



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Al KATKILI ZrO_2 OKSİT TABANLI MOS YAPILARIN
ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU**

Remzi ODUNVEREN

**Ocak-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Al KATKILI ZrO_2 OKSİT TABANLI MOS YAPILARIN
ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU**

Remzi ODUNVEREN

**Danışman
Prof. Dr. Osman PAKMA**

Diğer Jüri Yeleri

Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ Prof. Dr. Osman PAKMA Doç. Dr. Şadan ÖZDEN

**Ocak-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Remzi ODUNVEREN tarafından hazırlanan “Al Katkılı ZrO₂ Oksit Tabanlı MOS Yapıların Elektriksel Karakterizasyonu.” adlı tez çalışması 13/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

.....

Danışman

Prof. Dr. Osman PAKMA

.....

Üye

Doç. Dr. Şadan ÖZDEN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

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 beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

İmza
Remzi ODUNVEREN
Tarih: 13/01/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Al KATKILI ZrO₂ OKSİT TABANLI MOS YAPILARIN ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

Remzi ODUNVEREN

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Fizik Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Osman PAKMA

2025, 71 Sayfa

Bu tez çalışmasında oksit arayüzeyi katkısız ve %1, %5, %10 alüminyum (Al) katkılı Al/ZrO₂/p-Si metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapıların elektriksel özellikleri incelenmiştir. Oksit tabakası ZrO₂ kimyasal banyo depolama tekniği kullanılarak p tipi silisyum üzerine büyütülmüştür. Öncelik büyütülmüş ZrO₂ ince filmin yapısal analizi x-ışını kırınım difraktometresi (XRD) ile yapılmıştır. Daha sonra tüm Al/ZrO₂/p-Si (MOS) yapıların akım-gerilim (I-V) ölçümleri oda sıcaklığında ve karanlık altında gerçekleştirilmiştir. I-V ölçümlerinden faydalanarak diyot elektriksel parametreleri tayin edilmiştir. Yine I-V ölçümlerinden Norde ve Cheung yöntemi kullanılarak yapıların seri direnç etkileri belirlenmiştir. Belirlenen parametreler literatürde karşılaştırılarak Al katkısının etkisi raporlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akım-Gerilim, MOS, Seri Direnç, ZrO₂

ABSTRACT

MASTER THESIS

ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF Al DOPED ZrO_2 OXIDE BASED MOS STRUCTURES

Remzi ODUNVEREN

Batman University Graduate Education Institute

Physics Department of Science

Advisor: Prof. Dr. Osman PAKMA

2025, 71 Pages

In this thesis, the electrical properties of Al/ ZrO_2 /p-Si metal-oxide-semiconductor (MOS) structures with undoped oxide interface and doped with 1%, 5%, 10% aluminum (Al) were investigated. The oxide layer was grown on p-type silicon using ZrO_2 chemical bath deposition technique. Structural analysis of the pre-grown ZrO_2 thin film was performed by x-ray diffraction diffractometer (XRD). Then current-voltage (I-V) measurements of all Al/ ZrO_2 /p-Si (MOS) structures were performed at room temperature and under darkness. The diode electrical parameters were determined by utilizing the I-V measurements. Again, the series resistance effects of the structures were determined using the Norde and Cheung method from I-V measurements. The effect of Al doping is reported by comparing the determined parameters in the literature.

Keywords: Current-Voltage, MOS, Series Resistance, ZrO_2 .

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının tamamlanmasında emeği geçen öncelikle, değerli danışmanım Prof. Dr. Osman PAKMA'ya, bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım için minnettarım. Onun sürekli desteği ve bilimsel rehberliği, bu sürecin her aşamasında bana ışık tuttu. Ayrıca, Doç. Dr. Şilan BATURAY ve Doç. Dr. Şadan ÖZDEN'e, bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendirdikleri için teşekkür ediyorum. Onların eleştirileri ve önerileri, bu çalışmanın derinliğine önemli katkılar sağladı. Hayatımın her anında yanımda olan, beni motive eden ve bana inanan sevgili eşim Pervin'e ve biricik çocuklarım Berken Yağız ve Onur Yekda'ya da yürekten teşekkür ederim. Onların sınırsız sevgisi ve desteği, bu zorlu süreçte ayakta kalmam için büyük bir güç kaynağı oldu. Ailemin bana kattığı güven ve motivasyon, bu çalışmayı tamamlamamda en önemli etkenlerden biri oldu.

Remzi ODUNVEREN
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL BİLGİLER	3
2. 1. Metal/Yarıiletken (MS) Kontaklar.....	3
2.1.1. Metal/yarıiletken kontak	3
2.1.1.1. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak	5
2.1.1.2. Metal /n-tipi yarıiletken omik kontak	8
2.2. Metal/Oksit/Yarıiletken (MOS) Eklemler	9
2.2.1. İdeal Metal/Oksit/Yarıiletken (Mos) Eklemler	10
2.2.1.1. Yığılma	14
2.2.1.2. Tükenim	15
2.2.1.3. Tersinim	15
2.3. Metal/Yarıiletken (MS) ve Metal/Oksit/Yarıiletken (MOS) Eklemlerde Akım İletim Mekanizmaları	16
2.3.1. Difüzyon kuramı	17
2.3.2. Termiyonik emisyon kuramı (TE).	18
2.3.3. Bariyer boyunca tünelleme	20
2.4. İdealite Faktörü.....	22
2.4.1. İdeal durumlardan sapma nedenleri	23
2.4.1.1. Seri direnç etkisi	23
2.5. İnce Film Elde Etme Yöntemleri:.....	30
2.5.1. Termal buharlaştırma yöntemi:	30
2.5.2. Saçtırma Yöntemi	33
2.5.3. Kimyasal Püskürtme Yöntemi	33
2.5.4. Langmuir-blodgett yöntemi:	34
2.5.5. Kimyasal banyo depolama yöntemi:.....	35

2.5.6. Sol-Jel kaplama yöntemi.....	36
3. DENEYSEL İŞLEMLER.....	37
3.1. Taban Malzemelerinin Hazırlanması.....	37
3.2. Çözelti Hazırlama	38
3.3. X-Işını Kırınım Difraktometresi ile Yapı Tayini	38
3.4. Arayüzeyi Katkısız ve Katkılı Al/ZrO ₂ /p-Si (MOS) Yapılarının Eldesi	39
3.5. Akım-Gerilim (I-V) Ölçüm Sistemi	40
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	42
4.1. XRD Yapısal Tayini	42
4.2. Katkısız ve Katkılı ZrO ₂ İnce Filmlerin Kalınlık Tayinleri.....	43
4.3. Seri Direnç Analizleri	45
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	52
KAYNAKLAR	54

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. ($\phi_M > \phi_S$) değeri ise metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için; a) kontakdan yapılmadan önce b) kontakdan yapıldıktan sonra termal dengede c) uygulanan gerilim $V < 0$ d) uygulanan gerilim $V > 0$	5
Şekil 2.2. $\Phi_M < \Phi_S$ olması durumunda metal/n-tipi yarıiletken omik kontaklarda, a) Metal/yarıiletken kontak yapılmadan önce, b) Metal/yarıiletken kontakdan yapıldıktan sonra, c) Gerilim değeri $V < 0$ olduğunda d) Gerilim değeri $V > 0$ olduğunda.....	8
Şekil 2.3. Metal/Oksit/Yarıiletken (MOS) eklemi ve eşdeğer devresi.....	9
Şekil 2.4. Metal/Oksit/yarıiletken (MOS) yapısı (Sze, 1981).....	10
Şekil 2.5. Bir metal/oksit/yarıiletken (MOS) yapının kapasitans gösterimi, (sentdox: oksit tabakanın kalınlığı, v : metal yüzeye uygulanan gerilim).....	11
Şekil 2.6. Denge durumunda olan ideal bir MOS yapısının enerji-bant diyagramı; (a) p-tipi yarıiletken, (b) n-tipi yarıiletken.....	13
Şekil 2.7. İdeal MOS ekleminin üç değişik eşdeğer devresi (1) Yığılma, (2) Tükenim, (3) Tersinim	13
Şekil 2.8. Arayüz katmanlarının yüklenmesi altında ideal bir lif yapısının enerji bandı diyagramları (son şekil n tipi); (a) kümeleşme, (b) tükenme, (c) tersine dönme (Sze, 1981).....	14
Şekil 2.9; Metal/n-tipi yarıiletken kontak yapılarında dört temel akım transfer mekanizması: a) termiyonik emisyon, b) tünelleme, c) taşıyıcı üretimi ve birleşimi, d) azınlık taşıyıcı enjeksiyonu	16
Şekil 2.10. Alan Emisyonu Bant Diyagramı Ve İleri Beslem Termiyonik Alan Emisyonu (ξ taralı alan bölgesi negatif olduğundan aşırı katkılanmış yarı iletken bölgesi).....	21
Şekil 2.11. Termal buharlaştırma işleminde kullanılan buharlaştırma kaynakları	30
Şekil 2.12. Yukarıda görülen şema, vakum ortamında gerçekleştirilen buharlaştırma yöntemini basitleştirilmiş bir şekilde göstermektedir.....	31
Şekil 2.13. Batman Üniversitesi Fizik Laboratuvarında Bulunan Termal Buharlaştırma Sistemi.....	31
Şekil 2.14. Saçtırma mekanizması.....	32
Şekil 2.15. Kimyasal püskürtme yöntemini	33

Şekil 2.16. Püskürtme sistemi (Batman Üniversitesi).....	33
Şekil 2.17. Yüzey aktif moleküllerin hava-su arayüzeyinde düzenlenmesi	34
Şekil 2.18. LB sistemi (Batman Üniversitesi).....	34
Şekil 2.19. Kimyasal banyo yöntemini.....	35
Şekil 3.1. Yapısal tayin için XRD cihazı (Batman Üniversitesi).....	38
Şekil 3.2. Tavlama işlemleri için kullanılan Protherm PTF 12/75/800 tüp fırın (Batman Üniversitesi).....	38
Şekil 3.3. Al/ZrO ₂ /p-Si (MOS) yapısı.....	39
Şekil 3.4. Nanovak NVTH-350 Termal buharlaştırma cihazı (Batman Üniversitesi).....	39
Şekil 3.5. Akım-gerilim (I-V) ölçümlerinin gerçekleştirildiği kapalı kutu (Batman Üniversitesi).....	40
Şekil 3.6. Keithley marka 4200 SCS model akım kaynağı.....	40
Şekil 3.7. İnce film kalınlık ölçer spektrofotometre (Avantes AvaSpec-ULS2048).....	40
Şekil 4.1. p-Si yüzeyi kaplanmış ZrO ₂ ince film yapısının XRD desenleri.....	41
Şekil 4.2. Al/p-Si, katkısız ve arayüzü Al katkılı Al/ZrO ₂ /p-Si (MOS) yapılarının $LnI-V$ eğimleri.....	44
Şekil 4.3. Al/p-Si, katkısız ve arayüzü Al katkılı Al/ZrO ₂ /p-Si (MOS) yapılarının Norde eğimleri.....	46
Şekil 4.4. Al/p-Si, katkısız ve arayüzü Al katkılı Al/ZrO ₂ /p-Si (MOS) yapılarının $dV/d(LnI)-I$ grafikleri.....	48
Şekil 4.5. Al/p-Si, katkısız ve arayüzü Al katkılı Al/ZrO ₂ /p-Si (MOS) yapılarının $H(I)-I$ grafikleri.....	49

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 4.1. ZrO ₂ yapısının XRD desenlerinden elde edilen veriler.....	42
Çizelge 4.2. Ölçüm ve analizlerde kullanılan yapıların bilgileri.....	42
Çizelge 4.3. Al/p-Si, katkısız ve arayüzü Al katkılı Al/ZrO ₂ /p-Si (MOS) yapılarının I-V ölçümünden hesaplanmış elektriksel parametre değerleri.....	50



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

δ : Arayüzeyler arasında oluşan oksit bölge kalınlığı

μ : Elektron mobilitesi veya hareketliliği

A^* : Richardson sabiti

A : Diyot kontakt bölgesi

C : Kapasite

C_{HF} : Yüksek frekansta alınan kapasite ölçümü

C_i : Arayüzey tabaka kapasitesi

C_{LF} : Düşük frekansta alınan kapasite ölçümü

C_m : Maksimum iletkenlik değerine karşılık gelen kapasite

C_{OX} : Oksit tabaka kapasitansı

C_{sc} : Uzay yükü kapasitansı

d : Uzay yükü bölgesinin genişliği

D_n : Elektron geçişme sabiti

d_n : Dar bir enerji aralığındaki elektron yoğunluğu

$E(x)$: Pozisyona bağlı elektrik alan

e : Elektron yükü

E_c : İletkenlik bandının tabanı

E_F : Fermi enerji seviyesi

E_g : Yarı iletkenin yasak enerji aralığı

E_o : Boşluğun dielektrik sabiti

E_s : Yarıiletkenin dielektrik sabiti

E_v : Valans bandı

G_m : Biriktirme bölgesinde ölçülen maksimum iletkenlik

h : Planck sabiti

I_o : Ters beslem akımı

J_{SD} : Doygunluk akımı

k_B : Boltzmann sabiti

m^* : Elektron veya deşik etkin kütlesi

m : Kütle

M_A : Molekül kütlesi

$n(x)$:Elektron yoğunluğu

n : İdealite faktörü

N_C : İletkenlik bandındaki hacim başına düşen izinli enerji hallerinin yoğunluğu

N_D : Verici katkı atomlarının yoğunluğu

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

N_{sb} : Yarıiletken ile dengede olan durum yoğunluğu

N_{ss} : Ara yüzey durumları

R_s : Seri direnç

T : Mutlak sıcaklık

V_D : Geçişme potansiyeli

V_F : İleri beslem gerilimi

V_G : Metal yüzeye uygulanan gerilim

V_{ox} : Oksit yüzey üzerine düşen gerilim

V_R : Geri beslem gerilimi

V_x : X yönündeki taşıyıcı hızı

W : Deplasyon bölgesi

W_d : Tükenim bölgesinin genişliği

X : Yarı iletkenin elektron ilgisi

γ : Norde yönteminde bir sabit

ϕ_B : Bariyer yüksekliği

ϕ_M : Metalin işi fonksiyonu

ϕ_n : n-tipi yarıiletkenin işi fonksiyonu

ϕ_p : p-tipi yarıiletkenin işi fonksiyonu

ϕ_s : Yarıiletkenin iş fonksiyonu

ξ_i : Oksit tabakasının genişliği

ξ_s : Yarıiletkenin geçirgenliği

Kısaltmalar

C-F: Kapasite – frekans

CNC: Selüloz nanokristalleri

CNF: Selüloz nanofibriller

C-V: Kapasite – gerilim

DLS: Dinamik Işık Saçılımı Spektrometresi

DT: Difizyon kuramı

EDTA:Etilen diamin tetra asetik asit

G-F: Kondüktans- frekans

G-V: Kondüktans-gerilim

I-V: Akım- gerilim

MOS: Metal -oksit-yarıiletken kontak

MS: Metal -yarıiletken kontak

PVD: **Fiziksel** buhar biriktirme

SEM:Taramalı elektron mikroskobu

TE: Termiyonik emisyon kuramı

TED: Termiyonik emisyon -difizyon kuramı

TEM:Transmisyon (geçirimli elektron mikroskobu

UV-Vis:Ultraviyole ve Görünür Işık Soğurma Spektrometresi (UV-Vis)

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesi, elektronik cihazların boyutlarının küçülmesi ve performanslarının artması beklentisi, malzeme bilimi alanında sürekli bir araştırma ve geliştirme sürecini tetiklemektedir. Bu sürecin merkezinde, yarıiletken teknolojisi ve özellikle de ince film teknolojisi yer almaktadır. İnce filmler, farklı malzemeler üzerine nanometre ölçeğinden mikrometre ölçeğine kadar değişen kalınlıklarda kaplamalar oluşturmak için kullanılan çok yönlü bir araçtır. Bu teknoloji, malzemelerin özelliklerini geliştirerek veya değiştirerek daha verimli, dayanıklı ve çok fonksiyonlu ürünlerin ortaya çıkmasını sağlamaktadır (Kılınç, 2006; Tatar, 2015). İnce film teknolojisi, 19. yüzyıldan itibaren bilim insanlarının yoğun ilgi odağı olmuştur. Başlangıçta basit kaplamalar ve dekoratif amaçlarla kullanılan bu teknoloji, zamanla malzemelerin nano ölçekteki davranışlarının anlaşılmasıyla birlikte büyük bir dönüşüm geçirmiştir. Özellikle yarıiletken malzemelerin ince film formunda kullanılması, elektronik ve optoelektronik cihazların gelişiminde çığır açmıştır. Günümüzde, bilgisayarlardan cep telefonlarına, güneş panellerinden tıbbi cihazlara kadar geniş bir yelpazede ince filmler kullanılmaktadır (Aba, 2024).

Kristal silisyum tabanlı güneş hücrelerinde genellikle yansıma kaybını azaltmak için ultra ince bir p-Si katmanı kullanılır (Saga, 2010). Ancak, p-Si kaplamasının üzerine belirli yansıma önleyici malzemelerin eklenmesi, gelen ışığın saçılmasını azaltarak güneş hücresinin performansını artırır. Yansıma önleyici özellikleriyle bilinen bazı malzemeler arasında SiO_2 , ZnO , Al_2O_3 , zirkonya, monazit, ZnS , MoSe_2 , MoS_2 , ZnSe , TiO_2 , Ta_2O_5 , Ag, polidimetilsiloksan ve daha fazlası bulunur (Gobinath ve ark.,2022; Khan ve ark., 2014; Verma ve ark., 2010; Kaliyannan ve ark., 2021; Senthilkumar ve ark.2018). Kaplamalı filmin dayanıklılığı, optik dönüşüm yönteminde önemli bir faktördür. Yansıma önleyici kaplamanın dayanıklılığı, nem, yüzey sıcaklığı, toksik çalışma ortamları, yetersiz yapışma ve gelen ışık ışınlarının gücü gibi çeşitli faktörlerden etkilenebilir. Güneş hücrelerinde genelde tercih edilen zirkonyum oksit (ZrO_2), geçirgen bir malzeme, mekanik özelliklere sahip, mekanikliği yüksek dayanıklılığa sahip (Maloney, 2000; Lukin ve ark., 2004), termal yalıtkanlığa (Hiroshi ve ark., 2001) ve aşınmaya karşı dirençli bir özellikler gösterir.

ZrO₂ elde etmede çeşitli üretim yöntemleri kullanılır. Bugüne kadar bu tip önemli bir malzemenin üretiminde araştırmacılar farklı yöntemler denemişlerdir. Bunlardan bazıları; sol-jel ve hidro ısısal yöntemler (Zhang ve ark., 2004; Xu ve ark., 2004), kimyasal buhar yöntemi (Tietz ve ark., 1989) ve termal bozunma yöntemleridir (Ray ve ark., 2001). Yine araştırmacılar bunlara ilaveten daha basit ve ekonomik olması sebebiyle farklı kimyasal depolama yöntemleri geliştirmişlerdir.

Biz tez çalışmamızda kimyasal banyo depolama yöntemini kullanarak alttaş p tipi silisyum malzeme üzerine katkısız ve %1, %5 ve %10 alüminyum katkılı ZrO₂ ince filmler oluşturarak, Al/ZrO₂/p-Si metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapılar oluşturduk. Öncelikle ZrO₂ yapısını tayin etmek için katkısız ZrO₂/p-Si yapısını X-ışını kırınım Difraktometresi (XRD) yöntemiyle analizini gerçekleştirdik. Oda sıcaklığında ve karanlık koşullar altında, farklı katkılı MOS yapılarının akım-gerilim (I-V) analizlerini gerçekleştirdik. Bu analizler yardımıyla elektriksel parametreleri belirledik. Yine Norde ve Cheung yöntemlerini uygulayarak MOS yapıların seri direnç etkilerini tayin ettik. Katkılı ve katkısız durumlar göz önünde bulundurularak elde edilen değişimler analiz edilmiş ve literatürle karşılaştırılmıştır.

2. KURAMSAL BİLGİLER

2. 1. Metal/Yarıiletken (MS) Kontaklar

Bir metal ve bir yarıiletken malzeme bir araya geldiğinde, farklı sıcaklıklardaki iki nesnenin temas etmesi gibi, aralarında bir "elektron değişimi" başlar. Bu değişim, Fermi enerji seviyeleri her iki malzemenin eşit olan kadar devam eder. Sonuç olarak, arayüzde bir potansiyel engeli oluşur ve bu engel, yüklerin geçişini kontrol eden bir "sınır kapısı" gibi davranır. Bu olguyu ilk fark eden Schottky, engelin metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farka bağlı olduğunu öne sürmüştür. Daha sonra Mott bu teoriyi geliştirmiş ve Schottky-Mott teorisini oluşturmuştur.

Metal-yarıiletken kontakları, bu potansiyel engelinin özelliklerine göre "omik" ve "doğrultucu" olmak üzere iki gruba ayrılır. Omik kontaklar, akımın her iki yönde serbestçe akmasına izin veren "açık kapılar" gibidir. Doğrultucu kontaklar ise, akımı yalnızca bir yönde geçiren "diyotlar" gibi çalışır. Örneğin, bir altın tel, p tipi germanyumla omik bir kontak ve n tipi germanyumla doğrultucu bir kontak oluşturur. Omik kontaklar, düşük dirençli bir yol sağlayarak cihaz verimliliğini artırırken, diyotlar gibi uygulamalarda akımı tek yönde ileterek devre işlevlerini kontrol etmek için doğrultucu kontaklar kullanılır.

2.1.1. Metal/yarıiletken kontak

Metal/yarıiletken malzemelerinde kontağın doğrultucu mu yoksa omik mi olduğunu anlamak için, malzemelerin iş fonksiyonlarını dikkatlice incelemek gerekir. İş fonksiyonu, elektronun malzemedan koparılarak "serbest" hale gelmesi, yani sonsuza kadar uzaklaştırılması için gereken minimum enerji olarak tanımlanabilir. Bu kavram, metal-yarıiletken kontakların davranışını ve elektronik cihazlardaki rollerini anlamak için kritik bir öneme sahiptir.

Bir metalin iş fonksiyonunu, bir elektronun fermi enerjisi seviyesinden vakum enerji seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerji $\Phi(m)$ ile gösterilir. Sze ve Ng (2006),

"Physics of Semiconductor Devices" adlı başyapıtlarında iş fonksiyonunu "...elektronun katıdan ayrılması için gereken minimum enerji..." şeklinde öz bir şekilde ifade etmişlerdir. Düşük iş fonksiyonlu metaller, elektronları kolayca serbest bırakır ve bu nedenle genellikle iyi iletkenlerdir.

Yarıiletken İş fonksiyonu $\Phi(s)$ ile gösterilen ise, yarıiletkenin vakum enerji seviyesi ile Fermi enerji arasındaki farkıdır. Yarıiletkenin Fermi seviyesi, katkılama miktarına, yani malzemeye eklenen safsızlık atomlarının konsantrasyonuna bağlı olarak değişir. Bu nedenle, $\Phi(s)$ de değişken bir niceliktir. Rhoderick ve Williams (1988), "Metal-Semiconductor Contacts" adlı temel eserlerinde bu durumu, ". yarıiletkenin iş fonksiyonunun, katkılama tipine ve konsantrasyonuna bağlı olduğunu" şeklinde vurgulamışlardır.

Fermi enerji seviyesi (E_f), katılarda elektronların enerji dağılımını anlamamız için temel bir kavramdır. Sıcaklık mutlak sıfıra yaklaştıkça, Fermi seviyesi ve altındaki tüm enerji seviyeleri elektronlarla dolar, üstündeki seviyeler ise boş kalır. Ashcroft ve Mermin (1976), "Solid State Physics" adlı klasikleşmiş kitaplarında Fermi seviyesini, "...elektronların işgal etme olasılığının 1/2 olduğu enerji seviyesi..." olarak tanımlamışlardır. $f(E)$ Fermi dağılım fonksiyonu, belirli bir sıcaklıkta bir elektronun belirli bir enerji seviyesini işgal etme olasılığını verir ve Fermi seviyesi bu fonksiyonun bir sabitidir. Bu sabit $f(E)$ ve ilişkisi;

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp[-(E_f - E) / kT]} \quad (2.1)$$

ile verilir.

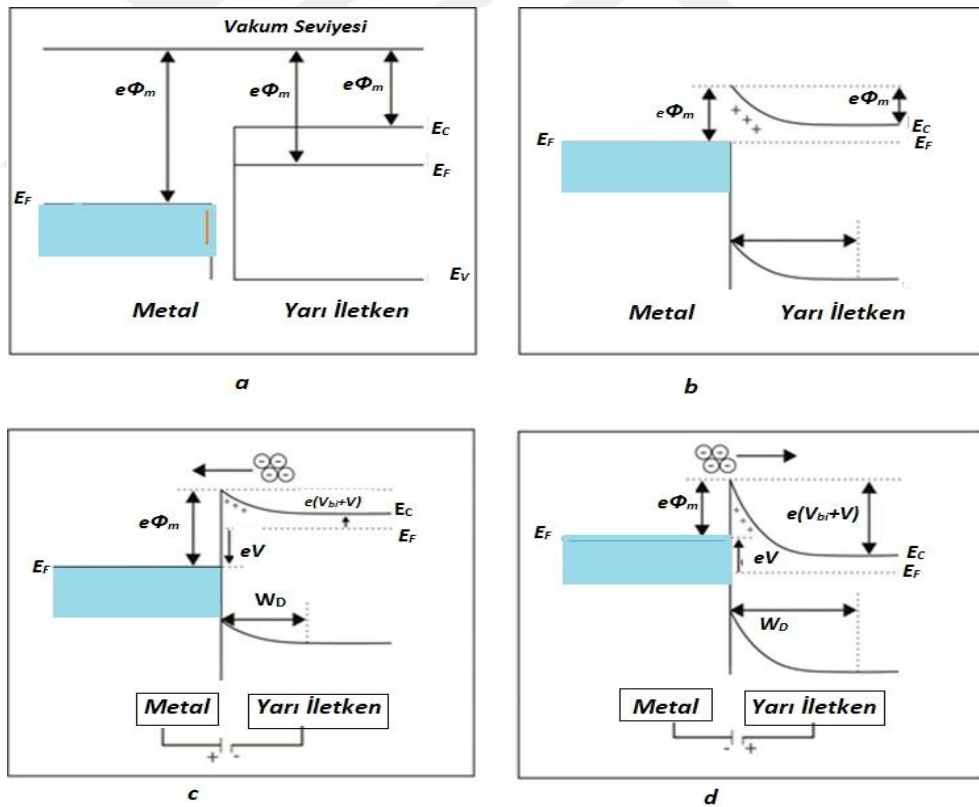
İletkende elektron ilgisi (χ_s), iletkenlik değerlik bandının tepe sınırından (E_c), vakum seviyesine bir elektronu çıkarmak için gerekli olan enerji miktarıdır. Bu, yarıiletkendeki bir elektronun "serbest" hale gelmesi için aşması gereken enerji engelini temsil eder. Vakum seviyesi ise, bir referans noktası olarak düşünülebilir ve bir metalin hemen dışındaki, sıfır kinetik enerjiye ait olan bir elektronun enerji miktarı seviyesini ifade eder.

Sonuç olarak, metal-yarıiletken kontakların omik veya doğrultucu olma durumunu anlamak için, iş fonksiyonları, Fermi seviyesi ve elektron ilgisi gibi temel kavramları dikkate almak gerekir. Bu kavramlar, metal ve yarıiletken arasındaki yük alışverişini ve arayüzde oluşan potansiyel bariyerini anlamamızı sağlar.

2.1.1.1. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak

Schottky diyotları olarak da bilinen doğrultucu metal-yarıiletken temaslarının temel özelliği, temas direncinin uygulanan voltaja güçlü bir şekilde bağlı olmasıdır. Bu güçlü bağımlılık, metal-yarıiletken temasının tek yönlü iletkenlik göstermesine olanak tanır. Yani, akım temas noktasından bir yönde kolayca geçer, ancak ters yönde çok zayıf bir şekilde geçer.

Bu, n-tipi yarıiletken kullanan bir Schottky diyotta, metalin iş fonksiyonunun (Φ_m) yarı iletkenin iş fonksiyonundan (Φ_s) daha büyük olmasıyla açıklanabilir. Başlangıçta, yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden daha yüksektir. Metal ve yarıiletken temas ettiğinde, yarıiletkendeki elektronlar metale doğru hareket eder ve yarıiletkenin Fermi seviyesinin düşmesine neden olur. Sonuç olarak, her iki malzemenin Fermi seviyeleri dengede hizalanır. Bu süreç, akımın yalnızca bir yönde kolayca geçmesine izin veren bir potansiyel bariyeri oluşturur.



Şekil 2.1. ($\phi_M > \phi_S$) değeri ise metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için; a) kontakdan yapılmadan önce b) kontakdan yapıldıktan sonra termal dengede c) uygulanan gerilim $V < 0$ d) uygulanan gerilim $V > 0$

Bir metal ve bir yarıiletken temas ettiğinde, yarıiletken tarafındaki elektronlar metale doğru hareket eder ve bu da yarıiletken yüzeyinde bir elektron eksikliğine, yani pozitif yük fazlalığına neden olur. Metal tarafında ise yarıiletkenden gelen elektronlar sebebiyle negatif yük artışı meydana getirir. Bu, metal ve yarıiletken arasında bir dipol tabakasının oluşmasına neden olur. Bu dipol tabakası, yarıiletkenin enerji bant yapısını etkiler ve bantların yarıiletken yüzeyinde yukarı doğru bükülmesine neden olur. Bu bükülme, elektronların yarı iletkeninden metale geçmesini zorlaştıran bir potansiyel engeli oluşturur.

Bu potansiyel engelinin:

$$eV = \phi_m - \phi_s \quad (2.2)$$

Yarı iletken tarafındaki yüksekliği;

$$e\phi = \phi_m - \chi_s \quad (2.3)$$

eşitliği verilir.

Elektronlar bu bölgeden ayrıldıktan sonra geride kalan sabit pozitif yüklere uzay yükleri adı verilir ve bu uzay yükleri tüketim bölgesinin bir yanında pozitif uzay yükleri, diğer yanında ise metal üzerinde negatif yüzey yükleri şeklinde oluşur. Bu yapı tıpkı bir kapasitör gibi davranır ve Schottky kapasitansı veya tüketim bölgesi kapasitansı adı verilen bir kapasitans değeri gösterir. Schottky kapasitansı, tüketim tabakasının kalınlığıyla (d) ters orantılıdır. Başka bir deyişle, tüketim bölgesi kalınlaştıkça kapasitans değeri azalır. Yeterli termal enerjiye sahip elektronlar, potansiyel bariyerini aşar ve bu şekilde metalden yarıiletkene ve yarıiletkenden metale yük geçişi gerçekleşebilir. Bu geçişler, eşit büyüklükte ve zıt yönde bir I_0 kaçak akımı meydana getirir. Metalden yarıiletkene geçen elektronlara yarıiletken tarafına negatif bir voltaj ($-V$) uygulandığı takdirde potansiyel bariyer yüksekliği değişmediği için akım seviyesi de değişmez.

Bu da yarıiletkenden metale akan yükler için iletkenlik bandı eV kadar arttığında, engel yüksekliği de eV kadar azalma gözlenecektir. Tüketim bölgesinin aralık kalınlığı ' d ' dir. Yarıiletken yönünde negatif bir voltaj ($-V$) etkilendiğinde, metalden yarıiletkene akan elektron yükler için potansiyel engel yüksekliği aynı kalır, bundan dolayı akım aynı kalır. Tüketim bölgesinin kalınlığı ($V < 0$)

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(\phi_k - V)}{eN_d}} \quad (2.4)$$

Olmaktadır ($V < 0$).

Metal/yarıiletken temas noktası boyunca bir voltajda, elektronların maruz kaldığı potansiyel enerji engeli artar. Sonuç olarak, metalden yarı iletkene akan akım $\exp(\frac{eV}{kT})$ faktörü kadar azalır. Oluşan bu net akım;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

Eğer akım pozitif çıkarsa. Elde edilecek I_0 doyma akımı;

$$I_0 = AR * T^2 e^{\theta\phi_b/kT} \quad (2.6)$$

ifadesi ile gösterilir.

A : Kontakın Kesit Kalınlığı (cm^2),

R^* : Richardson Sabit Değeri,

T : Mutlak Sıcaklık(K),

k . Boltzman Sabit Değeri,

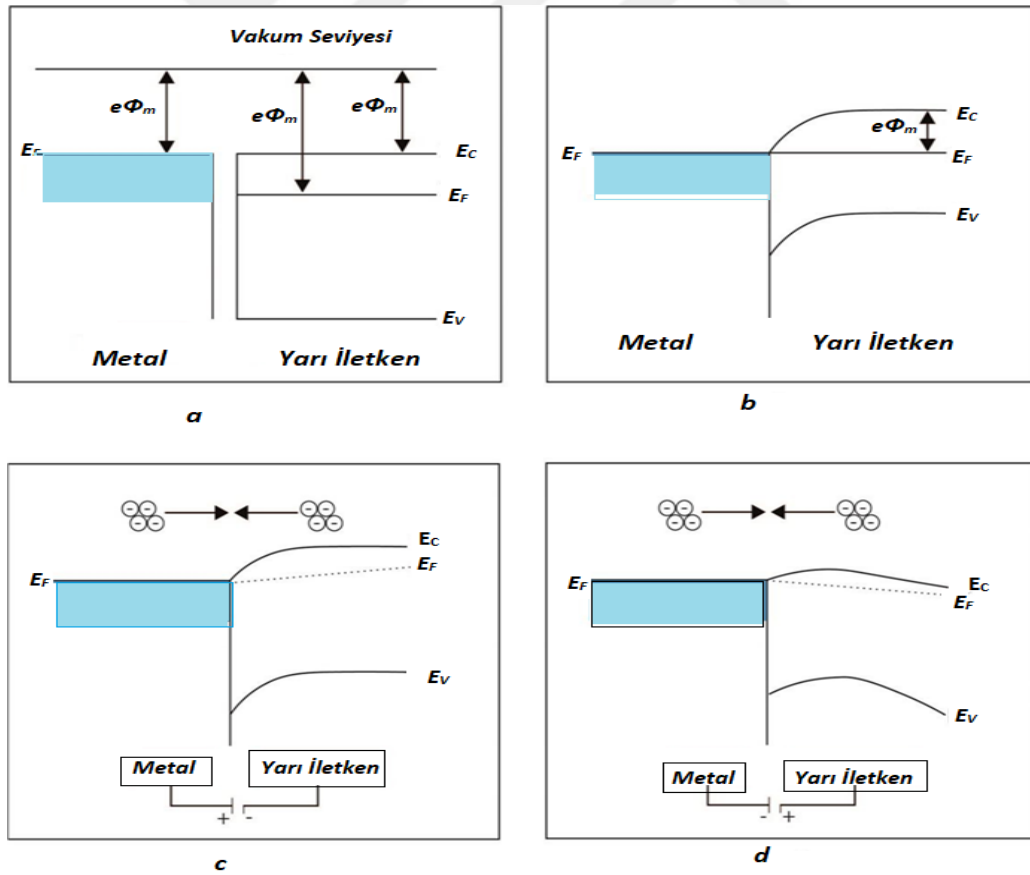
ϕ_b : Potansiyel Engel Yüksekliği (J ya da eV).

Bir metal/n-tipi yarıiletken temasını ele alalım. Metal tarafını potansiyel kaynağının pozitif (+) kutbuna ve n tipi yarı iletkeni negatif (-) kutbuna bağladığımızda, bu bağlantıya doğru beslem denir. Bağlantıyı tersine çevirirsek, yani metal negatif (-) kutba ve n-tipi yarıiletken pozitif (+) kutba bağlanırsa, o zaman ters beslem elde ederiz. Yarıiletken tarafına $+V$ voltajı uyguladığımızda, ters beslem durumu oluşur. Bu durumda, yarıiletkenin iletim bandı eV miktarı kadar aşağı kayar ve yarıiletken tarafındaki potansiyel bariyeri eV kadar artar. Sonuç olarak, üretilen net akım $-I(0)$ değerine yaklaşır. Burada çıkarabileceğimiz önemli nokta, yarıiletken bölgesindeki potansiyel bariyerinin yüksekliğinin uygulanan voltaj değerine bağlı olarak değişmesidir. Başka bir deyişle, bariyer doğru beslemde azalırken, ters beslemde artar. Metal tarafındaki engel yüksekliği uygulanan voltajdan bağımsızdır ve sabit kalır.

2.1.1.2. Metal /n-tipi yarıiletken omik kontak

Omik kontaklar, elektrik akımını her iki yönde de kolayca iletebilen özel kontaklardır. Bu kontaklarda, yarıiletkenin Fermi seviyesi başlangıçta metalin Fermi enerji seviyesinden $\Phi_s - \Phi_m$ ($\Phi_m < \Phi_s$) kadar düşüktür. Bir metal ve bir yarıiletken temas ettiğinde, elektronlar metalden yarıiletkene doğru akar ve böylelikle metal tarafında pozitif, yarıiletken tarafında da negatif bir uzay yükü meydana gelir. Elektron transferi, yarıiletkenin Fermi seviyesini $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükseltir ve sonunda her iki malzemenin Fermi seviyeleri hizalanarak termal dengeye ulaşır.

Bu işlemde, metal ve yarıiletken arasındaki ara yüzde oluşan pozitif ve negatif yükler bir dipol tabakası oluşturur. Bu dipol tabakası, yük taşıyıcılarının (elektronların) her iki yönde de kolayca hareket etmesini sağlayarak omik kontakın düşük dirençli bir bağlantı oluşturmasını sağlar. Kısacası omik kontaklar, Fermi seviyelerinin dengelenmesi ve dipol tabakasının oluşması sayesinde akımın her iki yönde serbestçe akabildiği, elektronik devrelerde yaygın olarak kullanılan önemli bağlantı elemanlarıdır.

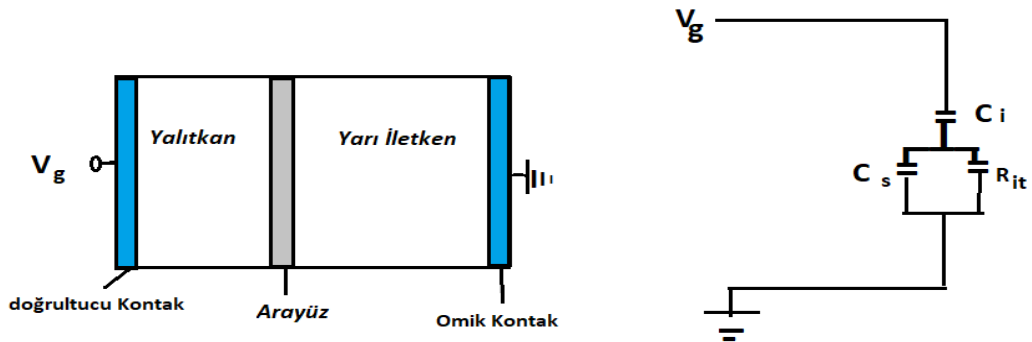


Şekil 2.2. $\Phi_m < \Phi_s$ olması durumunda metal/n-tipi yarıiletken omik kontaklarda, a) Metal/yarıiletken kontak yapılmadan önce, b) Metal/yarıiletken kontaktan yapıldıktan sonra, c) Gerilim değeri $V < 0$ olduğunda d) Gerilim değeri $V > 0$ olduğunda

Omik kontaklarda, elektronlar uygulanan voltajın yönünden engel olmadığı için metal ve yarıiletken arasında kolayca hareket edebilir. Metal tarafına pozitif (+V) voltaj uygulandığında, yarıiletkenden metale akan elektronlar herhangi bir engelle karşılaşmaz ve kolayca hareket edebilir. Yarıiletken tarafına pozitif (+V) voltaj uygulandığında, yarıiletken tarafında oluşan aşırı negatif yük potansiyel engelini azaltır. Bu şekilde elektronlar metalden yarıiletkene kolayca akabilir. Sonuç olarak, elektronlar omik kontaklarda her iki yönde de kolayca hareket edebilir. Bu özellik aynı zamanda omik kontaklara enjeksiyon kontakları denmesinin nedenidir. Çünkü yarıiletken pozitif ve metal negatif olduğunda, metaldeki elektronlar yarıiletken tarafına "enjekte edilmiş" olarak düşünülebilir. Kısacası, omik kontaklar elektronların her iki yönde de kolayca akabileceği düşük dirençli bağlantılar sağlar ve bu nedenle elektronik devrelerde yaygın olarak kullanılır.

2.2. Metal/Oksit/Yarıiletken (MOS) Eklemler

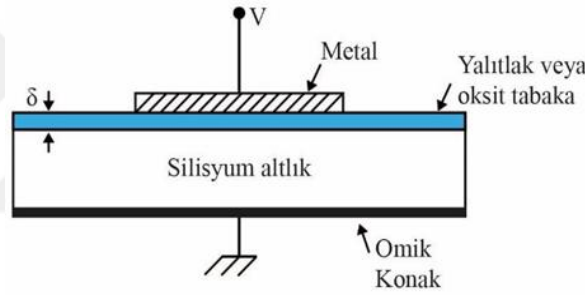
Metal/Oksit/Yarıiletken (MOS) eklemler iki iletken (yarıiletken ve metal) arasına konulan bir oksit tabaka ile oluşturulur. Bu yapılarda metal ve yarıiletken arasındaki oksit tabaka bazen kendiliğinden oluşurken, bazen de dışarıdan bir müdahale ile oluşturulur. MOS yapıları genellikle bir silisyum (Si) alt tabaka ve bu alt tabakaya temas eden bir arka omik kontakтан oluşur. Üzerine organik veya inorganik bir oksit malzeme eklenmiş olan bu yapı, bir metal kontak ile tamamlanır. MOS yapıları, yaygın olarak sayısal entegre devrelerde, özellikle alan etkili transistör (FET) üretiminde kullanılır. Oksit ve yarıiletken yüzeylerin temas noktalarında, yarıiletkenin serbest bağlarının tamamen doyurulması ve ideal oksit özelliklerine sahip bir malzemenin kullanılması, üretilen aygıtın verimliliği açısından büyük önem taşır.



Şekil 2.3. Metal/Oksit/Yarıiletken (MOS) eklemi ve eşdeğer devresi.

2.2.1. İdeal Metal/Oksit/Yarıiletken (Mos) Eklemler

Metal/oksit/yarıiletken (MOS) yapıları, adından da anlaşılacağı gibi, üç farklı katmanın birleşiminden oluşur ve bu katmanlar arasında iki ayrı arayüz bulunur: metal/oksit arayüzü ve oksit/yarıiletken arayüzü. İdeal bir MOS yapısında, elektrik yükleri yarıiletkenin içinde ve oksit tabakanın yakınındaki metal yüzeyinde birikir. Bu yapıya doğru akım (DC) voltajı uygulandığında, ideal olarak oksit tabakasından akım geçmez. Çünkü oksit tabakalar elektrik akımına karşı yüksek dirence sahiptir. Ancak pratikte, bazı durumlarda akım MOS yapılarının oksit tabakasından da geçebilir. Bu, oksit malzemenin ideal olmaması, yani belirli bir iletkenliğe sahip olması veya yapıdaki kusurlar nedeniyle meydana gelebilir. Ayrıca, yeterince yüksek bir voltaj uygulandığında, oksit tabakası delinerek akımın geçmesine izin verilebilir.



Şekil 2.4. Metal/oksit/yarıiletken (MOS) eklemi (Sze, 1981)

İdeal bir Metal/Oksit/Yarıiletken (MOS) ne gerilim uygulandığında yarıiletken yapılar üzerinde yük farklılığı oluşur. Normalde, yarıiletkenler metallerden daha fazla serbest ve hareketli yüke sahiptir. Ancak, uygulanan voltaj bu durumu etkiler. Voltaj uygulanmasıyla, yarıiletken bölgesindeki arayüz bantları bükülür ve uzay yükleri ortaya çıkar. Bu uzay yükleri, uygulanan voltajın büyüklüğüne bağlı olarak yarıiletken yüzeyinde birikir ve bu birikim termal dengeye ulaşılan kadar devam eder.

Yarıiletken bölgesindeki yükler, yük yoğunluğuna göre yoğun yük taşıyıcıları (elektronlar veya delikler) ve az yük taşıyıcıları olarak sınıflandırılır. Uygulanan voltajın yönüne ve büyüklüğüne bağlı olarak, bu yükler uzay yükü bölgesinde veya arayüz bölgesinde birikimler oluşturur. Bu yük birikimlerinin matematiksel ifadesi ve formülasyonu, MOS yapısının elektriksel davranışını anlamak ve modellemek için

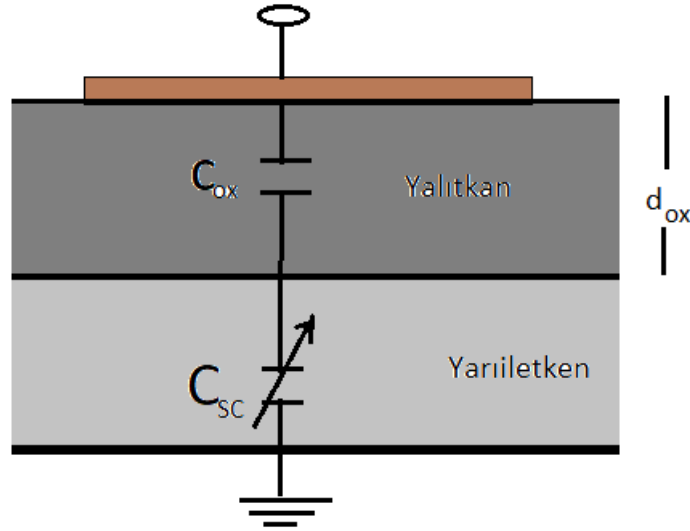
önemlidir. Bu formüller, yarıiletken fiziği prensipleri ve elektromanyetik teori kullanılarak türetilir;

$$V_G = V_{OX} + \psi_s \quad .(2.7)$$

V_G : Metal yüzeye tatbik edilen gerilim

V_{OX} : Oksit yüzeye üzerine düşen gerilim

Metal/Oksit/Yarıiletken (MOS) yapılarda, metal yüzey ile yarıiletken yüzey arasında, aralarındaki yalıtım tabakası nedeniyle bir kapasitans (C) oluşur. MOS kapasitansı adı verilen bu kapasitansın değeri, kullanılan oksit malzemenin özelliklerine ve oksit/yarıiletken arayüzünün yapısına bağlıdır. Oksit malzemenin dielektrik sabiti, kalınlığı ve arayüzdeki yük dağılımı gibi faktörler, MOS kapasitansını etkileyen önemli parametrelerdir. Bu kapasitans, MOS yapıların elektriksel davranışını ve performansını belirleyen temel bir özelliktir. Bir MOS yapının kapasitans gösterimi Şekil 2.5'teki gibidir.



Şekil 2.5. Bir metal/oksit/yarıiletken (MOS) yapının kapasitans gösterimi, (d_{ox} : oksit tabakanın kalınlığı, v : metal yüzeye uygulanan gerilim)

Bir metal/oksit/yarıiletken (MOS) değerlik kapasitans eşitliği aşağıdaki formül ile gösterilebilir;

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_{ox}} \quad (2.8)$$

C : Bir MOS eklem için kapasitans

C_{SC} : Uzay yükü kapasitansı

C_{OX} : Oksit tabaka kapasitansı

MOS eklemının kapasitansını hesaplarırken hem yalıtım katmanının hem de uzay kapasitesi katlanabilir kapasitanslarının mevcut olduğunu hesaba katmalıyız. Bu iki kapasitansla seri olarak bağlandığınız için toplam kapasitans bu iki değerin seri eşdeğeri olacaktır. İdeal bir MOS eklem aşağıdaki gibi özellikleri barındırmalıdır;

1. Bir MOS eklemi ideal olması, denge durumunda yarıiletken iş fonksiyonu (Φ_s) ve metal iş fonksiyonu (Φ_m) arasındaki fark sıfır olmalıdır.

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(x + \frac{E_g}{2q} - \phi_B \right) = 0 \quad \text{n-tipi} \quad (2.8)$$

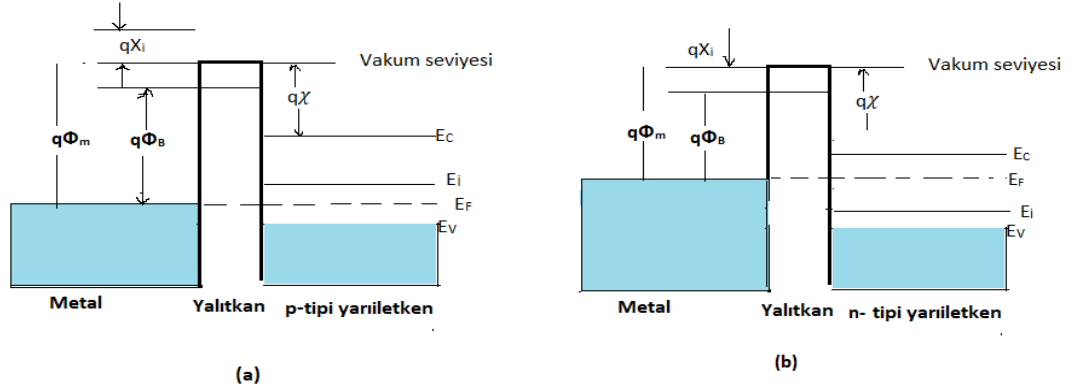
$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(x + \frac{E_g}{2q} + \phi_B \right) = 0 \quad \text{p-tipi} \quad (2.9)$$

Burada verilen $\phi_{ms}=0$ ve ϕ_B saf yarıiletken için Fermi enerji seviyesi ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkını ifade etmektedir.

2. MOS yapılarında, metal ile yarıiletken arasındaki oksit tabaka geniş bir bant aralığına (δ) sahiptir ve bu da onu mükemmel bir dielektrik yapar. İdeal bir MOS yapısında, bu yalıtkan bölgede ve oksit/yarıiletken bağlantısında tuzak veya yük yoktur. Yani oksit tabaka mükemmel bir yalıtkan gibi davranır ve dağıtımda yük değişimi veya enerji durumu oluşmaz. Ancak, gerçek zamanlı MOS modüllerinde durum biraz farklıdır. Enerji seviyeleri genellikle yarıiletken/oksit arayüzünde "arayüz özellikleri" olarak bulunur. Bu durumlarda, ideal MOS yapısından sapmalar arayüz kusurları, yalıtkan kusurları, kusurlar veya direnç kusurlarından kaynaklanır. Bu nedenle, gerçek MOS diyotları ideal modellerden farklıdır ve bu dağıtım durumlarının etkisi dikkate alınır.
3. Oksit olan bölgede genişliği (δ) oldukça çok büyüktür ve bundan dolayı iletkenlik bandındaki yük akışı yoğunluğu yok sayılabilir.

4. DC gerilimi altında oksit bölgede yük akışı olmaz ve bu alanda direnç sonsuz gibi davranır.

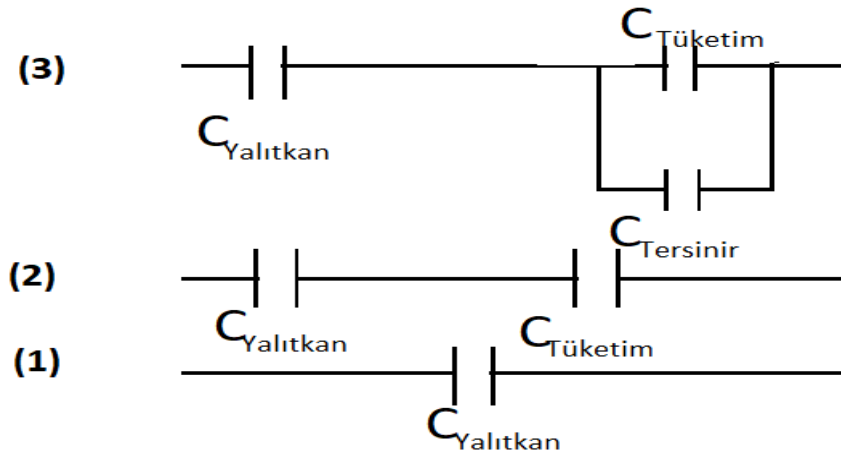
5. Gerilimin olduğu anlarda MOS yapılarındaki yükler yalıtkan ile bitişiktir ve yarıiletkenler ile metal yüzey yükler aynı miktarda ve zıt yüklüdür.



Şekil 2.6. Denge durumunda olan ideal bir MOS yapısının enerji-bant diyagramı; (a) p-tipi yarıiletken, (b) n-tipi yarıiletken

İdeal bir MOS eklemde bulunan diyot ele alınırsa MOS diyotta üç farklı eşdeğer devrenin olduğu görülecektir. Bunlar;

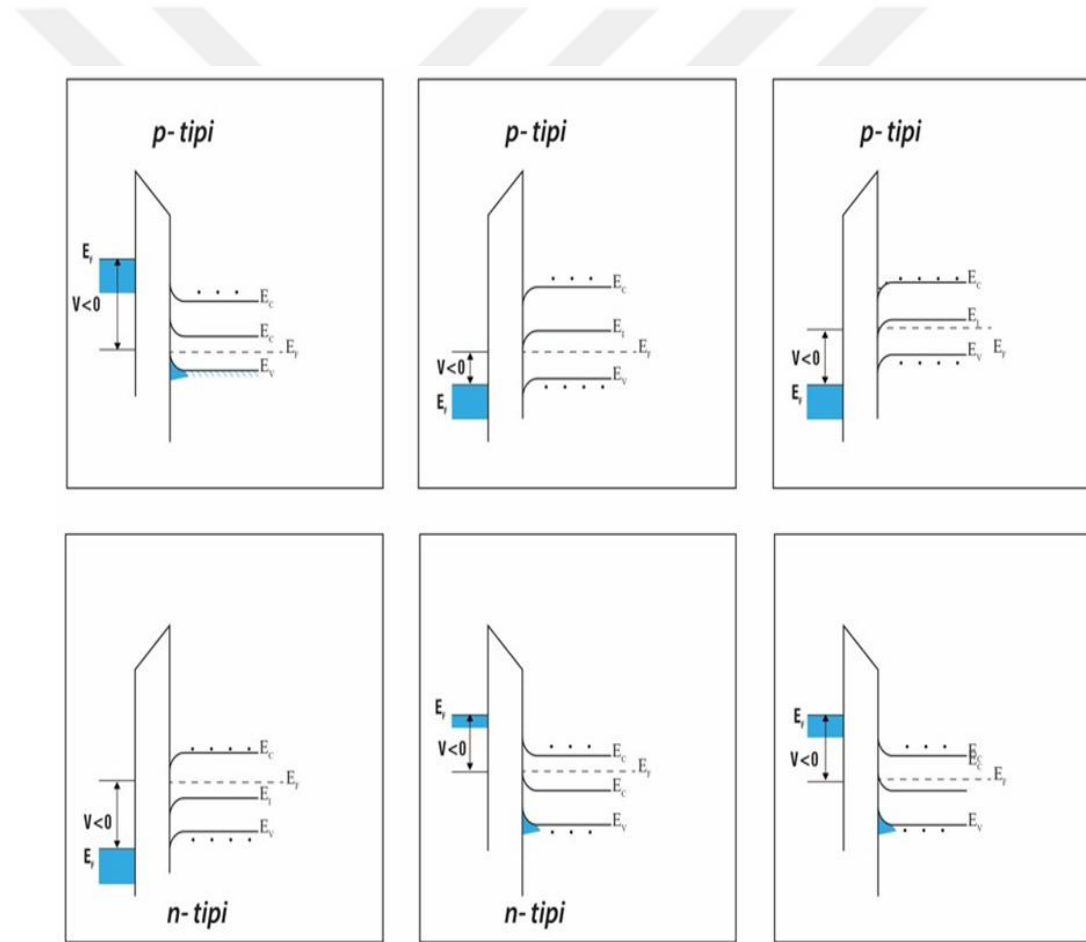
- 1) Accumulation (Yığılma)
- 2) Depletion (Tükenim)
- 3) Inversion (Tersinim)



Şekil 2.7. İdeal MOS eklemının üç değişik eşdeğer devresi (1) Yığılma, (2) Tükenim, (3) Tersinim

2.2.1.1. Yığılma

P-tipi yarıiletken MOS yapılarında yoğun yük taşıyıcıları oluşur. Metal/okdit/p-tipi yarıiletken yapının (MOS) metal elektrodu ters yönde bağlandığında; $V_G < 0$ 'a sıfırlandığında, bu voltajın yarattığı elektrik alanı bu kristalleri yarıiletken arayüz yüzeyine doğru çekecektir. İdeal yapılarda yarıiletkendeki Fermi enerji düzeyi yük kaybı olmadığı sürece değişmez. Enerji tüketimi yük taşıyıcı yoğunluğuna ($E_F - E_V$) üstel olarak bağlıdır ve bu nedenle bantta kalmak, yarıiletken parçacıkların altta birikmesine neden olur. Bu aynı zamanda iletim bandını yukarı doğru bükür. Bu duruma “birikim” denir. Aglomerasyon nedeniyle arayüzde biriken yük, yüzey dağılımına ve $C_{SC} \rightarrow \infty$ 'ye karşılık gelir ve kapasite genellikle $C \rightarrow C_{OX}$ 'tur.



Şekil 2.8. Arayüz katmanlarının yüklenmesi altında ideal bir MOS yapısının enerji bandı diyagramları (son şekil n tipi); (a) yığılma, (b) tükenim, (c) tersinim (Sze, 1981).

2.2.1.2. Tükenim

P-tipi yarıiletken MOS yapılarda, metal elektrot tarafına küçük bir pozitif voltaj ($V_G > 0$) uygulandığında oksit bölgede bir elektrik alanı oluşur ve bu elektrik alanı yarıiletken arayüzündeki boşlukların yüzeyden uzaklaşmasına neden olur. Bunun sonucunda yarıiletken yüzeyindeki delik yoğunluğu yarıiletken içindeki delik yoğunluğundan daha küçük olmaya başlar. Bu nedenle bantlar aşağı doğru bükülür. Elektronlar yarıiletken yüzey tarafındaki iletim bandında toplanır. Yarıiletken yüzeyine voltaj uygulandığında tükenme bölgesi genişler ve bu genişliğe W ile gösterilir. Bu bölgede boşluklar azalır ve bu bölgeye tükenme bölgesi denir. Bu olaya tükenme olayı denir. Tükenme, tükenme bölgesindeki boşlukların küçülmesi ve yarıiletkenin özelliklerinin elektrik alanının etkisi altında değişmesi sürecidir.

2.2.1.3. Tersinim

P-tipi yarıiletkenlere sahip MOS yapılarında, metal elektroda büyük bir pozitif voltaj uygulandığında ($V_G \gg 0$) bantlar aşağı doğru bükülmeye başlar. Saf haldeki (E_1) enerji seviyesi Fermi enerji seviyesinin altına düşer ve böylece yarıiletken yüzeyindeki azınlık taşıyıcıları (elektronlar) artar. Böylece elektron yoğunluğu delik yoğunluğundan daha büyük hale gelir ve p-tipi yarıiletken yüzey durum değiştirerek n-tipi bir yarıiletken gibi davranmaya başlar. Bu olaya inversiyon yani tersinim adı verilmektedir ve enerji bandının durumu Şekil 2.8'de gösterilmektedir. MOS kapasitansının değerinin belirlenmesinde elektron yoğunluğunun uygulanan voltajın AC sinyalini takip edebilme yeteneği çok önemlidir. Elektron yoğunluğu AC sinyalini düşük frekanslarda takip edebilir. Buna göre gerilim arttıkça MOS kapasitansı izolasyon kapasitans değerine ulaşır. Ara frekans değerlerinde elektron yoğunluğu AC sinyalini daha yavaş takip eder ve dolayısıyla frekans değerine bağlı ara frekans eğrileri ortaya çıkar. Elektron yoğunluğu yüksek frekanslarda AC sinyalini takip edemez. Sabit yük, uzay yükü gibi davranır ve kapasite minimum değerinde (C_{min}) kalır. Gerilim yüksek frekansla aniden değiştirildiğinde, azınlık taşıyıcıların rekombinasyon hızına bağlı olarak daha sonra ters yük birikimi meydana gelir. Dolayısıyla bant eğrisi C_{min} değerinin altında değerler almaya başlar.

Ters dönme, p-tipi bir yarı iletken MOS yapısında metal elektrota pozitif bir voltaj uygulandığında yarı iletken yüzeyinde elektronların birikmesidir ve bu nedenle bu yüzey artık n-tipi davranış sergiler. Bu olayla birlikte yarıiletken yüzeyin elektriksel özellikleri büyük ölçüde değişir ve bu değişiklik elde edilecek cihazın veya cihazın iletkenlik özelliklerini belirler.

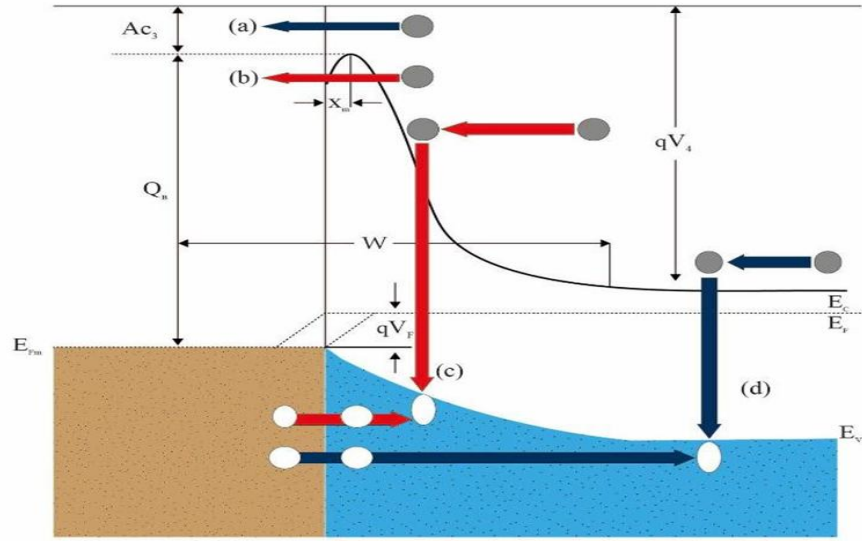
2.3. Metal/Yarıiletken (MS) ve Metal/Oksit/Yarıiletken (MOS) Eklemlerde Akım İletim Mekanizmaları

MS ve MOS yapılarında:

- Seri Direnç (R_s)
- Ara yüzdeki Durumları Yoğunluğu (N_{ss})
- Katkı Atomların Yoğunluğu (N_A ve N_D)
- Uygulanan Gerilim (V)
- Kullanılan yarıiletken malzeme
- Sıcaklık

Yukarıda verilen faktörler akım aktarılmasında rol oynayan etkin etkenlerdir. MS ve MOS yapılarda genellikle akım-iletim mekanizmaları şekilde verilenlere göre sıralanabilir (Sharma, 1984; Rhoderick ve Williams, 1988; Sze ve Kwok, 2007)

1. TE (Termiyonik Emisyon Kuramı)
- 2.DT (Difüzyon Kuramı)
- 3.TED (Termiyonik Emisyon-Difüzyon Kuramı)
- 4.Uzay-Yük Alan Bölgesi Rekombinasyonu
- 5.Kuantum Mekaniksel Dayalı Tünelleme
6. T_o (Etkili Akım İletimi)



Şekil 2.9. Metal/n-tipi yarıiletken kontak eklemlerindeki dört esas akım transfer mekanizması olan; a) termiyonik emisyon, b) tünelleme, c) taşıyıcı üretimi ve birleşimi, d) azınlık taşıyıcı enjeksiyonu

2.3.1. Difüzyon kuramı

Difüzyon akımı veya difüzyon, yüklerin daha yüksek konsantrasyonlu bir bölgeden daha düşük konsantrasyonlu bir bölgeye hareketini ifade eder. Schottky'nin difüzyon teorisine göre hipotez, potansiyel bariyerin termal enerjiden ($k_B T/q$) daha yüksek olduğunu ve elektronlar arasındaki çarpışmaların dikkate alınmadığını belirtir. Ek olarak, taşıyıcının $x=0$ ve $x=w$ 'deki konsantrasyonları termal dengededir ve yarı iletkendeki safsızlık konsantrasyonu dejenere bir durumda değildir. Bu hipotez, bölgesel alan ve yoğunluk farkından etkilendiğinden, tükenme bölgesindeki akının akı yoğunluk denklemi ile tanımlanabileceğini öne sürmektedir. Bu denklem, n-tipi yarıiletkenler için şu şekildedir:

$$J_x = J_n = q \left[n(x) \mu E_{(x)} + Dn \frac{\partial n}{\partial x} \right] = qn \left[\left(\frac{-9n(x)}{k_B T} \right) \left(\frac{\partial v(x)}{\partial x} \right) + \frac{\partial n}{\partial x} \right] \quad (2.10)$$

Bu denklemde $n(x)$ elektron yoğunluğunu, μ elektron hareketliliğini, dn elektron difüzyon sabitini ve $e(x)$ konuma bağlı elektrik alanını temsil eder. Schottky'nin yayılma hipotezine göre akım yoğunluğu şu şekilde temsil edilir:

$$J_x = J_{SD} \left[\exp \left(\frac{qV}{k_B T} \right) - 1 \right] \quad (2.11)$$

Buradaki J_{SD} doyumluk akımıdır ve şu şekilde ifade edilir:

$$J_{SD} = \left(\frac{q^2 N_C D n}{k_B T} \right) \left[\frac{2q(V_d - V) N_D}{\epsilon_s} \right]^{1/2} \exp \left(\frac{-q\phi_B}{k_B T} \right) \quad (2.12)$$

Bu denklemde N_C , iletkenlik bandındaki birim hacim başına düşen izinli enerji seviyelerinin yoğunluğunu; V_d , difüzyon potansiyelini; N_D , verici katkı atomlarının yoğunluğunu; ϵ_s ise yarıiletkenin dielektrik geçirgenliğini temsil eder.

2.3.2. Termiyonik emisyon kuramı (TE).

Yeterli ısı enerjisini emen bir yüzeyden yük taşıyıcılarının (elektronlar veya delikler) salınmasına termiyonik emisyon denir. Metal-yarıiletken kontaklar (MS) veya Schottky diyotlar için termiyonik emisyon teorisi, yeterli termal enerjiye sahip yük taşıyıcılarının engelden geçerek yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçmesini engelleyebilir. Bu olguya metal/p-tipi yarıiletken kontaklardaki çok sayıda delik ve metal/n-tipi yarıiletken kontaklardaki çok sayıda elektron neden olur. TE teorisinin var olabilmesi için Maxwell-Boltzmann yaklaşımının uygulanabilir olması ve termal dengenin ortaya çıkması gerekir. Burada termal enerji kaynağını ($k_B T/q$) kullanmanız gerekir. Başka bir deyişle, taşıyıcıların ortalama serbest yolunun tükenebilirlikten daha küçük olduğu varsayılmaktadır.

Toplanan akım yoğunluğu (J), yarıiletken maddeden metal maddeye doğru akan akım yoğunluğu ($J_s \rightarrow m$) ve metalde olan akımın yarıiletkene doğru olan akım yoğunluğunun toplamına eşittir. Yarıiletkenden metale doğru akan akım yoğunluğu, x yönünde hareket eden ve potansiyel engelini aşacak kadar enerjiye sahip elektronların sayısı ve hızlarının bir fonksiyonu şu şekilde ifade edilebilir:

$$J_{s \rightarrow m} = q \int_{E_F + q\phi_B}^{\infty} V_x dn \quad (2.13)$$

Metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda, elektronun yarıiletkenden metale dağıtılması işlemi elektronların enerji seviyeleri ve hızları bu verilerin bozulmasının belirlenmesinde önemlidir.

$E_F + q$: Elektronların termiyonik emisyon yoluyla metalden yarı iletkene geçmesi için gereken minimum enerji miktarını ifade eder.

V_x : x yönündeki elektronları taşıyıcı hızını temsil eder.

E_F : Bu yarı iletkenin Fermi enerji seviyesidir.

dn : Esnek bir enerji aralığındaki elektron yoğunluğudur.

Φ_B : Metal ile yarı iletken arasındaki potansiyel koruma alanıdır (Schottky bariyeri).

Bu etki dikkate alınarak yarı iletken den metale akan elektronların akım yoğunluğu bir ifade kullanılarak hesaplanabilir:

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[-\frac{q\phi_B}{k_B T} \right] \exp \left(\frac{qV}{k_B T} \right) \quad (2.14)$$

Bu denklemde yer alan sembollerin anlamları şöyledir: m^* : Taşıyıcının etkin kütlesi. Yani, elektronun kristal yapı içindeki hareketini etkileyen kütle. h : Planck sabiti. Kuantum mekaniğinde enerji ve frekans arasındaki ilişkiyi belirleyen bir sabit. k_B (veya k) : Boltzmann sabiti. Parçacıkların termal enerjisi ile sıcaklık arasındaki ilişkiyi belirleyen bir sabit. A^* : Etkin Richardson sabiti. Malzeme özelliklerine bağlı bir sabit ve köşeli parantez önündeki ifade ile verilir. Bu parametreler, yarı iletken malzemelerin özelliklerini ve elektronların davranışını anlamak için kullanılan temel fiziksel sabitlerdir. Bu ifade düzenlenirse şu şekilde yazılabilir

$$J_{s \rightarrow m} = A^* T^2 \exp \left[-\frac{q\phi_B}{k_B T} \right] \exp \left(\frac{qV}{k_B T} \right) \quad (2.15)$$

Metalden yarıiletkene elektron akışı, aradaki engel yüksekliğinden etkilenir. Ancak bu engel yüksekliği, uygulanan dış gerilimden bağımsızdır. Dolayısıyla, metalden yarıiletkene akan akım miktarı, dışarıdan uygulanan gerilime bağlı olarak değişmez. Denge durumunda, yani dışarıdan bir gerilim uygulanmadığında ($V=0$), metalden yarıiletkene akan akım, yarıiletken den metale akan akım ile aynıdır. Bu denge durumu, sistemin kararlı halini temsil eder. Bu prensipler göz önüne alındığında, metalden yarıiletkene doğru akan akımı matematiksel bir ifade ile hesaplayabiliriz.

$$J_s \rightarrow m = -A^* T^2 \exp \left[-\frac{q\phi_B}{k_B T} \right] \quad (2.16)$$

Sonuç, her iki yöndeki (yarıiletkeniden metale ve metalden yarıiletkene) toplam akım yoğunluğu ifadesidir:

$$j_n = \left(A^* T^2 \exp \left[\frac{-q\phi_B}{k_B T} \right] \right) \left(\exp \left(\frac{qV}{k_B T} \right) - 1 \right) \quad (2.17)$$

Burada, parantez içindeki ifade, doyma akım yoğunluğudur (J_0).

2.3.3. Bariyer boyunca tünelleme

Metal-yarıiletken (MS) ve metal/oksit/yarıiletken (MOS) yapılarında, yük taşıyıcıları (elektronlar ve delikler) akım iletim mekanizmalarından termiyonik emisyonla potansiyel engelini aşabilir. Ancak bazı durumlarda, yük taşıyıcıları yeterli enerjiye sahip olmasalar bile kuantum mekanik tünelleme yoluyla engeli "geçebilir". Bu fenomen, kuantum mekaniğinin uygulandığı atom altı boyutlarda meydana gelir. Tünelleme mekanizmasının meydana gelmesi için belirli koşulların karşılanması gerekir: Ağır katkılı yarıiletkenlerde ön besleme durumu: Yeterince ağır katkılı yarıiletkenlerde ($N > 10^{18} \text{cm}^{-3}$) ve düşük sıcaklıklarda, tünelleme ön besleme durumunda meydana gelir. Ağır katkılama, yarıiletkenin tükenme bölgesini inceltir ve yük taşıyıcıları, az termal enerjiyle bile engelin ince kısmından tünelleme yapabilir. Fermi enerji seviyesine ulaşan elektronlar, düşük sıcaklıklarda tünelleme yoluyla yarıiletkeniden metale hareket eder. Bu, ileri beslemedeki akım yoğunluğunu artırır ve alan emisyonu (AE) olarak adlandırılır. Zayıf katkılı yarıiletkenlerde ön besleme durumu: Zayıf katkılı yarıiletkenlerde ($N < 10^{18} \text{cm}^{-3}$) ve düşük sıcaklıklarda, ön besleme sırasında tünelleme meydana gelir. Sıcaklık arttıkça, yük taşıyıcılarının enerjisi artar ve Fermi seviyesinin üzerine çıkarlar. Bu durumda, elektronların engelden geçme olasılığı artar ve ön beslemedeki akım yoğunluğu artmaya devam eder. Bu olguya termiyonik alan emisyonu (TAE) denir. Sıcaklık artmaya devam ettikçe, taşıyıcılar termiyonik emisyon yoluyla tünelleme yapmadan engeli aşmak için enerjiye sahiptir. Yeterince küçük ve tek yönlü bir önbesleme voltajına sahip termiyonik alan emisyonu için, akım-voltaj ilişkisi aşağıdaki denklemle verilir:

$$I = I_0 \exp \left(\frac{qV}{E_0} \right) \left[1 - \exp \left(- \frac{qV}{k_B T} \right) \right] \quad (2.18)$$

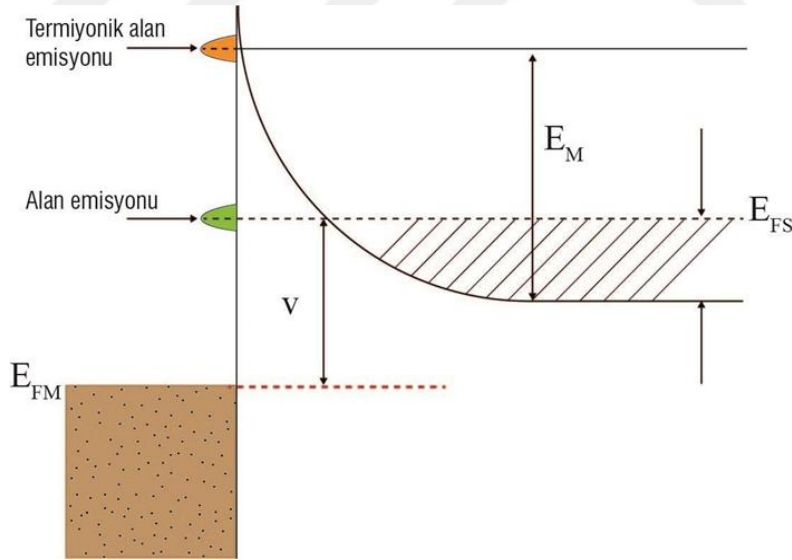
Burada E_0 ve E_{00} sırasıyla şu şekilde ifade edilir:

$$E_0 = E_{00} \cot h \left(\frac{E_{00}}{k_B T} \right) \quad (2.19)$$

ve

$$E_{00} = \frac{9h}{2\pi} \left(\frac{N_D}{m^* \varepsilon_0} \right)^{1/2} \quad (2.20)$$

E_{00} , karakteristik tünelleme enerjisi olarak adlandırılır ve tünelleme olayında önemli bir parametredir. Ayrıca, $E_{00} \frac{k_B T}{q}$ oranı, TE, TAE ve AE mekanizmalarını karşılaştırmak ve hangi mekanizmanın daha baskın olduğunu belirlemek için önemli bir kriterdir. Düşük sıcaklıklarda ve güçlü katkılama durumunda, E_{00} , $k_B T/q$ ile karşılaştırılabilir hale gelir ($E_0 \approx E_{00}$). Bu durumda, $\ln I-V$ grafiğinin eğimi yaklaşık olarak sabittir ve sıcaklıktan etkisinden bağımsızdır. Alan emisyonu (AE) baskın hale gelir. Yüksek sıcaklıklarda ise $E_0 \ll \frac{k_B T}{q}$ olur ve bu durumda $E_0 = \frac{k_B T}{q}$ olur. $\ln I-V$ grafiğinin eğimi $\frac{q}{k_B T}$ 'ye eşit olur ve termiyonik emisyon (TE) baskın hale gelir.



Şekil 2.10. Alan Emisyonu Bant Diyagramı ve İleri Beslem Termiyonik Alan Emisyonu (ξ taralı alan bölgesi negatif olduğundan aşırı katkılanmış yarı iletken bölgesi)

Orta sıcaklıklarda ise $\ln I-V$ grafiğinin eğimi $\frac{q}{nk_B T}$ olur. Tünelleme idealite faktörünün ise şu şekilde ifade edilir:

$$n = \frac{E_{00}}{k_B T} \cot h \left(\frac{E_{00}}{k_B T} \right) \quad (2.21)$$

Eğer $E_{00} \sim \frac{k_B T}{q}$ ise, TAE akımına katkı olabilir ve TAE akım artışı maksimum olduğunda E_m enerjisi şu şekilde ifade edilir:

$$E_m = \frac{qV_d}{\left(\cot h \left(\frac{E_{00}}{k_B T} \right) \right)^2} \quad (2.22)$$

TAE, oda sıcaklığında (300 K) sadece $N > 10^{17} \text{cm}^{-3}$ olduğunda etkin olur. Daha düşük taşıyıcı yoğunluklarında TAE ihmal edilebilir. Geniş bir sıcaklık aralığında yapılan ölçümler, M/S arayüzeyindeki engelin şekline özgü daha kesin ve detaylı bilgiler sağlayabilir.

2.4. İdealite Faktörü

Diyot ve yarıiletken cihazların davranışının ideal bir cihazdan ne kadar farklı olduğunu gösteren bir ölçü vardır ve buna "ideallik faktörü" denir. Bu faktörün değeri 1'e yaklaştıkça cihazın davranışı ideale yaklaşır. 1'den uzaklaştıkça idealden sapma artar. İdeallik faktörünü etkileyen etmenler arasında cihazın yapısındaki arayüzler önemli rol oynamaktadır. Özellikle arayüzler arasında oluşan yalıtım bölgesinin kalınlığı (δ) ve bu arayüzlerdeki kusurların yoğunluğunu ifade eden arayüzey durumlarının yoğunluğu (N_{ss}) belirleyen temel faktörlerdir. İdeallik faktörü (Card ve Rhoderick, 1971; Card, 1976);

$$n = 1 + \frac{\left(\frac{\delta}{\epsilon_i} \right) \left(\frac{\epsilon_s}{W_d + qN_{sb}} \right)}{1 + \left(\frac{\delta}{\epsilon_i} \right)^1 N_{sa}} \quad (2.23)$$

n : İdealite Faktörü

δ : Arayüzler Arasında Oluşan Yalıtım Bölgesinin Kalınlığı

ϵ_i : Yalıtım Tabakasının Geçirgenliği

ϵ_s : Yarı İletkenin Geçirgenliği

N_{sa} : Metalle Denge Halindeki Durumların Arayüz Yoğunluğu

N_{sb} : Yarı İletkenle Denge Halindeki Durumların Yoğunluğu

W_d : Tükenme Bölgesinin Genişliği

Bu eşitlik yara üzey durumlarının yoğunluk miktarına bağılı olarak üç farklı gösterimi vardır:

- 1) Ara yüzey durum yoğunluğu beklenen değerden küçük olursa;

$$n = 1 + \frac{\delta \varepsilon_s}{w_d \varepsilon_s} \quad (2.24)$$

- 2) Arayüz durumlarının yoğunluğunun metal yüzey ile dengede olması durumunda;

$$n = 1 + \frac{\delta \varepsilon_s}{W_d(\varepsilon_i + \delta_d N_{sa})} \quad (2.25)$$

olur.

- 3) Arayüz durum yoğunluğu yarı iletken yüzey ile dengede olduğunda;

$$n = 1 + \left(\frac{\delta}{\varepsilon_i} \right) \left(\frac{\varepsilon_s}{w_d + q N_{sb}} \right) \quad (2.26)$$

olur.

2.4.1. İdeal durumlardan sapma nedenleri

2.4.1.1. Seri direnç etkisi

Seri direncin etkisi ideal durumlardan sapmaların nedenlerinden biridir. MS ve MOS yapıların elektriksel özelliklerinin hesaplanmasında sapma sebepleri;

- 1) Kontakten gelen iletken tel
- 2) Silisyum yüzeyle temas halindeki omik temas
- 3) Kirli film tabakası veya yabancı cisimler, toz
- 4) Omik direnç

5) Doğrultucunun teması altında Si katmanına homojen olmayan katkı dağılımıdır. İdeal durumdan sapmaya neden olan direncin etkisi çeşitli yöntemlerle azaltılabilir. En çok kullanılan yöntemlerden biri de “alliage” adı verilen yöntemdir. Alaşımlama işlemi, iki veya daha fazla metalin bir araya getirilmesiyle bir alaşımların oluşturulmasıdır. Bu alaşımların ve metallerin özelliklerinin birleştirilmesiyle istenilen özelliklere sahip daha güçlü ve daha hafif malzemeler elde etmek mümkündür. Alaşımların seri direncini azaltmanın bir yolu kontağa ısı uygulandığında yarıiletken metal yüzeyde biriktirilir. Metalik yarıiletken yüzeyde biriktiği için arka kontağa daha iyi bir bağlantı elde edilir ve seri direncin etkisi azalır. Son yıllarda seri direncin etkisini hesaplamak için

çeşitli yöntemler sunulmuştur. Örneğin Norde'nin geliştirdiği yöntem bunlardan ilkidir (Norde, 1979). Norde yöntemine göre $n=1$ hali için seri direnç ve empedansın yüksekliği bulunabilir. Burada tanımlanan orijinal bir $F(V)$ fonksiyon kullanılır. R_s ve Φ_b değerlerinin sıcaklıkla değişmediği durumlarda bu yöntem uygulanabilir. Yani sıcaklık değeri için yalnızca bir tane akım-gerilim (I - V) eğrisi gereklidir.

Ancak ilerleyen yıllarda Sato ve Yasamura Norde yöntemini geliştirerek n , R_s ve Φ_b değerlerini ideal değerlerine göre hesapladılar. Faktörün birden büyük olduğu durumlarda, yani $1 < n < 2$ koşullarında hesaplamaların mümkün olduğunu gösterdiler (Sato ve Yasamura, 1986). Bohlin, Norde'nin yöntemini değiştirdi ve idealite faktörünün birden büyük olduğu, yani $1 < n < \delta$ olduğu durumlarda kullandı. Bunu belirli koşullar altında hesapladılar (Bohlin, 1986). Ancak bu yöntemin bazı parametrelerini belirlemek zorlaşmıştır. Cheung'lar ayrıca I - V diyagramı ile elde edilen fonksiyonlarla serileştirilir. Direnci hesaplamaların daha basit bir yolunu buldular (Cheung ve Cheung, 1986).

Schottky diyotlarının önemli parametrelerini belirleme yöntemlerinden biri de Cheung tarafından 1986 yılında önerilen bir yöntemdir. Bu yöntem diyotun DC-voltaj (I - V) karakteristiklerinin analizine dayanmaktadır. Metal-yarıiletken temas yapılarında akım iletimi genellikle termiyonik emisyon mekanizması yoluyla gerçekleşir. Bu mekanizmada metaldeki elektronlar yeterli enerjiye sahip olduklarında yarı iletkenin iletim bandına girer ve akım akışına katkıda bulunurlar. Diyotun aktif alanı A ile gösterilirse ve bu alandan geçen akım yoğunluğu J ise diyottan geçen toplam akım I şu şekilde ifade edilebilir:

$$I = A * J = \left[AA^* T \exp\left(\frac{-e\phi_{bn}}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.27)$$

Bu hesaplamaya göre $eV_a \gg kT$ ise 1 değeri ihmal edilir. Verilen gerilim tümü arınma bölgesine düşmez ve bundan dolayı sapmalar meydana gelir. Bu sapma farkı idealite faktörünü (n) hesaplanır. Akım denklemi değeri;

$$I = A * J = \left[AA^* T \exp\left(\frac{-e\phi_{bn}}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV_n}{nkT}\right) \right] \quad (2.28)$$

eşitliği elde edilir. Verilen gerilim (V_a)'dan IR_s değerinden gerilim seri direnç azalma olur ve $V_a \rightarrow V_a - IR_s$;

$$I = A * J = \left[AA^*T \exp\left(\frac{-e\phi_{bn}}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{e(V_a - IR_s)}{nkT}\right) \right] \quad (2.29)$$

ifadesi elde edilir. Buna göre;

$$V = \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) + n\phi_b + IR_s \quad (2.30)$$

elde edilir. MOS yapıya uygulanan gerilimin tamamının yapı üzerinde etkili olmamasından kaynaklanan ideal durumla arasındaki fark, aşağıdaki şekilde de hesaplanabilir;

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.31)$$

Eşit olma durumu seri direnç etkisi eklenmesi ile yeniden akım bulunur.

IR_s : uygulanan gerilimin direnç etkisi;

$$n = I_0 \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) \quad (2.32)$$

Eşitliğin logaritması alındığında eşitlik yeniden işleme alınırsa;

$$V = \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) + n\phi_b + IR_s \quad (2.33)$$

bu denklemde görüldüğü şekilde aynı voltaj denklemi tekrar elde edilebilir. Bu denklemde verilen $\ln I$ 'ye göre difransiyeli alınır.

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (2.34)$$

şeklinde ifade gösterilir. Gerilim yüksekliği;

$$\ln(I) = \ln(AA^*T) - \frac{e\phi_b}{kT} + \frac{eV}{nkT} - \frac{eIR_s}{nkT} \quad (2.35)$$

verilen denklemi bir $H(I)$ fonksiyonu tanımlanır. Böylece; $H(I)=n\phi_b+IR_s$ fonksiyonu elde edilmiş olur. Bu denklem kullanılarak $H(I)-I$ grafiği çizildiğinde direnç, ortaya çıkan doğrusal eğrinin eğimidir ve doğrunun düşey eksenini kestiği nokta ise;

$$\frac{d(V)}{d(\ln I)} = \frac{nKT}{q} + IR_s \quad (2.36)$$

Denklemin yerine idealite faktörü değerini denklem yerine yazılmasıyla engel potansiyeli bulunur.

Norde, geliştirdiği bir yöntemi kullanarak gerilim ve engel yüksekliği değerlerini hesaplamamanın bir yolunu buldu (Norde, 1979). Norde'ye göre bu yöntem, $n=1$ durumunda $F(V)$ fonksiyonunu açıklamaktadır. Yani bu fonksiyon seri direnç değerini belirler. Ayrıca bu yöntem R_s (seri direnç) ve J_b 'nin (Schottky bariyer yüksekliğinin akım yoğunluğu fonksiyonu) sıcaklıktan etkilenmediği ve değişmediği durumlarda da geçerlidir. Herhangi bir sıcaklıkta oluşturulan $I-V$ eğrisi gerekli hesaplamalar için kullanılabilir. Yasamura ve Sato (1986), pozitif katsayı 1'den büyük ($1 < n < 2$) olduğunda Norde, R_s ve J_b 'nin hesaplanabilirliğini göstererek kendi yöntemini geliştirmiştir. Schottky diyotlarının akım-gerilim özelliklerini tanımlayan denklem ise şöyledir:

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

eşitliği ile Shottky diyot parametrelerinden seri direnç verilerinden engel yükseklikleri elde edilir. Bu denklem yeniden hazırlanırsa;

$$F(V) = \phi_b + IR_s - \frac{V}{2} \quad (2.38)$$

denkliği elde edilir. İdeal koşullarda, $R_s=0$ olduğunda, eğimi (-1/2) olan doğrusal bir grafik elde edilir. Bu doğrunun $F(V)$ eksenini kestiği nokta, ϕ_b değerini verir.

$$F(V) = \frac{V}{2} - (\beta^{-1}) \ln \left(\frac{1}{AA^*T^2} \right) \quad (2.39)$$

Denkliğin sol tarafı $\frac{e}{kT} = \beta$ dönüşümü aktarıldığında;

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

olur. Doğru besleme voltajı doğruysa $\ln(I)$ - V grafiği aralıktaki $kT/e < V < IR_S$ besleme voltajlarını gösterecektir. (Ayyıldız ve ark. 1996) R_S gereğinden büyükse mevcut I_0 'a ulaşmak zor olacaktır. Norde bu R_S etkisini belirlemek için $F(V)$ fonksiyonunu önerdi.

$$F(V) = \frac{V}{2} - \left(\frac{1}{\beta} \right) \ln \left(\frac{1}{AA*T^2} \right) \quad (2.41)$$

$F(V)$ fonksiyonunu elde etmek için, eşitlik ve Ohm yasası ($V=I*R$) kullanılmıştır.

$$\frac{dI}{dV_d} = \beta I \quad (2.42)$$

Bu eşitlik, yüksek voltaj değerlerinde grafik eğiminin $1/2$ 'ye yaklaştığını göstermekte böylece;

$$F(V) = \phi_b + IR_S + \frac{V}{2} \quad (2.43)$$

Eşitliği eşitliği buluruz. V 'ye göre bu eşitliğin diferansiyeli alındığında;

$$\frac{dF}{dV} = R_S \left(\frac{dI}{dS} \right) - \frac{1}{2} \quad (2.44)$$

Buradan;

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_d + R_S dI} \quad (2.45)$$

ve $V=IR_S+V_d$ eşitliği beraber çözüldüğünde;

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_d} \left[1 + R_S \left(\frac{dI}{dV_d} \right)^{-1} \right] \quad (2.46)$$

$n=1$ durumunda İdeal diyot ise;

$$I = AA^*T^2 \exp\left(\frac{e\phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV_d}{kT}\right) \right] \quad ve \quad \frac{dI}{dV_d} = \beta I \quad (2.47)$$

$$\frac{dF}{dV} = R_S \left(\frac{dI}{dV} \right) - \frac{1}{2} \quad (2.48)$$

Denklemleri yerine yazıldığında;

$$V_d(I_{min}) = V_{min} - I_{min} R_S$$

Veriyi elde edilmiş olunur. Akımın minimum değerini bulmak için, denklemin V'ye göre türevi alınarak sıfıra eşitlenir.

$$I_{min} = \frac{1}{\beta R_S} = \frac{KT}{eR_S} \quad ve \quad V_d = (I_{min}) = V_{min} - I_{min} R_S \quad (2.49)$$

Eşitliğe göre, öngörilimde $F(V)$ - V grafiğinde V_{min} noktasına karşılık gelen nokta $F(V)$ 'nin minimum olduğu noktadır. (I_{min}) değeri de bu noktadaki akım değeridir. $F(V)$ fonksiyonuna göre;

$$F(V_{min}) = \frac{V_{min}}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{I_{min}}{AA^*T^2}\right) \quad (2.50)$$

olur ve;

$$R_S = \frac{1}{\beta I_{min}} \quad (2.51)$$

olur.

$$\phi_b = F(V_{min}) + \frac{V_{min}}{2} - \frac{1}{\beta} \quad (2.52)$$

Seri direncin küçük olduğu durumlarda Norde fonksiyonu geçerli olur. Diyot parametrelerini ideal olmayan yapılarda hesaplama yöntemi Norde fonksiyonu değiştirilerek elde edilir (Bohlin, 1986). $F(V)$ fonksiyonu büyük bir α sayısı idealite faktöründen yeniden fonksiyon ile tanımlanmış olur.

$$F(V, \alpha) = \frac{V}{\alpha} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (2.53)$$

İdealiteden sapma seri direncin oluşturduğu etki ile olur. Bu neden ile idealite faktörü $1 < n < \alpha$ aralığında seçilir.

$$F(V, \alpha) = \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{n}\right)V + \phi_b + \frac{IR}{n} \quad (2.54)$$

Seri direncin olmadığı bir $F(V, \alpha)$ fonksiyonunda eğim $(n - \alpha/(\alpha n))$ değerindedir. Seri dirençli fonksiyonda, fonksiyonun minimum değeri

$$F(V, \alpha) = \frac{V}{\alpha} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{V}{R_S A A^* T^2} \right) \quad (2.55)$$

$1 < n < \alpha$ aralığında olur.

$$F(V, \alpha) = \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{n}\right)V + \phi_b + \frac{IR_S}{n} \quad (2.56)$$

Eğer bu eşitliğin V'ye göre türevini alıp gerekli matematiksel işlemleri uygularsak;

$$\frac{dF}{dV} = \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{n}\right) + \frac{R_S}{n} \left(\frac{dI}{dV}\right) \quad (2.57)$$

elde edilmiş olur. İdealden sapma R_S var ise olur ve TE teorisi;

$$I = A A^* T^2 \exp \left(\frac{e\phi_b}{kT} \right) \left[\exp \left(\frac{eV_d}{nkT} \right) \right] \quad (2.58)$$

Ve

$$\frac{dI}{dV_d} = \frac{\beta I}{n} \quad (2.59)$$

Bu şekilde, $V_d = V - IR_S$ denkleminin I 'ya göre türevi alınır;

$$\frac{dV}{dI} = \frac{dV}{dI} - R_S \quad (2.60)$$

şeklinde bulunmuş olur ve gerekli işlem dönüşümleri yapılır;

$$\frac{dV}{dI} = \frac{dV_d + R_S dI}{dI}, \quad \frac{dI}{dV} = \frac{dI/dV_d}{1 + R_S dI/dV_d} \quad (2.61)$$

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI/dV_d}{1 + R_S dI/dV_d}, \quad \frac{dI}{dV} = \frac{\beta I/n}{f + \beta I R_S/n} \quad (2.62)$$

Eşitlikler birlikte ele alındığında;

$$\frac{dF}{dV} = \frac{n - \alpha + \beta I R_S}{\alpha(n + \beta I R_S)} \quad (2.63)$$

elde edilir. $dF/dV=0$ eşitliğinde akım değeri minimum olur.

$$I_{min} = \frac{\alpha - n}{\beta R_S}, \quad V_d(I_{min}) = V_{min} - I_{min} R_S \quad (2.64)$$

Öngerilim durumunda, $F(V)$ - V grafiğinde $F(V)$ 'nin en düşük değeri V_{min} noktasında elde edilir. Bu noktaya karşılık gelen akım değeri de en düşük değer olan I_{min} 'dir.

$$F(V_{min}, \alpha) = \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{n}\right) V_{m_1 \cdot n} + \phi_b + \left(\frac{\alpha - n}{n}\right) \frac{1}{\beta} \quad (2.65)$$

$$\phi_b = F(v_{min}, \alpha) + \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{\alpha}\right) V_n - \left(\frac{\alpha - n}{n}\right) \frac{1}{\beta} \quad (2.66)$$

$$R_S = \frac{\alpha - n}{\beta I_{min}} \quad (2.67)$$

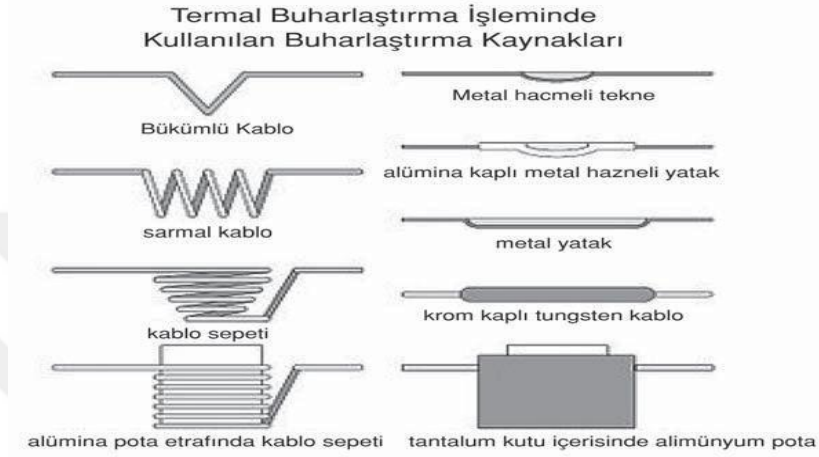
Şekilde verilen bağıntı seri direncin büyük olması ile diyot parametreleri eşitliği elde edilmiş olur.

2.5. İnce Film Elde Etme Yöntemleri:

2.5.1. Termal buharlaştırma yöntemi:

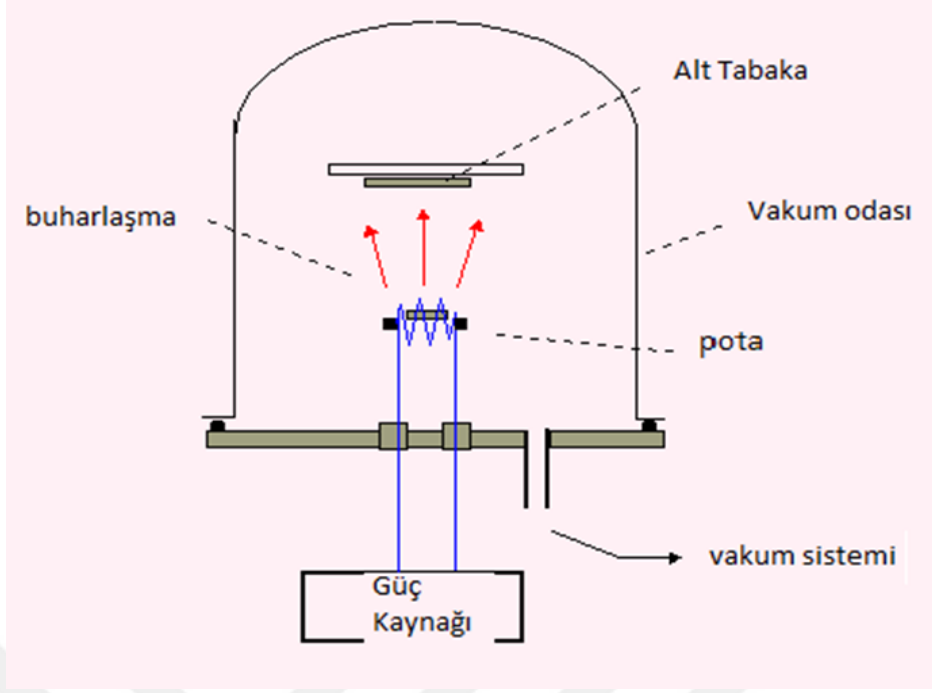
Termal buharlaştırma, ince film kaplama işlemlerinde kullanılan önemli bir yöntemdir. Bu yöntemde kaplanacak malzeme vakum ortamında ısıtılıp buharlaştırılarak altlık üzerinde ince bir film oluşturulur. Yöntemin adı “vakumlu kaplama” olarak da

bilinmektedir. İşlem, iki elektrot arasında bulunan bir direncin ısıtılmasıyla başlar. Bu direnç, yüksek ısıya dayanıklı ve erime noktası yüksek olan tungsten veya molibden gibi metallerden yapılmış bir pota içerir. Potaya kaplanacak bakır, alüminyum, altın, gümüş veya krom gibi metaller yerleştirilir. Sistem vakum (10^{-6} - 10^{-7} Torr) altına alındıktan sonra potadan yüksek akım geçirilerek ısıtılır. Pota içindeki metal, ısının etkisi altında buharlaşarak gazı dönüşür ve altlık üzerinde ince bir film oluşturacak şekilde çöker.



Şekil 2.11. Termal buharlaştırma işleminde kullanılan buharlaştırma kaynakları

Oluşturulan ince filmin homojenliği ve büyüme hızı doğrudan vakum ortamının kalitesine bağlıdır (Bouchenaki ve ark., 1991). Vakum ortamı ne kadar iyi olursa ince film o kadar homojen ve düzenli olacaktır. Yukarıdaki Şekil 2,11’de, vakum ortamında gerçekleştirilen bir buharlaştırma yönteminin şematik gösterimini sunmaktadır. Buharlaştırma işlemi, cam veya metalden yapılmış bir oda içerisinde, düşük basınç altında gerçekleştirilir.



Şekil 2.12. Yukarıda görülen şema, vakum ortamında gerçekleştirilen buharlaştırma yöntemini basitleştirilmiş bir şekilde göstermektedir.

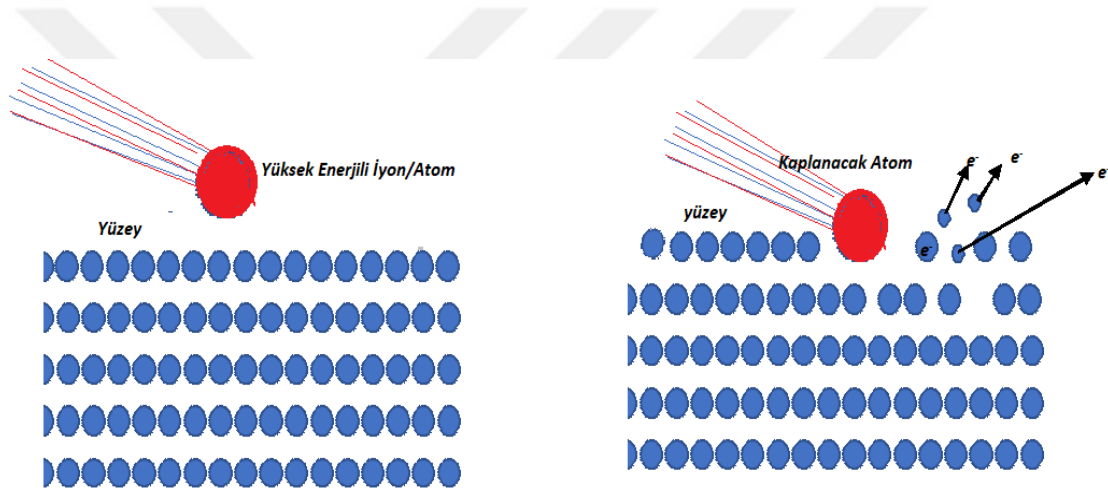


Şekil 2.13. Batman Üniversitesi Fizik Laboratuvarında Bulunan Termal Buharlaştırma Sistemi

Bu yöntem, özellikle optik ve elektronik endüstrilerinde ince filmlerin üretiminde sıklıkla kullanılır. Örneğin güneş hücreleri, optik aynalar, yansıtıcı kaplamalar ve elektronik cihazların üretiminde termal buharlaştırma yöntemi tercih edilmektedir.

2.5.2. Saçtırma Yöntemi

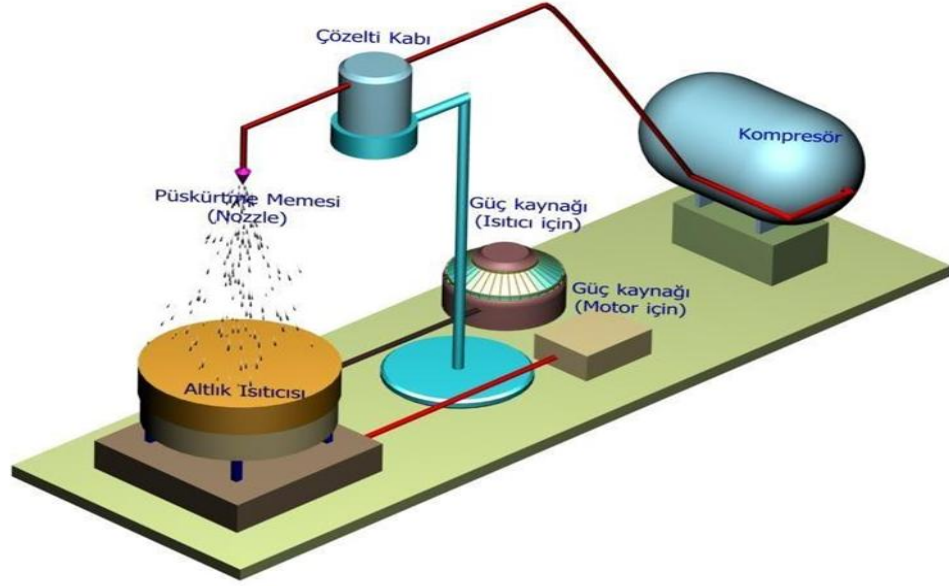
İnce film kaplama işlemleri arasında, buhar kaynağı olarak püskürtme sıklıkla tercih edilen bir tekniktir. Diğer yöntemlere göre birçok avantaj sunan püskürtme işlemi (bkz. Şekil 2.14), katı malzemenin pozitif iyonlarla bombardıman edilmesini içerir. Bu bombardıman, malzeme yüzeyinden ayrılan atomları alt tabaka yüzeyine taşır ve ince bir film tabakası oluşturur. Püskürtme işlemi iki elektrot kullanır: bir anot ve bir katot. Katot, kaplanacak malzeme ile kaplanır. Kaplanacak alt tabaka anot üzerine yerleştirilir. Püskürtme odası argon gazı ile doldurulur ve Ar^+ iyonları DC voltajı uygulanarak hedef malzemeye yönlendirilir. Hedef malzemeden kopan atomlar alt tabaka yüzeyine çarpar ve ince bir film tabakası oluşturur. Bu işleme RF diyet püskürtme denir.



Şekil 2.14. Saçtırma mekanizması

2.5.3. Kimyasal Püskürtme Yöntemi

İnce film kaplama proseslerinde kullanılan diğer bir proses ise kimyasal püskürtmedir. Bu işlemde kaplanacak malzeme öncelikle sıvı bir çözelti içerisinde aktarılır. Bu çözelti daha sonra substrat üzerinde ince bir film tabakası oluşturmak için basınçlı bir gaz kullanılarak püskürtülür. Prosedürün uygulanması oldukça basittir. Kaplanacak malzeme uygun bir solvent içerisinde eritilerek sıvı solüsyon elde edilir. Bu çözelti püskürtme tabancasına yerleştirilir ve basınçlı bir gaz (genellikle hava veya nitrojen) kullanılarak alt tabakaya püskürtülür. Püskürtme işlemi sırasında alt tabakanın sıcaklığı kontrol altında tutulur.



Şekil 2.15. Kimyasal püskürtme yöntemi

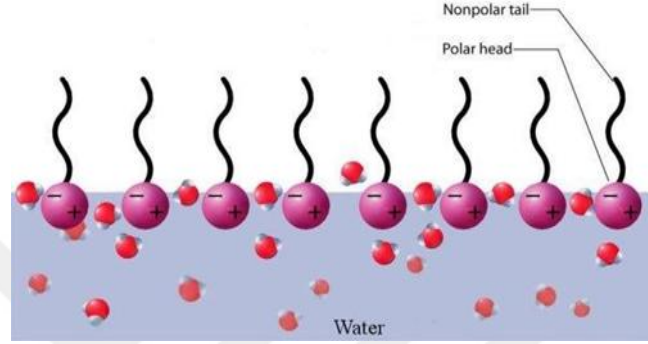


Şekil 2.16. Püskürtme sistemi (Batman Üniversitesi)

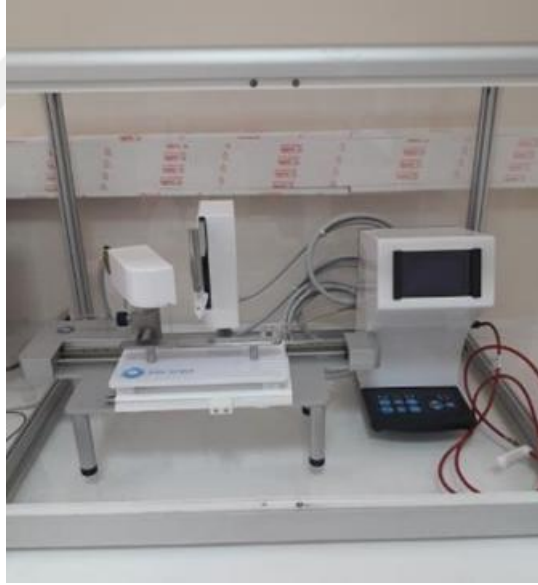
2.5.4. Langmuir-blodgett yöntemi:

Langmuir-Blodgett (LB) ince film kaplama işlemi, kaplanacak bir alt tabakanın sulu bir yüzeye daldırılması ve bir veya daha fazla farklı organik malzeme katmanıyla katı kaplama yapılmasıyla gerçekleştirilir. Langmuir-Blodgett filmleri, sürecin Irving Langmuir tarafından ve Kaharin B. Blodgett tarafından icat edilmesi nedeniyle bu şekilde adlandırılmıştır. LB filmleri, yüzey aktif maddeler gibi amfifilik moleküllerin hava-su

arayüzünde hava ile etkileşime girmesiyle oluşur. Hidrofobik ucu ve hidrofilik başlangıcı olan bir molekül. Yüzey aktif maddelerin konsantrasyonu kritik misel konsantrasyonundan (CMC) daha düşükse, Şekil 2.17'de gösterildiği gibi kendi kendine organize olacaklardır. Bu davranış yüzey gerilimi kullanılarak açıklanabilir. Yüzeyleri hidrofobik olduğundan su yerine hava ile teması tercih ederler. Başlıklar hidrofilik olduğundan hava yerine su ile temas ederler. Başlıca avantajı yüzey geriliminin azaltılmasıdır.



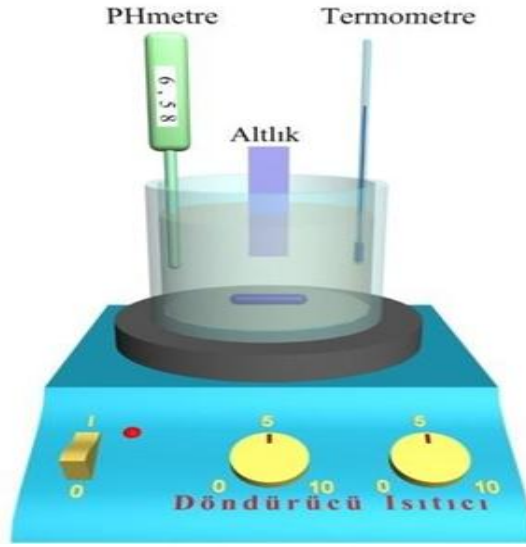
Şekil 2.17. Yüzey aktif moleküllerin hava-su arayüzeyinde düzenlenmesi.



Şekil 2.18. LB sistemi (Batman Üniversitesi)

2.5.5. Kimyasal banyo depolama yöntemi:

İnce film kaplama işleminde kimyasal banyo biriktirme yönteminin kullanılması oldukça basit bir uygulamadır. Kısaca bu yöntem, temizlenmiş cihazların bir süre metal iyonları, hidrojen, kükürt veya selenyum kaynağı içeren sulu çözeltilere batırılmasını ve bu konumlarda üzerlerine ince tabakalar bırakılmasını içerir.



Şekil 2.19. Kimyasal banyo yöntemi.

2.5.6. Sol-Jel kaplama yöntemi

İnce film kaplama proseslerinden olan sol-jel prosesinden literatürde ilk olarak 1946 yılında bahsedilmiştir. Bir katının su içerisinde askıda kalmasına hücre denir ve enerjisi ihmal edilebilir. Moleküller arası van der Waals kuvvetleri ve elektrostatik itme kuvvetleri enerjiden daha büyük olduğundan boru şeklindeki malzeme batmaz. Endüstride ve teknolojiye kullanılan sol-jel işleminin avantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz: - Kaplama tabakasının yüzeyi üniformdur

.- Katmanlar ham maddenin saflığına göre saftır.- Başvuru süreci kolay ve ekonomiktir.

- Uygulama sırasında gereksiz yüksek sıcaklık.
- Neredeyse hiç çevre kirliliği yok.
- Sol-jel işlemi desteğin geometrisiyle sınırlı değildir.
- Çok katmanlı kaplamalar oluşturulabilir.

- Katmanlar birden fazla katmandan oluşabilir.- Oluşturulan katmanlar gözenekli bir yapıya sahiptir. Gözeneklilik, tüberkülün yapımında kullanılan malzemenin seçimi ve ilave yüzdesi ile kontrol edilebilir. İnce tabaka kaplama sol-jel yöntemiyle iki şekilde yapılmaktadır. Bunlar: döndürme ve daldırma yöntemidir.

3. DENEYSEL İŞLEMLER

3.1. Taban Malzemelerinin Hazırlanması

Taban malzemesi olarak kullandığımız kristallerin yönelimleri (111) olup, 5 Ω .cm özdirençli, tek kristalli p-tipi silisyum levhalardır ve bir yüzeyleri parlatılmıştır. Kaplanacak kristaller ise 1×1 cm² boyutlarında hazırlanıp RCA (Radio Corporation of America) kimyasal temizleme işlemine tabi tutulmuştur (Kern, 1993). Bu kristaller daha sonra sırasıyla organik, iyonik ve oksit işlem süreçlerinden geçirilmiştir.

1- Organik Temizleme: Amonyum hidroksit [NH₄OH], hidrojen peroksit [H₂O₂] ve 18 M Ω deiyonize su 1:1:5 oranlarında bir beherde karıştırılmıştır. Hazır kristaller bir beher içerisine yerleştirilerek 60°C'de 10 dakika boyunca kaynatıldı.

2- İyonik Temizleme: Hidroklorik asit [HCl], hidrojen peroksit [H₂O₂] ve 18 M Ω deiyonize su 1:1:6 oranlarında bir beherde karıştırılmıştır. Hazır kristaller bir beher içerisine yerleştirilerek 60°C'de 10 dakika boyunca kaynatıldı.

3- Oksit Temizleme: Hidroflorik asit [HF] ve 18 M Ω deiyonize su 1:10 oranında bir beherde karıştırılmıştır. Hazır kristaller bir beherde yerleştirildikten sonra 30 saniye boyunca ultrasonik banyoda işleme tabi tutulmuştur.

Tüm işlemlerde kristaller deiyonize su ile dolu beherde ultrasonik banyoya bırakılmış ve kristal yüzeylerinde oluşabilecek oksitlemeyi önlemek için azot gazı (N₂) ortamında kurutmaya bırakılmıştır.

Temizlik işleminden sonra hazır bulunan tüm kristallerin mat yüzeyleri vakum cihazında saflığı % 99,99 olan alüminyum (Al) metali ile kalınlığı 1200 Å olarak şekilde 10⁻⁶ Torr vakuma maruz bırakılarak kaplanmıştır. Bu işlem sonrası da meydana gelebilecek seri direnç etkisini azaltmak amacıyla kristaller tüp fırın içinde azot gazı (N₂) ortamında 3 dakika süre ile 580 °C sıcaklıkta tutularak kaplı alüminyumun çökmesi (alloying) sağlanmıştır.

3.2. Çözelti Hazırlama

Öncelikle Zr ve Al stok çözeltileri hazırlandı. Zr stok çözeltisi için 1 g zirkonyum (IV) etoksit ($C_8H_{20}O_4Zr$) tozu 100 mL etanolde (C_2H_5OH) ve Al stok çözeltisi için de 0,1 g alüminyum nitrat ($Al(NO_3)_3$) 10 mL etanolde (C_2H_5OH) çözündü.

Sadece Zr kaplama için, 50 mL Zr stok çözelti içerisine 10 mL etilen glikol (CH_2OH)₂ ilave edilerek karıştırıldı. Sonra bu beherin içerisine temizlenmiş, omik kontağı yapılmış p-Si taban malzemeleri daldırıldı. Taban malzemeler bu banyo etüvde 40 °C de 4 saat bekletildi. Bekleme sonrası taban malzemeler banyodan çıkarıldı ve omik kontak tarafları etil alkole daldırılmış pamuk ile temizlendi. İşlem sonrasında taban kaplanmış taban malzemeler 400 °C de 4 saat tavlandı.

Hazırlanmış olan Zr stok çözeltilerine

- % 1 Al katkılama için; 50 mL Zr stok çözelti içerisine, 0,5 mL Al stok çözeltisinden ve 10 mL de etilen glikol ilave edilip karışımı sağlandı.
- % 5 Al katkılama için; 50 mL Zr stok çözelti içersine, 2,5 mL Al stok çözeltisinden ve 10 mL de etilen glikol ilave edilip karışımı sağlandı.
- % 10 Al katkılama için; 50 mL Zr stok çözelti içersine, 5 mL Al stok çözeltisinden ve 10 mL de etilen glikol ilave edilip karışımı sağlandı.

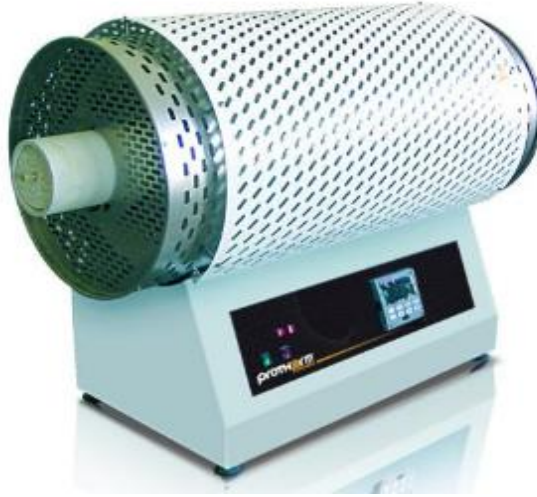
% 1, % 5 ve % 10 Al katkılı Zr çözeltilerini bulunduğu beherlere temizlenmiş, omik kontağı yapılmış p-Si taban malzemeleri daldırıldı. Taban malzemeler bu banyo etüvde 40 °C de 4 saat bekletildi. Bekleme sonrası taban malzemeler banyodan çıkarıldı ve omik kontak tarafları etil alkole daldırılmış pamuk ile temizlendi. İşlem sonrasında taban kaplanmış taban malzemeler 400 °C de 4 saat tavlandı.

3.3. X-Işını Kırınım Difraktometresi ile Yapı Tayini

p-Si yüzeye kaplı ham ZrO_2 ince filmin yapısal analizi Şekil 3.1’de verilmiş olan Rigaku MiniFlez-II marka X-Işını kırınımı (XRD) cihazı yardımıyla yapısal tayini yapılmıştır. Tüm kaplama işlemlerinde kaplı ince filmlerin tavlama Protherm PTF 12/75/800 (Şekil 3.1) marka tüp fırın ile yapılmıştır.



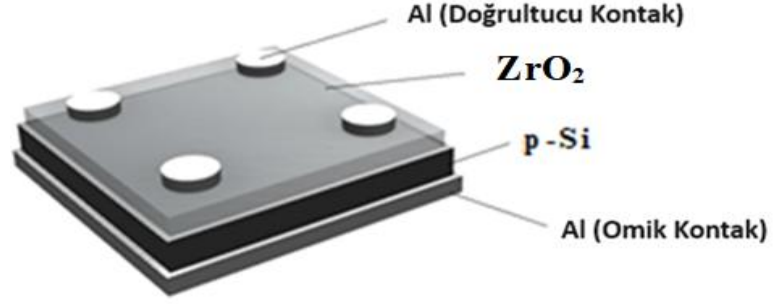
Şekil 3.1. Yapısal tayin için XRD cihazı (Batman Üniversitesi).



Şekil 3.2. Tavlama işlemleri için kullanılan Protherm PTF 12/75/800 tüp fırın (Batman Üniversitesi).

3.4. Arayüzeyi Katkısız ve Katkılı Al/ZrO₂/p-Si (MOS) Yapılarının Eldesi

p-Si üst parlak kısmına kaplanmış katkısız ve % 1, % 5 ve % 10 Al katkılı ZrO₂ film tabakasına maske tekniği ile termal buharlaştırma yöntemiyle Al doğrultucu kontaklar yapılarak MOS yapılar elde edilmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Al/ZrO₂/p-Si (MOS) yapısı.

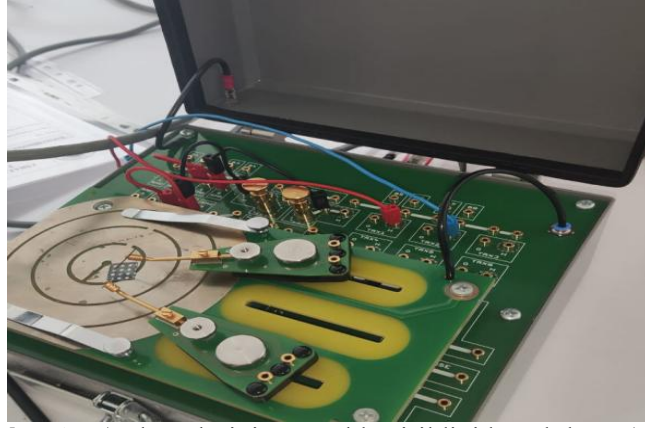
Yapımızdaki omik ve doğrultucu kontaklar NANOVAK marka NVTH-350 model termal buharlaştırma cihazı ile yapılmıştır. Kontaklar molibden pota içine yerleştirilen Al metal parçaların 10⁻⁶ Torr vakum altında buharlaştırmasıyla gerçekleştirilmiştir.



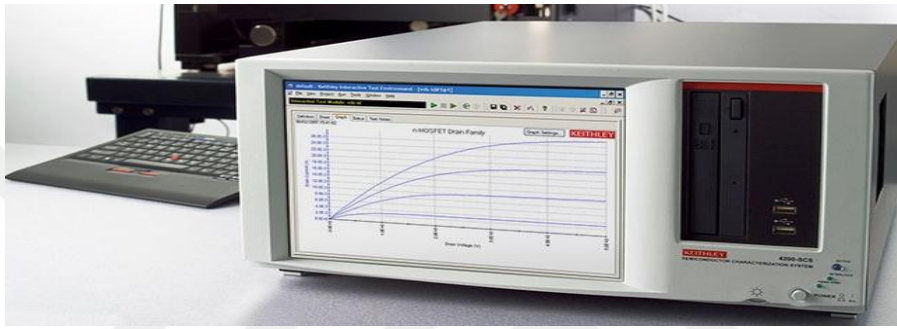
Şekil 3.4. Nanovak NVTH-350 Termal buharlaştırma cihazı (Batman Üniversitesi).

3.5. Akım-Gerilim (I-V) Ölçüm Sistemi

Katkısız ve arayüzeyi Al katkılı Al/ZrO₂/p-Si (MOS) yapılarının oda sıcaklığı ve karanlık altındaki akım-gerilim (I-V) ölçümleri kapalı bir kutu içerisinde (Şekil 3.5) ve 3 kanallı Keithley marka 4200 SCS model (Yarıiletken Karakterizasyon Sistemi) akım kaynağı (Şekil 3.6) ile yapılmıştır.



Şekil 3.5. Akım-gerilim (I-V) ölçümlerinin gerçekleştirildiği kapalı kutu (Batman Üniversitesi).



Şekil 3.6. Keithley marka 4200 SCS model akım kaynağı.

p-Si yüzeylere kaplı katkısız ve Al katlılı ZrO_2 ince filmlerin yüzey kalınlıkları Avantes marka AvaSpec-ULS2048 model ince-film kalınlık spektrofotometre yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 3.7).

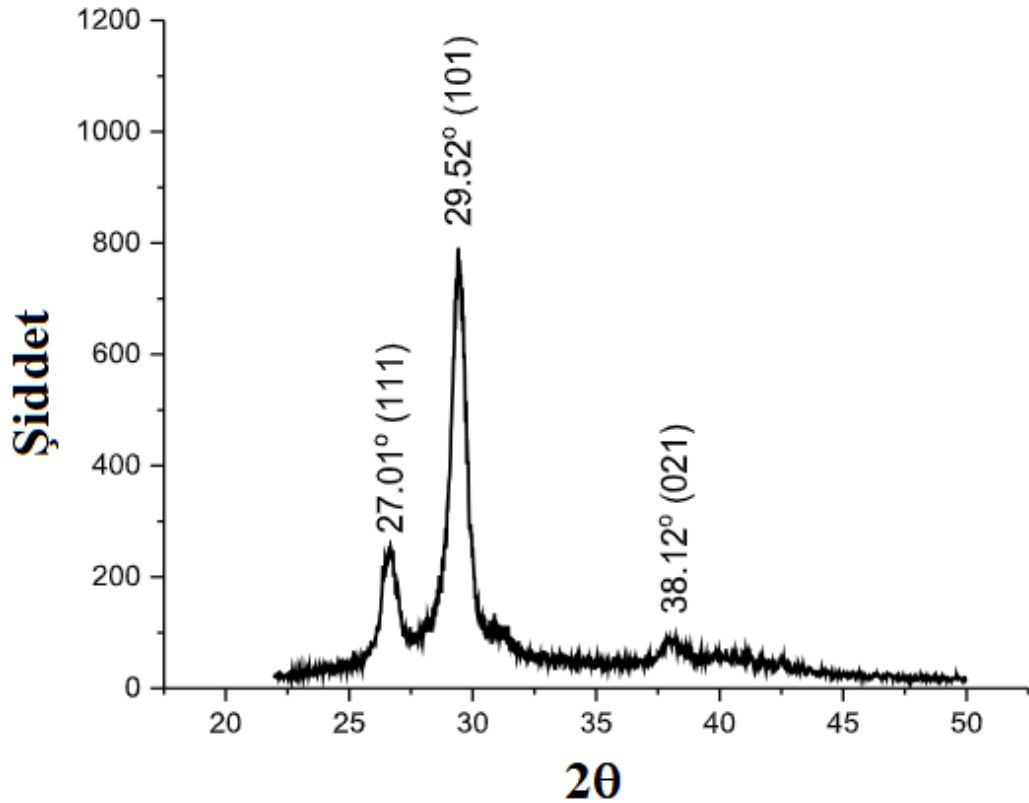


Şekil 3.7. İnce film kalınlık ölçer spektrofotometre (Avantes AvaSpec-ULS2048).

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. XRD Yapısal Tayini

Katkısız ZrO_2/p -Si yapısı doğrultucu kontağı yapılmadan önce ZrO_2 kaplı yüzeyinin X-ışını kırınım difraktometresi ile XRD analizi yapılmıştır. Şekil 4.1’de görüldüğü üzere 27,01 derecede (111), 29,52 derecede (101) ve 38,12 derecede de (021) yönelimleriyle monoklinik ZrO_2 , tetragonal ZrO_2 ve monoklinik ZrO_2 yapılarında pikler vermektedir. Analizi yapılan bu pikler 72-597, 42-1164 ve 72-597 nolu “standart PDF” numaraları ile uyumlu haldedir. Bu pikler “OriginPro 2023” yazılımı yardımıyla smooth very analizlenmesi uygulanarak gerekli düzeltmeler yapılmıştır.



Şekil 4.1. p-Si yüzeyi kaplanmış ZrO_2 ince film yapısının XRD desenleri.

Oksijenin ortamda varlığından dolayı bu biçimde desenler elde edilmiştir. Görüldüğü gibi yapının alt taşı olan Si elementinin XRD desenlerinde pikleri görülmemiş olup, nedeni ZrO_2 ince filmin yüzeyi sarmış olabileceğini düşünebiliriz.

Çizelge 4.1. ZrO₂ yapısının XRD desenlerinden elde edilen veriler.

Formül	(hkl)	2θ (Gözlemlenen)	2θ (PDF)	PDF No	Structure	Boyutlar (a,b,c) (Å)
ZrO ₂	(111)	27.01	27.84	72-597	Monoklinik	a=5.21, b=5.26, c=5.37
ZrO ₂	(101)	29.52	29.80	42-1164	Tetragonal	a=3.64, b=5.27
ZrO ₂	(021)	38.12	38.175	72-597	Monoklinik	a=5.21, b=5.26, c=5.37

4.2. Katkısız ve Katkılı ZrO₂ İnce Filmlerin Kalınlık Tayinleri

Ölçüm ve analizlerde kullandığımız yapılarımızın bilgileri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Her bir yapıdaki oksit tabakanın kalınlığı fotospektrometre vasıtasıyla belirlenmiştir.

Çizelge 4.2. Ölçüm ve analizlerde kullanılan yapıların bilgileri.

Kod	Yapı	Oksit tabakası katkılama oranı	δ (nm)
R01	Al/ZrO ₂ /p-Si (MOS)	-	83
R02	Al/ZrO ₂ /p-Si (MOS)	%1 Al	86
R03	Al/ZrO ₂ /p-Si (MOS)	%5 Al	98
R04	Al/ZrO ₂ /p-Si (MOS)	%10 Al	103
R05	Al/p-Si (MS)	-	-

Arayüzey yalıtkan tabakalı bir MS Schottky diyot düşünüldüğünde, uygulanan ileri öngerilim $V(V \geq 3kT / q)$ ile akım I arasındaki ilişkinin, tünelleme ile düzeltilmiş TE akımına göre, aşağıdaki gibi ifade edildiği varsayılır;

$$I = I_0 \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{-q(V - IR_s)}{kT}\right)\right], \quad (4.1)$$

burada I_0 ters doyum akımıdır ve şu şekilde tanımlanır;

$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{B0}}{kT}\right), \quad (4.2)$$

burada ϕ_{B0} sıfır beslem engel yüksekliğini, A aygıt alanını, A^* etkin Richardson sabitidir ve p-tipi Si için $32A/cm^2K^2$ değerine eşittir, n idealite faktörü, R_s aygıtın seri direnci, T Kelvin cinsinden mutlak sıcaklık ve V uygulanan gerilimdir.

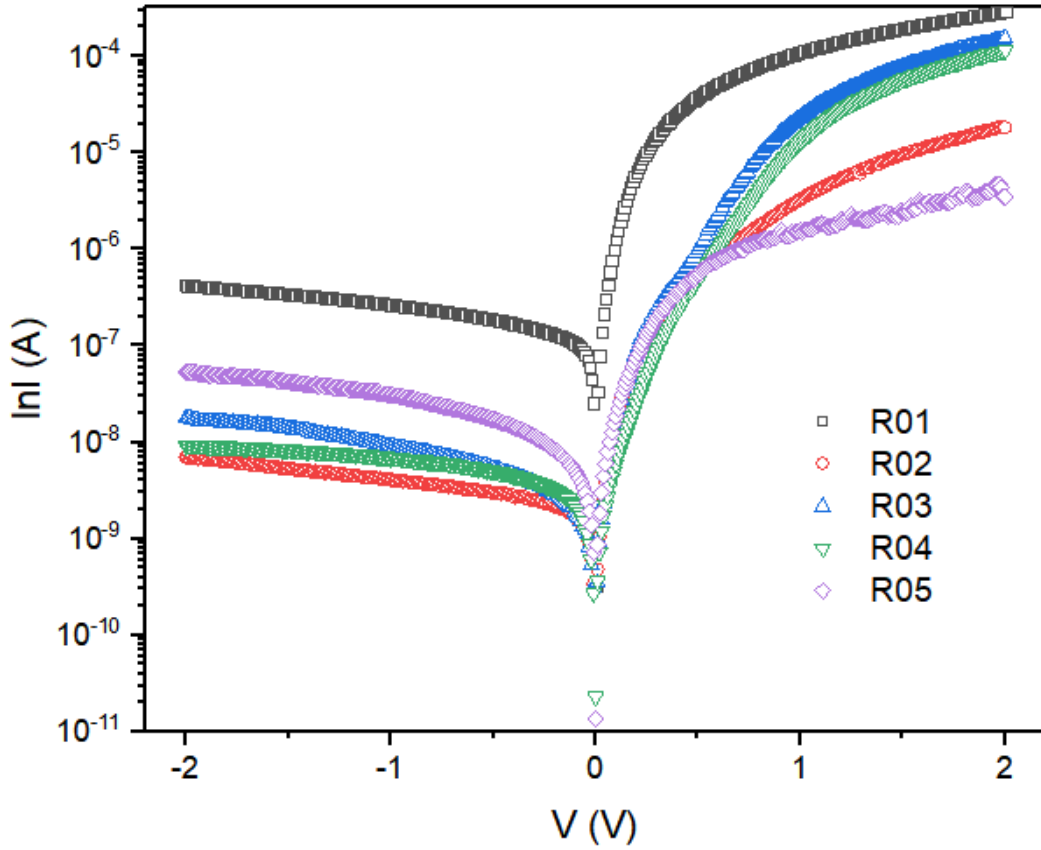
Şekil 4.2’de, Al/p-Si (MS) ve arayüzey oksit tabakası Al katkılı Al/ZrO₂/p-Si (MOS) yapılarımızın karanlık altında ve oda sıcaklığındaki deneysel ileri ve geri öngerilim $\ln I$ - V karakteristikleri görülmektedir. Şekil 4.2’den de görülebileceği gibi, her bir yapı için ters akımlar (I_R), her bir öngerilim gerilimindeki ileri akıma (I_F) kıyasla çok küçük olmakla kalmaz, aynı zamanda yapıdan yapıya farklılık göstermektedir. Termiyonik emisyon teorisi, bu akımların metal kontağın altındaki yarıiletken tüketilmiş bölgede üretilen akımdan oluşması gerektiğini ve oksit tabaka kalınlıklarına bağlı olduğunu öngörmektedir. Denklem (4.1) kullanılarak, her bir yapımız için n idealite faktörü değerleri, $\ln I$ - V grafiklerinin (bu doğrusal bölgelerdeki seri direncin etkisi önemli olmadığından) eğimlerinden hesaplanmıştır;

$$n = \left(\frac{q}{kT} \right) \frac{dV}{d \ln I} , \quad (4.3)$$

Seri direnç etkisi önemli iken idealite faktörü,

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

denklemleri ile verilir.



Şekil 4.2. Al/p-Si, katkısız ve arayüzü Al katkılı Al/ZrO₂/p-Si (MOS) yapılarının $\ln I$ - V eğimleri.

Arayüzeyli ve arayüzü, katkısız ve Al katkılı Al/ZrO₂/p-Si (MOS) yapılarımızın $\ln I$ - V eğimleri grafiği Şekil 4.2’de görülmektedir. Denklem (4.2) ve (4.3) den yararlanılarak Al/p-Si (MS) ve, arayüzü katkısız ve Al katkılı Al/ZrO₂/p-Si (MOS) yapılarımızın hesaplanan idealite faktörü değerleri 1,69; 4,55; 4,27; 3,76; 3,39 ve sıfır beslem engel yüksekliği değerleri de 0,800; 0,620; 0,735; 0,740; 0,776 eV olarak hesaplanmıştır. İdealite faktörü değerimiz arayüzeyli yapıda 1,69 olmasına rağmen arayüzeyli yapılarda büyük çıkmıştır. Al/p-Si arayüzeyinde katkısız ve Al katkılı ZrO₂ ince film yapılarının incelenmesi, bu arayüzeydeki durumların dağılımının ve +1 V’tan sonra gözlenen bükülmenin neden olduğu seri direncin (Şekil 4.2) etkilerini ortaya koymaktadır (Singh 1985; Szatkowski ve Sieranski 1988; Cova ve Singh 1990; Singh, 1990).

4.3. Seri Direnç Analizleri

Metal/yarıiletken (MS) ve arayüzeyi oksit kaplı (MOS) tipi yapılarımızın akım-gerilim (I - V) analizlerinde, I - V grafiğinin ön beslemdeki belli gerilim değerinden itibaren

gözlenen akım değerinde bükülme olabilmekte ve bu değişimin MS veya MOS yapıdaki seri dirençten (R_s) dolayı olduğu belirtilmektedir. Şekil 4.2’de katkısız ve arayüzü Al katkılı Al/ZrO₂/p-Si (MOS) yapılarımızın akım değerlerinin 0,7 V’tan itibaren bükülmeler meydana getirdiği görülmektedir. Bugüne değin MS ve MOS tipi yapılarda seri direnci belirlemede çeşitli yöntemler ileri sürülmüştür (Norde, 1979; Cheung ve Cheung, 1986). Çizelge 4.2’deki yapılarımızın seri direnç değerlerini belirlemek için iki yöntemden yararlanılmıştır. Bunlar Norde ve Cheung yöntemleridir.

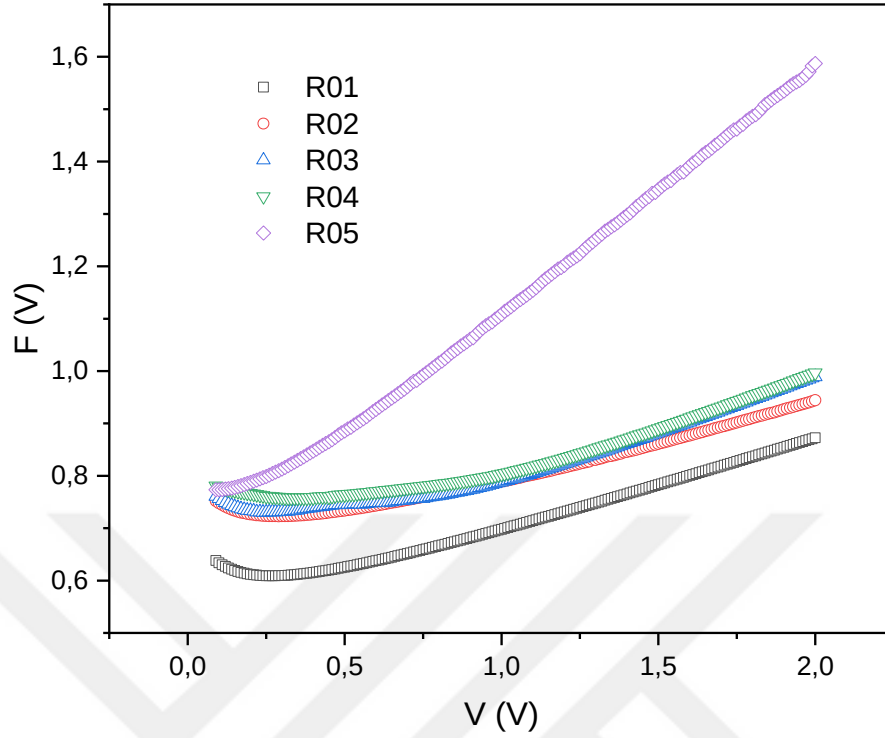
Norde yöntemi, seri direnç değerini belirlemek için bir $F(V,\gamma)$ fonksiyonunun belirlenmesini esas alır. Buna göre;

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

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

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

denklemlerinden faydalanılır. Denklemlerde ifade edilen gama (γ) belirtkeni yapının idealite faktörü değerinin üstü en büyük tam sayıyı, V_0 ve I_{min} da Norde fonksiyonunun en küçük gerilim değerini ve akım değerlerini ifade etmektedir.



Şekil 4.3. Al/p-Si, katkısız ve arayüzü Al katkılı Al/ZrO₂/p-Si (MOS) yapılarının Norde eğimleri.

Denklem (4.5)'den faydalanarak yapılarımız için elde ettiğimiz Norde fonksiyonları Şekil 4.3'de gösterilmiştir. V_{min} ve I_{min} değerleri her bir yapı için belirlenmiştir. Denklem (4.6) ve (4.7) den hesaplanmış R_s ve Φ_B değerleri sırasıyla 1135 Ω , 127 K Ω , 39 K Ω , 109 K Ω ve 0,623 eV, 0,751 eV, 0,766 eV, 0,819 eV olarak bulunmuştur.

Yapılarımızın seri direnç değerlerini belirlemede kullandığımız bir diğer yöntem ise Cheung'ler tarafından önerilen ve belirli fonksiyonlar aracılığıyla analiz edilen yöntemdir (Cheung ve Cheung, 1986). Cheungler MS ve MOS yapılarında akım-gerilim (I - V) ölçümlerinden elde edilen ön beslem altındaki I - V eğimlerindeki tam büküm noktalarından seri direnç etkisinin olacağını belirtmekte ve seri direnç değerini belirleme de bu büküm noktasına dikkat etmemiz gerektiğini belirtmektedir. Denklem (4.2)'in Cheung yönteminde ile her iki tarafının logaritması alınır ise,

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

elde edilir ve diferansiyeli $\ln I$ 'ya göre alınır,

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

Şekli ile elde edilir. Buna göre;

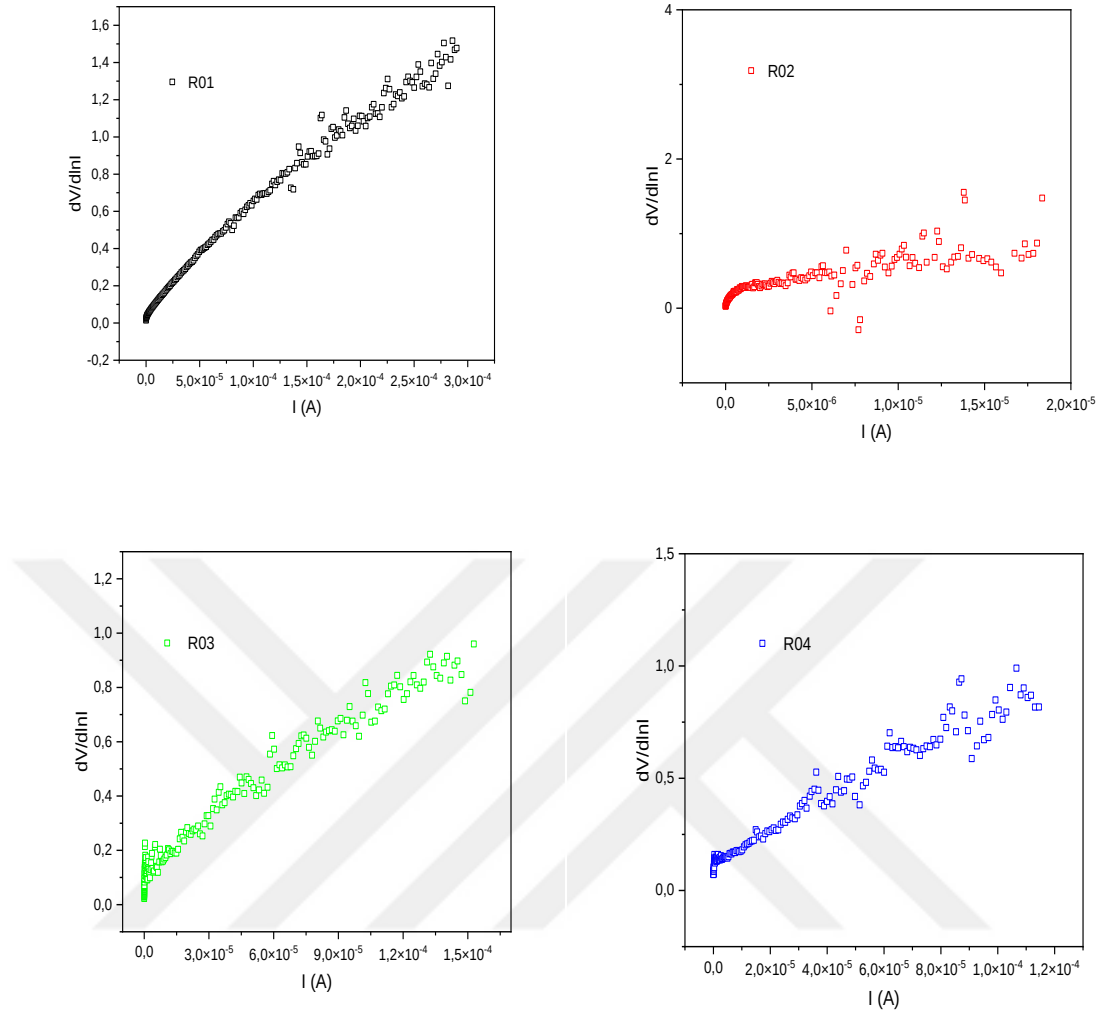
$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (4.10)$$

ifade edilen seri direncin belirlenmesi için bir $H(I)$ fonksiyonu tanımlanır. Buna göre $H(I)$ denklem fonksiyonu,

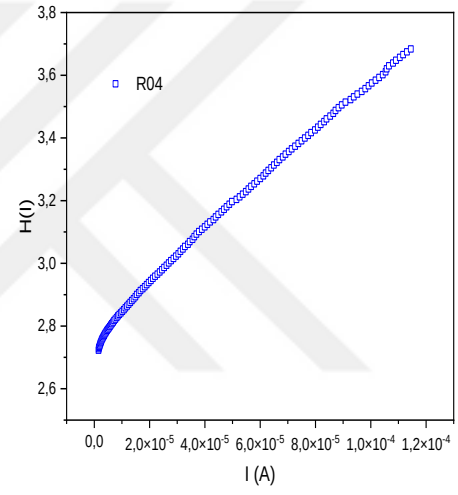
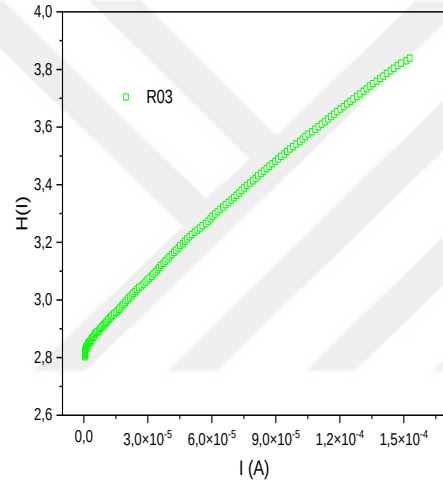
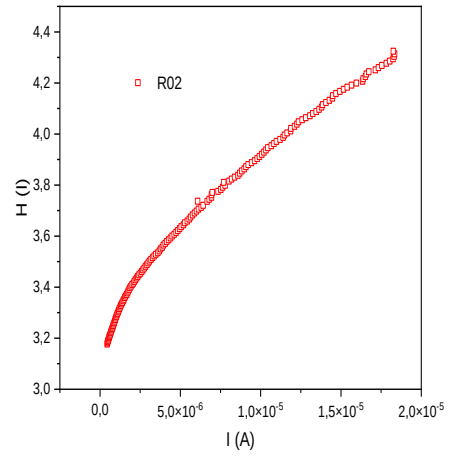
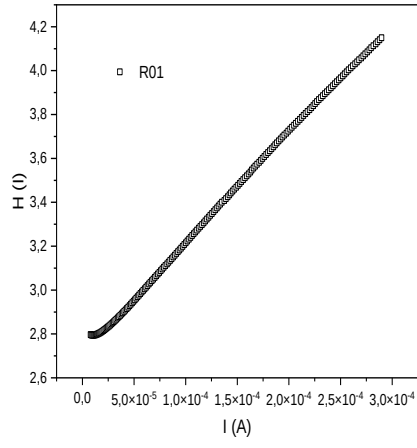
$$H(I) = n\phi_b + IR_s \quad (4.11)$$

olur.

Al/p-Si, katkısız ve Al katkılı Al/ZrO₂/p-Si (MOS) eklemelerinin $dV/d(\ln I)$ - I ve $H(I)$ - I grafikleri, Denklem (4.9) ve (4.11) kullanılarak Şekil 4.4 ve 4.5'te sunulmuştur. Denklem (4.9) ve $dV/d(\ln I)$ - I grafiğinin eğimlerinden yararlanarak tüm yapılarımızın idealite faktörü ve seri direnç değerleri hesaplanabilir. Buna göre hesaplanan idealite faktörü ve seri direnç değerleri sırasıyla 5,88 , 7,57 , 7,11 , 5,23 ve 4,67 k Ω , 91 k Ω , 5,1 k Ω , 7,1 k Ω olarak bulunmuştur. Ayrıca denklem (4.11) ve $H(I)$ - I eğiminden faydalanarak engel yüksekliği ve seri direnç değeri de belirlenmiştir. Engel yüksekliği ve seri direnç değerleri ise sırasıyla 0,593 eV, 0,786 eV, 0,765 eV, 0,820eV ve 5,1 k Ω , 54,9 k Ω , 6,6 k Ω , 8,1 k Ω olarak hesaplanmıştır. I - V ölçümlerinden hesaplanan tüm elektriksel parametreler Çizelge 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Al/p-Si, katkısız ve arayüzü Al katkılı Al/ZrO₂/p-Si (MOS) yapılarının $dV/d(\ln I)$ - I grafikleri.



Şekil 4.5. Al/p-Si, katkısız ve arayüzü Al katkılı Al/ZrO₂/p-Si (MOS) yapılarının $H(I)$ - I grafikleri.

Çizelge 4.3. Al/p-Si, katkısız ve arayüzü Al katkılı Al/ZrO₂/p-Si (MOS) yapılarının *I-V* ölçümünden hesaplanmış elektriksel parametre değerleri.

KOD	<i>I-V</i> (ln(<i>I</i>)- <i>V</i>)		Norde (<i>F(V)</i> - <i>V</i>)		Cheung 1 (<i>dV/d(lnI)</i> - <i>I</i>)		Cheung 2 (<i>H(I)</i> - <i>I</i>)	
	<i>n</i>	Φ_b (eV)	<i>R_s</i> (K Ω)	Φ_b (eV)	<i>R_s</i> (K Ω)	<i>n</i>	<i>R_s</i> (K Ω)	Φ_b (eV)
R01	4,55	0,620	1,13	0,623	4,67	5,88	5,1	0,593
R02	4,27	0,735	127	0,751	91	7,57	54,9	0,786
R03	3,76	0,74	39	0,766	5,1	7,11	6,5	0,765
R04	3,39	0,778	109	0,819	7,1	5,23	8,1	0,820

Çizelge 4.2’de hesaplanan değerlerden termiyonik emisyon teorisinden hesapladığımız idealite faktörü değerleri, Cheung yönteminden hesapladığımız değerlere göre düşüktür. Hesaplanan değerler arasındaki farklılık, çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu faktörler arasında arayüzey durumları, Al ile p-Si arayüzeyindeki ZrO₂ oksit katmanının dielektrik sabiti ve kalınlığı yer almaktadır. Ayrıca, seri direncin hesaplanmasında kullanılan yöntem de sonuçları etkilemektedir. Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi, her bir yöntemde elde edilen engel yükseklikleri ve seri direnç değerleri farklılık göstermektedir. Bunun temel nedeni, kullanılan yöntemlerin *I-V* eğrisinin farklı bölümlerini analiz etmesidir. Termiyonik emisyon teorisine dayanarak, lineer kısım, Norde yöntemi tüm *I-V* eğrisini ve Cheung yöntemi ise eğrinin bükülme anındaki lineer olmayan kısımları kullanır. Bu nedenle, Cheung fonksiyonundan elde edilen seri direnç değeri, Norde yönteminden elde edilen değerden oldukça küçüktür. Sonuç olarak, hesaplanan değerler arasındaki farklılık, bahsedilen faktörlerin bir kombinasyonundan kaynaklanmaktadır. Arayüzey özellikleri, oksit tabakasının dielektrik özellikleri ve kalınlığı, kullanılan yöntemin özellikleri gibi faktörler, sonuçları etkileyen önemli unsurlardır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında arayüzey oksit tabakası katkısız ve %1, %5, %10 alüminyum (Al) katkılı Al/ZrO₂/p-Si metal/oksit/yarıiletken (MOS) yapıları oluşturulmuştur.

Öncelikle ZrO₂ stok çözeltisi hazırlanmış, sonrasında üç adet %1, %5, %10 Al katkılı çözeltiler hazır hale getirilmiştir. İnce film kaplanacak RCA yöntemiyle temizlenmiş ve omik kontağı yapılmış p-Si alt yüzey üstüne kimyasal banyo depolama tekniği ile arayüzeyi katkısız ve %1, %5, %10 Al katkılı ZrO₂ kaplanmıştır. Katkısız ZrO₂/p-Si yüzeyinin yapısal analizi X-ışını kırınım Difraktometresi (XRD) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Yapılan XRD analizinde 27,01 derecede (111), 29,52 derecede (101) ve 38,12 derecede de (021) yönelimleriyle monoklinik ZrO₂, tetragonal ZrO₂ ve monoklinik ZrO₂ yapılarında pikler vermektedir. Analizi yapılan bu pikler 72-597, 42-1164 ve 72-597 nolu “standart PDF” numaraları ile uyumlu haldedir. Bu pikler “OriginPro 2023” yazılımı yardımıyla smooth very analizlenmesi uygulanarak gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Septawendar ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ZrO₂ ince film yapısının XRD analizlerinde benzer açılar elde etmişlerdir (Septawendar ve ark., 2011). Yine Pakma ve arkadaşları cam alttaşlara benzer yöntem ile katkısız, farklı kalınlıkta ZrO₂ ince filmler elde etmişler, XRD analizlerinde benzer pikler tespit edilmiştir (Pakma vd., 2016).

Yapı analizinden sonra bir adet oksit tabakasız p-Si kristali, ara yüzeyi katkısız bir adet ZrO₂/p-Si ve ara yüzeyi %1, %5, %10 Al katkılı ZrO₂/p-Si yapılarının ince film kaplanmış yüzeylerine termal buharlaştırma tekniğiyle Al doğrultucu kontağı yaparak Al/p-Si, ara yüzeyi katkısız ve katkılı Al/ZrO₂/p-Si metal/oksit/yarıiletken (MOS) yapıları elde edilmiştir. Bu yapıların karanlıkta ve oda sıcaklığında akım-gerilim (I-V) ölçümleri yapılmıştır.

Tüm Metal-Yarıiletken (MS) ve Metal-Oksit-Yarıiletken (MOS) eklemlerin akım-gerilim (I-V) ölçümleri analiz edilerek elektriksel parametreleri belirlenmiştir. Bu parametreler arasında idealite faktörü ve sıfır beslem engel yüksekliği değerleri öne çıkmaktadır. Özellikle oksitli yapılarda idealite faktörünün 1 değerinden çok daha yüksek olması, Al/p-Si arasındaki ZrO₂ oksit tabakasının varlığına, arayüzey durum dağılımlarına ve p-Si yarıiletken katmanının nötral bölgesindeki yüksek seri direnç değerine bağlanmaktadır. Bu durum, diyotun ideal davranıştan sapmasına neden olmaktadır (Singh, 1985; Szatkowski ve Sieranski, 1988; Cova ve Singh, 1990; Singh,

1990). Pakma ve arkadaşları tarafından kimyasal banyo depolama tekniğiyle üretilen katkısız Al/ZrO₂/p-Si (MOS) eklemler üzerinde yapılan çalışmalar, arayüzey oksit kalınlığının idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerini etkilediğini göstermiştir. Farklı kalınlıklarda elde edilen yapılar için idealite faktörü değerleri 2,07-2,34 arasında, engel yüksekliği değerleri ise 0,622-0,706 eV arasında hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, oksit tabakasının özelliklerinin ve arayüzey durumlarının, MOS yapıların elektriksel karakteristiği üzerinde önemli bir rol oynadığını vurgulamaktadır (Pakma vd., 2016).

Akım-gerilim ölçümlerinden MOS yapılarının $\ln I$ -V grafiğinin eğimlerinden belli ön beslemelerde seri dirençten dolayı bükülmeler olduğu görülmüştür. R_s etkileri de Norde ve Cheung metodları ile tayin edilmiştir. Termiyonik emisyon teorisinden elde edilen değerler yanında Cheung yönteminden hesaplanan değerlerin yüksek değerlerde olması arayüzey durumlarına, arayüzeyde oluşturulan ZrO₂ oksit katmanının dielektrik sabitine ve oksit katmanının kalınlığı yanısıra kullanılan seri direnç belirleme yöntemlerine bağlanmaktadır. Norde ve Cheung yöntemleriyle hesaplanan seri direnç ve engel yüksekliği değerleri arasında farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılığın temel nedeni, her yöntemin akım-gerilim (I -V) eğrisinin farklı bölümlerini analiz etmesidir. Termiyonik emisyon teorisine dayanarak, Norde yöntemi ön beslem altındaki I -V eğrisinin tamamını kullanırken, Cheung yöntemi ise eğrinin bükülmeye başladığı, lineer olmayan bölgeye odaklanır. Bu durum, Cheung yöntemiyle hesaplanan seri direnç değerlerinin Norde yöntemiyle hesaplanan değerlerden daha düşük olmasına yol açar. Zira Cheung yöntemi, I -V eğrisinin yüksek akım bölgesindeki direnç etkilerini daha hassas bir şekilde analiz eder. Demir ve arkadaşları arayüzeyi belli yüzde Ag katkılı Al/HfO₂/p-Si (MOS) yapılarının I -V karakteristiklerini incelemişler, katkılama etkisinin bizim çalışmamıza yakın sonuçlar elde etmişlerdir (Demir vd., 2023).

Silisyum dioksit (SiO₂), elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılan bir oksit malzeme olmasına rağmen, zirkonyum oksit (ZrO₂) gibi alternatif malzemeler de dikkat çekmektedir. Zirkonyum oksit, yüksek dielektrik sabiti, bulunabilirlik ve düşük maliyet gibi avantajları sayesinde teknolojik uygulamalar için cazip bir seçenek sunmaktadır (Luo, vd., 2023).

KAYNAKLAR

- Aba, Z. (2024). *ZnS ve Cu₂ZnS₄ (CZTS) İnce Filmlerin Sentezi, Karakterizasyonu ve Optoelektronik Uygulamaları* (Doktora Tezi).
- Bohlin, K. E. (1986). Generalized Norde plot including determination of the ideality factor. *Journal of Applied Physics*, 60(3), 1223-1224.
- Bouchenaki, C., Ullrich, B., Zielinger, J. P., Cong, H. N., & Chartier, P. (1991). Preparation, characterization, and bistable photoconduction properties of thin CdS layers. *JOSA B*, 8(3), 691-700.
- Card, H. C. (1976). On the physical significance of the ideality factor n in Schottky contacts. *Solid-State Electronics*, 19(11), 971-975.
- Card, H. C., & Rhoderick, E. H. (1971). Studies of tunnel metal-semiconductor contacts. I. Electrical characteristics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4(10), 1573-1581.
- Cheung, S. K., & Cheung, N. W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49(2), 85-87.
- Cova, P., & Singh, A. (1990). Temperature dependence of I-V and C-V characteristics of Ni/n-CdF₂ Schottky barrier type diodes. *Solid-State Electronics*, 33(1), 11-19.
- Demir, A., Pakma, O., Özden, Ş., Kariper, İ. A., & Avcı, N. (2023). Effect of silver doping on electrical characteristics of aluminum/HfO₂/p-silicon metal-oxide-semiconductor devices. *Semiconductor Science and Technology*, 38, 125006.
- Gobinath, R., Ganapathy, G. P., Gayathiri, E., Salunkhe, A. A., & Pourghasemi, H. R. (2022). Ecoengineering practices for soil degradation protection of vulnerable hill slopes. In *Computers in earth and environmental sciences* (pp. 255-270). Elsevier.
- Hiroshi, O., Miyuki, S., & Toshio, K. (2001). *Jpn. Kokai Tokkyo Koho JP 2,001,316,178*.
- Kaliyannan, G. V., Palanisamy, S. V., Priyanka, E. B., Thangavel, S., Sivaraj, S., & Rathanasamy, R. (2021). Investigation on sol-gel based coatings application in energy sector—A review. *Materials Today: Proceedings*, 45, 1138-1143.
- Kern, W. (1993). *Handbook of Semiconductor Cleaning Technology*. Noyes.
- Khan, F., Baek, S. H., Mobin, A., & Kim, J. H. (2014). Enhanced performance of silicon solar cells by application of low-cost sol-gel-derived Al-rich ZnO film. *Solar Energy*, 101, 265-271.

- Kılınç, T. (2006). *Zn1-Xfexs İnce Filmlerin Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Lukin, E. S., Anufrieva, E. V., Makarov, N. A., Popova, N. A., & Kuteinikova, A. L. (2004). Dense and durable ceramics based on alumina and zirconia. *Refractories and Industrial Ceramics*, 45(6), 421-423.
- Maloney, M. J. (2000). *Depending on the reaction conditions, ZrO2 nanoparticle*. Eur. Pat. Appl. EP, 992, 603.
- Norde, H. (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50, 5052-5053.
- Pakma, O., Özdemir, C., Kariper, İ. A., Özaydın, C., & Güllü, Ö. (2016). Wet chemical methods for producing mixing crystalline phase ZrO2 thin film. *Ceramics International*, 377, 159-166.
- Q., Zhang, M., Lu, M., Wang, Z., Luo, G., Lu, J.,... & Tian, S. (2023). Facile synthesis of ZrO2–SiO2 antireflective films with good mechanical performances for perovskite solar cells. *Langmuir*, 39(31), 10779-10787.
- Ray, J. C., Pramanik, P., & Ram, S. (2001). Formation of Cr³⁺ stabilized ZrO2 nanocrystals in a single cubic metastable phase by a novel chemical route with a sucrose–polyvinyl alcohol polymer matrix. *Materials Letters*, 48(5), 281-291.
- Rhoderick, E. H., & Williams, R. H. (1988). *Metal-semiconductor contacts*. Clarendon Press.
- Saga, T. (2010). Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production. *NPG Asia Materials*, 2(3), 96-102.
- Senthilkumar, N., Arulraj, A., Nandhakumar, E., Ganapathy, M., Vimalan, M., & Vetha Potheher, I. (2018). Green mediated synthesis of plasmonic nanoparticle (Ag) for antireflection coating in bare mono silicon solar cell. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29, 12744-12753.
- Septawendar, R., Purwasasmita, B. S., Suhandi, L., Nurdiwijayanto, F., & Edwin, F. (2011). Nanocrystalline ZrO2 powder preparation using natural cellulosic material. *Journal of Ceramic Processing Research*, 12(1), 110-113.
- Sharma, B. L. (1984). *Metal-semiconductor Schottky barrier junctions and their applications*. Plenum Press.
- Singh, A. (1985). Characterization of interface states at Ni/n-CdF2 Schottky barrier type diodes and the effect of CdF2 surface preparation. *Solid-State Electronics*, 28(3), 223-232.
- Singh, A. (1990). Metal-insulator-semiconductor junction. *Journal of Applied Physics*, 68(7), 3475-3483.

- Sato, K., & Yasamura, Y. (1986). A novel method for determining ideality factor and barrier height in Schottky diodes. *Solid-State Electronics*, 29(1), 1-5.
- Szatkowski, J., & Sieranski, K. (1988). Interface effects on Mg-Zn₃P₂ Schottky diodes. *Solid-State Electronics*, 31(2), 257-260.
- Sze, S. M. (1981). *Semiconductor Devices and Physics* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Sze, S. M., & Kwok, K. K. (2007). *Physics of semiconductor devices*. John Wiley & Sons.
- Tatar, D. (2015). *Spray pyrolysis yöntemi ile farklı altlık sıcaklığında elde edilen SnO₂ ve SnO₂:F ince filmlerin bazı fiziksel özelliklerine, altlık sıcaklığının etkisinin araştırılması* (Doktora Tezi). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Tietz, L. A., Carter, C. B., Lathrop, D. K., Russek, S. E., Buhrman, R. A., & Michael, J. R. (1989). Crystallography of YBa₂Cu₃O_{6+x} thin film-substrate interfaces. *Journal of Materials Research*, 4(5), 1072-1081.
- Verma, A., Khan, F., Kumar, D., Kar, M., Chakravarty, B. C., Singh, S. N., & Husain, M. (2010). Sol-gel derived aluminum doped zinc oxide for application as anti-reflection coating in terrestrial silicon solar cells. *Thin Solid Films*, 518(10), 2649-2653.
- Xu, G., Zhang, Y. W., Liao, C. S., & Yan, C. H. (2004). Grain size-dependent electrical conductivity in scandia-stabilized zirconia prepared by a mild urea-based hydrothermal method. *Solid State Ionics*, 166(3-4), 391-396.
- Zhang, Y. W., Yan, Z. G., Liao, F. H., Liao, C. S., & Yan, C. H. (2004). Citrate gel synthesis and characterization of (ZrO₂)_{0.85} (REO_{1.5})_{0.15} (RE= Y, Sc) solid solutions. *Materials Research Bulletin*, 39(11), 1763-1777.