonucunda çok daha az kalınlıkta bir ara yüz tabakası elde edilebilmiştir (Özden ve ark., 2021; Özden ve ark., 2021; Özden ve ark., 2022).

Daha sonraki aşamada Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapımızın elektriksel parametrelerinin belirlenmesi için oda sıcaklığı ve karanlık altındaki akım-gerilim (I - V) ölçümleri gerçekleştirilerek analizleri yapılmıştır. Yapının idealite faktörü ve sıfır beslem engel yüksekliği değerleri sırasıyla 3,65 ve 0,79 eV olarak hesaplanmıştır. İdealite faktörü değeri ideal olan 1 değerinden büyük çıkmıştır. Yapımızın idealite faktörü değerinin 1'den büyük çıkması Al/p-Si arasındaki TMPTA polimer ara yüzey tabakasının varlığına, Al/p-Si ara yüzey durumlarının dağılımına ve p-Si yarıiletkenin nötral bölgesinin seri direncinin büyük olmasına atfedilebilir (Nicolian ve Brews, 1982). Yine I - V ölçümlerinden faydalanarak Norde ve Cheung metotları yardımıyla seri direnç analizi gerçekleştirilmiştir. Norde metodu ile R_s ve ϕ_B değerleri sırasıyla 231,1 K Ω ve 0,836 eV olarak hesaplanmıştır. Cheung metodu ile n , ϕ_B ve R_s için deneysel sonuçlar 10,8 , 0,684 eV ve 6774,1 Ω , 6736,2 Ω olarak hesaplanmıştır. Cheung fonksiyonundan hesaplanan n değeri TE'den hesaplanan değerden oldukça farklıdır. Bu fark ara yüzey durumlarına, arayüzeyin dielektrik sabitine ve TMPTA polimerinin kalınlığı yanında;

R_s hesaplamada kullanılan metot farkı (farklı voltaj bölgelerine karşılık gelmesi), engelin homojensizliğine dayanmaktadır. Ayrıca Cheung, TE ve Norde metodundan hesaplanandan engel yükseklikleri ve R_s değeri nispeten birbirlerinden farklıdır. Çünkü TE doğru öngerilimlemedeki I - V eğrisinin lineer kısmını, Norde doğru öngerilimlemedeki I - V eğrisinin tamamındaki verileri ve Cheung fonksiyonu ise I - V eğrisinin bükülmeye başladığı yerdeki lineer olmayan kısmı kullanır. Bundan dolayı Norde metodundan elde edilen R_s değeri Cheung fonksiyonundan elde edilen değerden oldukça büyüktür.

Al/TMPTA/p-Si (MPS) yapımızın oda sıcaklığındaki kapasite-gerilim (C - V) ve iletkenlik-gerilim (G/ω - V) ölçümleri 10 kHz-1 MHz sabit frekans aralığında ölçülmüştür. C - V eğrilerinden yapımızın kapasitesi frekans arttıkça kuvvetli yığılma bölgesinden kuvvetli tersinim bölgesine doğru azalmaktadır. Aynı şekilde tüketim ve yığılma bölgesinde de yapımızın kapasitesi artan frekansla azalmaktadır. Frekansa bağımlı G/ω - V değişimlerin de ise tüketim bölgesinde artan frekansla azalmış ve yığılma bölgesine doğru kaymıştır. Bu davranış polimer/yarıiletken (TMPTA/p-Si) arasındaki ara yüzey durumlarına atfedilebilir (Hung and Cheng 1987, Singh and Srivastava 1982). Bunun sebebi frekans arttıkça ara yüzey durumlarının uygulanmış olan ac sinyali takip edememelerindendir. Başka bir ifadeyle, yüksek frekans bölgesindeki ölçülen kapasite değerine ara yüzey durumlarından gelen katkı söz konusu değildir. Bu nedenle C^{-2} - V eğrisinin eğiminden hesaplanan alıcı yoğunluğu değerlerini yüksek frekanslarda hesaplanmıştır.

Çalışmada TMPTA fotopolimer organik arayüzey tabakasının MPS aygıtlarının fabrikasyonu için iyi bir aday olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2022, How the SEM Works,
<https://www.mse.iastate.edu/research/laboratories/sem/microscopy/how-does-the-sem-work/high-school/how-the-sem-works/>, erişim tarihi: 28.04.2022.
- Ayyıldız, E., Türüt, A., Efeoğlu, H., Tüzemen, S., Sağlam, M., Yoğurtçu, Y. K. 1995
 Effect of the Series Resistance on the Forward Current-Voltage Characteristic of Schottky Diodes in the Presence of İnterfacial Layer, *Solid State Electronics*, 39, 83-87.
- Bohlin, K. E., 1986, Generalized Norde Plot Including Determination of the Ideality Factor, *J. Appl. Phys.*, 60, 1223-1224.
- Card, H. C., 1976, Aluminum-Silicon Schottky Barriers and Ohmic Contacts in Integrated Circuits. *IEEE Trans. On Electron. Devices*, 23, 538-544.
- Card, H. C. and Rhoderick, E. H., 1971, Studies of Tunnel MOS Diodes I. Interface Effects in Silicon Schottky Diodes, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 4, 1589-1601.
- Castagne, R., Vapaille, A. Description of the SiO₂-Si Interface Properties by Means of Very Low Frequency MOS Capacitance Measurements, *Surface Science*, 28, 157, 1971.
- Cheung, S. K. and Cheung, N. W., 1986, Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Appl. Phys. Lett.*, 49(2), 85.
- Cowley, A. M., Sze, S. M., Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems. *Journal of Applied Physics*, 36, 3212-3220, 1965.
- Dongmei Xu, Keda Zhang, Xiulin Zhu, 2005, Fast growing dendritic poly(ester- amines) from alternate reaction of EDA and TMPTA, *Tetrahedron Letters*, Volume 46, Issue 14, 2005, Pages 2503-2505.
- Dul-Sun Kim, Jang Chang Woo, Ji Ho Youk, James Manuel, Jou-Hyeon Ahn, 2014, Gel polymer electrolytes based on nanofibrous polyacrylonitrile-acrylate for lithium batteries, *Materials Research Bulletin*, Volume 58, 2014, Pages 208-212.
- Erdin, N., 1986, Taramalı Elektrom Mikroskobunun Temel Prensipleri ve Numune Hazırlama, *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 102-124.
- Eun-Hee Kim, Yeon-Gil Jung 2015, Multiplexing storage using angular variation in a transmission holographic polymer dispersed liquid crystal, *Thin Solid Films*, Volume 596, 2015, Pages 264-268.
- Gümüş, N. M., 2013, MOS (Metal-Oksit -Yarıiletken) Kapasitörlerde Kapasitans Ölçümleri. Yüksek Lisans Tezi, *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırıkkale
- Hai-Chen Zhang, Jintao Huang, Peng-Fei Zhao, Xiang Lu, 2020, Bio-based ethylene-

- co-vinyl acetate/poly (lactic acid) thermoplastic vulcanizates with enhanced mechanical strength and shape memory behavior, *Polymer Testing*, Volume 87, 2020, 106537.
- Hill, W. A. Coleman, C. C., A single-frequency approximation for interface state density determination, *Solid-State Electronics*, 23, 987, 1980.
- Hung, K. K. and Cheng, Y. C., 1987, Determination of Si-SiO₂ interface trap properties of p-MOS structures with very thin oxides by conductance measurements, *Appl. Surf. Sci.*, 30, 114-119.
- Kirkland, D., Fowler, P., 2018, A review of the genotoxicity of trimethylolpropane triacrylate (TMPTA), *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 828 (2018), pp. 36-45, 10.1016/j.mrgentox.2018.02.006
- McLean, A. B., 1986, Limitations To The Norde I-V Plot. *Semicond. Sci. Technol.*, 1, 177-179.
- Nam-Bu Cho, Tai-Ho Lim, Young-Min Jeon, Myoung-Seon Gong, 2007, Humidity sensors fabricated with photo-curable electrolyte inks using an ink-jet printing technique and their properties, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 130, Issue 2, 2008, Pages 594-598.
- Nicolian, E. H. and Brews, J. R., 1982, Metal Oxide Semiconductor (MOS) Physics and Technology, *John Wiley*, New York.
- Norde, H., 1979, A Modified Forward I-V Plot for Schottky Diodes With High Series Resistance, *J. Appl. Phys.*, 50, 5052-5053.
- Özden, Ş., Avcı, N., Pakma, O., Kariper, İ.A., 2021, NOA61 photopolymer as an interface for Al/NOA61/p-Si/Al heterojunction MPS device, *J Mater Sci: Mater Electron* 32, 27688–27697 (2021).
- Özden, Ş., Avcı, N., Pakma, O., Kariper, İ.A., 2022, Influence of illumination intensity on the electrical properties of Al/NOA65/p-Si/Al heterojunction MPS device, *J Mater Sci: Mater Electron* (2022).
- Özden, Ş., Avcı, N., Pakma, O., Kariper, İ.A., 2022, Temperature Dependent Current Transport Mechanism of Photopolymer Based Al/NOA60/p-Si MPS Device, *J Inorg Organomet Polym* 32, 1810–1818 (2022).
- Park JW, Shim G.S., Lee J.G., Jang S.W., Kim H.J., Choi J.N., 2018, Evaluation of UV Curing Properties of Mixture Systems with Differently Sized Monomers *Materials (Basel)*. 2018;11(4):509. Published 2018 Mar 28. doi:10.3390/ma11040509
- Sato, K. and Yasamura, Y., 1985, Study of Forward I-V Plot for Schottky Diodes with High Series Resistance, *J. Appl. Phys.*, 58, 3655-3657.

- Singh, R. J. and Srivastava, R. S., 1982, Investigations of interface-state density in Si MOS structures, *Solid-State Electronics*. 25(3), 227-232.
- Sze, S. M. and Kwog, K. Ng., 2007, *Physics of Semiconductor Physics*. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Sze S.M., *Physics of semiconductor devices*, 2nd ed. New York Wiley, 1981.
- Yu Tian, Jing Zhang, Si-Si Liu, Shengyang Yang, Su-Na Yin, Cai-Feng Wang, Li hen, Su Chen, 2016, Facile construction of dual bandgap optical encoding materials with PS@P(HEMA-co-AA)/SiO₂-TMPTA colloidal photonic crystals, *Optical Materials*, Volume 57, 2016, Pages 107-113.
- Xu Ouyang, Lan Zhou, Xinliang Xu, Zhangyan Yang, Lei Wang, Lizhe Lu, Guojin Liu, Guoqing Zhang, 2020, Preparation and properties of poly(MMA-co-TMPTA)/fragrance microcapsules, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Volume 614, 2021, 126103.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mehmet Emin ÖZENÇ
Uyruğu : T.C.

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Batman Lisesi, Batman	1999
Üniversite	: Dicle Üniversitesi, Diyarbakır	2006
Yüksek Lisans	: Batman Üniversitesi	-

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2009	Özel Hastane	Kalite Birim Sorumlusu
2010	Özel Sektör	Ticaret
2012	Özel Sektör	İşletmeci
2020	Özel Sektör	E-Ticaret
2021	F-Tech Labs	İş Analisti

YABANCI DİLLER

İngilizce