



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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TELLÜROKSİT (TeO_2) ARAYÜZEYE SAHİP MOS YAPILARIN
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ**

Ebru DÖNMEZ

**Temmuz-2024
BATMAN**

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TELLÜROKSİT (TeO_2) ARAYÜZEYE SAHİP MOS YAPILARIN
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ**

Ebru DÖNMEZ

**Danışman
Prof. Dr. Osman PAKMA**

**Temmuz-2024
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Ebru DÖNMEZ tarafından hazırlanan “Tellüroksit (TeO₂) Arayüzeye Sahip MOS Yapıların Elektriksel Özelliklerin İncelenmesi” adlı tez çalışması 04/07/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim 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

.....

Dr. Öğretim Üyesi Ömer Murat ÖTER
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

İmza

Ebru DÖNMEZ

Tarih: 04.07.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TELLÜROKSİT (TeO_2) ARAYÜZEYE SAHİP MOS YAPILARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ

Ebru DÖNMEZ

Batman Üniversitesi Lisansüstü Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Osman PAKMA

2024, 74 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

Prof. Dr. Osman PAKMA

Doç. Dr. Şadan ÖZDEN

Bu tez çalışmasında tellüroksit (TeO_2) malzemesi metal/yarıiletken arayüzeyine termal buharlaştırma metoduyla katkılanarak $\text{Al}/\text{TeO}_2/\text{p-Si}$ metal/oksit/yarıiletken (MOS) yapısı elde edilmiştir. Öncelikle $\text{TeO}_2/\text{p-Si}$ oksit tabakasının X-ışını kırınım (XRD) metoduyla kristal yönelimleri tayin edilmiştir. Elde edilen $\text{Al}/\text{TeO}_2/\text{p-Si}$ (MOS) yapısının oda sıcaklığında ve karanlık altındaki elektriksel karakterizasyonları akım-gerilim (I - V) ve kapasite-gerilim (C - V) ölçümleri ile gerçekleştirilmiştir. I - V sonuçlarından idealite faktörü (n) değeri 1,55 ve sıfır beslem engel yüksekliği (Φ_B) değeri de 0,76 eV olarak hesaplanmıştır. Yapımızın idealite faktörü değerinin 1'den büyük çıkması $\text{Al}/\text{p-Si}$ arasındaki oksit arayüzey filminin varlığı ve arayüzey durum dağılımları, ayrıca da p-Si yarıiletken tabakasının nötral bölgesinin seri direncinin yüksek olması ideallikten sapmaya atfedilmiştir. Norde ve Cheung metoduyla da seri direnç (R_s) analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca $\text{Al}/\text{TeO}_2/\text{p-Si}$ (MOS) yapımızın frekansa bağlı C - V ve iletkenlik-gerilim (G - V) değişimleri incelenmiştir. Tüm sonuçlar literatür ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Sonuç olarak; tellüroksit (TeO_2) oksit malzemesi, aygıt teknolojisinde kullanılan silisyumoksit malzemesine alternatif malzemelere potansiyeldir.

Anahtar Kelimeler: Akım, Gerilim, Kapasite, MOS, seri direnç, tellüroksit.

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF ELECTRICAL PROPERTIES OF MOS STRUCTURES WITH TELLUROXIDE (TeO₂) INTERFACE

Ebru DÖNMEZ

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
BATMAN UNIVERSITY**

Advisor: Prof. Dr. Osman PAKMA

2024, 74 Pages

Jury

Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

Prof. Dr. Osman PAKMA

Assoc. Prof. Dr. Şadan ÖZDEN

In this thesis study, Al/TeO₂/p-Si metal/oxide/semiconductor (MOS) structure was obtained by doping telluroxide (TeO₂) material to the metal/semiconductor interface by thermal evaporation method. First of all, the crystal orientations of the TeO₂/p-Si oxide layer were determined by the X-ray diffraction (XRD) method. Electrical characterization of the obtained Al/TeO₂/p-Si (MOS) structure at room temperature and in the dark was carried out by current-voltage (*I-V*) and capacitance-voltage (*C-V*) measurements. From the *I-V* results, the ideality factor (*n*) value was calculated as 1.55 and the zero supply barrier height (Φ_B) value was calculated as 0.76 eV. The fact that the ideality factor value of our structure is greater than 1 is attributed to the deviation from ideality due to the presence of the oxide interface film between Al/p-Si and the interfacial state distributions, as well as the high series resistance of the neutral region of the p-Si semiconductor layer. Series resistance (*R_s*) analyzes were also carried out using the Norde and Cheung method. Additionally, frequency-dependent *C-V* and conductivity-voltage (*G-V*) changes of our Al/TeO₂/p-Si (MOS) structure were examined. All results were interpreted by comparing them with the literature. In conclusion; telluroxide (TeO₂) oxide material is a potential alternative material to silicon oxide material used in device technology.

Keywords: Capacitance, current, voltage, MOS, series resistance, telluroxide.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca beni her daim yönlendiren, desteklerini esirgemeyen, bilgi birikimiyle yolumu aydınlatan saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Osman Pakma'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca araştırmamda gerekli ölçüm ve analizlerde desteklerinden ve yardımlarından dolayı Doç. Dr. İshak Afşin Kariper'e, Doç. Dr. Şadan ÖZDEN'e, Doç. Dr. Necmettin Avcı'ya ve Arş.Gör. Dr. Pınar Özden'e çok teşekkür ederim.

Aldığım kararları her zaman destekleyen anneme ve babama ayrıca çalışmam boyunca bana yardımcı olan Özlem DÖNMEZ, Hilal DÖNMEZ ve Berfin KAYA'ya teşekkür ederim.

Ebru DÖNMEZ
BATMAN-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Kristal Yapılar.....	3
2.1.1. Kristal sistemler ve Bravais örgüleri	3
2.1.2. Kristal Düzenkeleri	4
2.2. Metal/Yarıiletken (MS) Kontaklar.....	6
2.2.1. Metal/n-tipi yarıiletken kontaklar	7
2.2.2. Metal-p tipi yarıiletken kontaklar	8
2.3. Metal/Oksit/Yarıiletken Yapılar	9
2.3.1. İdeal MOS yapılar.....	9
2.3.1.1. Yığılma	12
2.3.1.2. Tüketim.....	13
2.3.1.3. Tersinim	14
2.4. MS ve MOS Yapılarda Akım İletim Mekanizmaları.....	14
2.4.1. Termoionik emisyon teorisi	14
2.4.1. Difüzyon teorisi	16
2.5. İdealite Faktörü	18
2.5.1. İdeal durumlarda sapma nedenleri	19
2.6. İnce Filmlerde Yapısal Analiz	27
2.6.1. X-Işını Kırınım Deseni (XRD) Metodu.....	27
2.7. İnce Film Elde Etme Metodları	28
2.7.1. Termal Buharlaştırma Yöntemi	28
2.7.2. Saçtırma Yöntemi	30
2.7.3. Kimyasal püskürtme yöntemi	32
2.7.4. Langmuir-Blodgett (LB) yöntemi.....	33
2.7.5. Kimyasal banyo depolama yöntemi.....	34
2.7.6. Sol-Jel Kaplama Yöntemi	35
2.8. Tellüroksit (TeO ₂).....	38
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	40
3.1. Al/TeO ₂ /p-Si (MOS) Yapılarının Oluşturulması	40
3.1.1. Silisyum tutucularının hazırlanması	40
3.1.2. TeO ₂ ince filmin Silisyum tutucu yüzeylere kaplanması.....	41
3.1.3. Al/TeO ₂ /p-Si (MOS) Yapılarının Oluşturulması	42
3.2. Deneylerde Kullanılan Aletler	42
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	45
4.1. XRD Sonuçları.....	45
4.2. Al/TeO ₂ /p-Si (MOS) Yapısının Akım-Gerilim (I-V) Sonuçları.....	46
4.2.1. Seri Direnç Hesaplama	48
4.3. Kapasite-Gerilim (C-V) Sonuçları.....	52
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	54
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	60

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Kristal örgü	4
Şekil 2.2. Bravais örgüleri	5
Şekil 2.3. ($\phi_M > \phi_S$) metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu halinde (a) Kontak öncesi metal ile yarıiletken enerji-bant diyagramı, (b) Kontak sonrası termal denge durumunu gösteren enerji-bant diyagramı, (c) İleri beslem durumunda enerji-bant diyagramı, (d) Ters beslem durumunda enerji-bant diyagramı.	7
Şekil 2.4. ($\phi_M < \phi_S$) metal/n-tipi yarıiletken omik kontak durumunda, (a) Kontak öncesi metal ile yarıiletken enerji-bant diyagramı, (b) Kontak sonrası termal denge durumunu gösteren enerji-bant diyagramı, (c) İleri beslem durumunda enerji-bant diyagramı, (d) Ters beslem durumunda enerji-bant diyagramı..	8
Şekil 2.5. Metal/oksit/yarıiletken (MOS) yapısı ve eşdeğer devresinin birlikte gösterimi	9
Şekil 2.6. Bir MOS yapısının kapasitans gösterimi, (d_{ox} : oksit tabakanın kalınlığı V : metal yüzeye uygulanan gerilim)	10
Şekil 2.7. Denge halinde ideal MOS yapısının enerji-bant diyagramı; (a) p-tipi yarıiletken, (b) n-tipi yarıiletken.....	12
Şekil 2.8. İdeal MOS yapısının üç farklı şekildeki eşdeğer devresi (a) yığılma, (b) tüketim ve (c) tersinim	12
Şekil 2.9. Arayüzey tabakalara gerilim uygulandığında ideal bir MOS yapısının enerji-bant diyagramları; (a) Yığılma, (b) Tükenim ve (c) Tersinim	13
Şekil 2.10. Kristal yapının üstüne giden X-Işını demetinin ekranda oluşan görüntüsü .	28
Şekil 2.11. Rezistans ısıtıcı ile buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi	29
Şekil 2.12. Termal buharlaştırma yönteminde kullanılan buharlaştırma kaynakları	30
Şekil 2.13. Saçtırma metodun gösterimi	31
Şekil 2.14. Püskürtme metodunun şematik gösterimi	32
Şekil 2.15. Stearik asit ($C_{17}H_{35}CO_2H$)’in molekül yapısı.	34
Şekil 2.16. Kimyasal banyo depolamanın sistemi	35
Şekil 2.17. Sol-jel tekniği süreçleri	38
Şekil 2.18. TeO_2	39

Şekil 3.1. Nanovak NVTH-350 Termal buharlaştırma cihazı	41
Şekil 3.2. Al/TeO ₂ /p-Si (MOS) yapısı	42
Şekil 3.3. X-Işını kırınımı (XRD) cihazı	43
Şekil 3.4. 0-1200 °C ayarlı Protherm PTF 12/75/800 tüp fırın	43
Şekil 3.5. MOS yapıların elektriksel ölçümlerin gerçekleştirildiği kapalı kutu	44
Şekil 3.6. Keithley 4200 SCS yarıiletken karakterizasyon cihazı	44
Şekil 4.1. p-Si yüzeyine kaplı TeO ₂ ince film XRD desenleri	45
Şekil 4.2. Al/TeO ₂ /p-Si (MOS) yapısının $LnI-V$ grafiği	47
Şekil 4.3. Al/TeO ₂ /p-Si (MOS) yapısının Norde grafiği	49
Şekil 4.4. Al/TeO ₂ /p-Si (MOS) yapısının $dV/d(LnI)-I$ grafiği	51
Şekil 4.5. Al/TeO ₂ /p-Si (MOS) yapısının $H(I)-I$ grafiği	51
Şekil 4.6. Farklı frekanslardaki Al/TeO ₂ /p-Si (MOS) yapısının oda sıcaklığında (a) $C-V$ (b) G/V eğrileri	53

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 2. 1. Kristal sistemleri ve Bravais örgüleri	6
Çizelge 2.2. Sol-jel yönteminin kullanıldığı yerler	36
Çizelge 4.1. XRD desenlerinden bulunan veriler	46
Çizelge 4.2. Al/TeO ₂ /p-Si (MOS) yapısının <i>I-V</i> ölçümünden hesaplanmış elektriksel parametre değerleri	52

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

M	: Elektron Mobilitesi
δ	: Ara yüzeyler arasında meydana gelen yalıtkan bölge kalınlığı
A^*	: Richordon sabiti
A	: Diyot kontak bölgesi
Al	: alüminyum
a	: soğurma katsayısı
a,b,c	: kristal örgü parametreleri
C	: Kapasite
C_i	: Arayüzey tabaka kapasitesi
$^{\circ}C$	: santigrat derece
d	: Uzay yükü bölgesinin genişliği
D_n	: Elektron geçişme sabiti
$E(x)$	: Pozisyona bağlı elektrik alan
e	: elektron yükü
E_c	: İletkenlik bandının tabanı
E_F	: Fermi enerji seviyesi Yarıiletkenin dielektrik sabiti
E_g	: yarıiletkenin yasak enerji aralığı
E_o	: Boşluğun dielektrik sabiti
E_s	: Yarıiletkenin dielektrik sabiti
eV	: Elektron volt
E_v	: Valans bandı
G_m	: Biriktirme bölgesinde ölçülen maksimum iletkenlik
H	: plank sabiti
$h(t)$	: film kalınlığı
I_o	: Ters beslem akımı
J_{SD}	: doyunluk akımı
k_B	: Boltzmann sabiti
m^*	: elektron veya boşluğun etkin kütlesi
m	: Kütle
N	: X-Işınlarının dalga boyu

$n(x)$	: Elektron yoğunluğu
n	: İdealite faktörü
N	: Mol
N_c	: İletkenlik bandındaki hacim başına düşen izinli enerji hallerinin yoğunluğu
N_D	: verici katkı atomlarının yoğunluğu
N_{sa}	: Metal ile dengede olan arayüzey durum yoğunluğu
N_{sb}	: Yarıiletken ile dengede olan durum yoğunluğu
N_{ss}	: Ara yüz durumları
(h,k,l)	: Miller indisleri
K	: Dielektrik sabiti
$^{\circ}K$	: kelvin
q	: Elektrik yükü
R_s	: Seri direnç
SiO_2	: Silisyum oksit
T	: Mutlak sıcaklık
t	: zaman
V_D	: Geçişme potansiyeli
V_G	: Metal yüzeye uygulanan gerilim
V_{Ox}	: Yalıtkan oksit yüzey üzerine düşen gerilim
V_R	: Geri beslem gerilimi
Te	: Tellür
TeO_2	: Tellüroksit
Σ	: İletkenlik
W	: Deplasyon bölgesi
Ω	: Açısal frekans
X	: Yarıiletkenin elektron ilgisi
φ_M	: metalin iş fonksiyonu
Φ_n	: n- tipi yarıiletkenin iş fonksiyonu
φ_p	: p-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonu
ϕ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
ϵ_s	: Yarıiletkenlerin dielektrik geçirgenliği
ϵ_i	: Oksit tabakasının genişliği

Kısaltmalar

AFM	: Atomik kuvvet mikroskobu
C- F	: Kapasite – frekans
C- V	: Kapasite - g erilim
DLS	: Dinamik Işık saçılımı spektrometresi
DC	: Doğru akım
EV	: Elektron volt
I – V	: Akım-gerilim
LB	: Langmuir-Blodgett
MOS	: Metal- Oksit- yarıiletken kontak
MS	: Metal -yarıiletken kontak
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
TE	: Termiyonik emisyon kuramı
TED	: Termiyonik emisyon-difüzyon kuramı
UV-VİS	: Görünür ultraviyole
XRD	: X-Işını kırınım deseni

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze, elektronik devre elemanlarının bulunmasıyla teknoloji hızla ilerlemiştir. Kullandığımız cep telefonu, bilgisayar vb. birçok elektronik cihazda bu devre elemanları fazlaca bulunmaktadır. Yarıiletken teknolojisiyle temellenen mikro boyuttaki bu devre elemanları, teknolojinin gelişmesiyle yapıların içerisine milyonlarcası sığdırılabilir (Ersanlı, 2004). Bu yarıiletken elemanlara örnek diyot, işlemci, sensör, güneş hücresi ve alan etkili transistörler vs. gösterilebilir.

Yarıiletken devre elemanlarında kullanılan oksit malzemeler; yüksek optiksel geçirgenliğe, yüksek dielektrik katsayısına ve düşük iletkenliğe sahiptir. Günümüz teknolojisinde en fazla yararlanılan oksit malzemelerinden birisi de silisyum dioksit (SiO_2)'dir (Kalem, 2003). Yapısı amorf olarak bilinen SiO_2 'in dielektrik sabiti 3,9'dur. SiO_2 'in bant aralığı ise 8,9-9,0 eV arasında bir değer alır (Robertson ve Chen, 1999; Robertson, 2000). SiO_2 malzemeye alternatif oksit malzeme tellür dioksit (TeO_2) gösterilebilir. TeO_2 , tellür elementinin en kararlı oksididir ve erime noktası 773 °C'dir. Tellürün geçiş elementi olması araştırmalarda kullanılmasını olanak sağlar. TeO_2 kararlılık özelliğinde olması son yıllarda araştırmacıların ilgisini çekmiştir (Aynıbal, 2009). TeO_2 daha çok piezoelektrik özellikleriyle bilinen geniş bant aralığına sahip yarı iletken bir malzemedir. TeO_2 malzeme saptırıcılar, deflektörler, flasterler, gaz sensörler, özel elektrooptik modülatörler ve ayarlanabilir filtreler gibi birçok optik cihazlarda kullanılır. TeO_2 bazlı camlar ise, yüksek kırılma indisi ve yüksek Raman kazancı nedeniyle optik dalga kılavuzlarında ve optik fiberlerde kullanılır (Binnig vd., 1986; Kutlu, 2012). Ayrıca TeO_2 optik cihazların amplifikatörleri ve anahtarlama performansı için potansiyel bir madde olarak kabul edilir. Çünkü büyük doğrusal olmayan polarize edilebilirlik ve uyarılmış Raman saçılması (SRS) için geniş bir tesir kesitine sahiptir.

Bu tez çalışmasında termal buharlaştırma metoduyla p-Si alttaş yüzeylere kaplanmış TeO_2 ince film kaplı yüzey analizi X-ışını kırınım desenleri (XRD) ile incelenmiştir. Yine TeO_2 /p-Si yapısına gerekli omik ve doğrultucu kontaklar yapılarak Al/ TeO_2 /p-Si metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapısı oluşturulmuştur. Elde edilen Al/ TeO_2 /p-Si (MOS) yapısının elektriksel özellikleri; karanlık ve oda sıcaklığı altında akım-gerilim (I - V) ve kapasitans-gerilim (C - V) ölçümleri alınarak yapılmıştır. Al/ TeO_2 /p-Si (MOS) yapısının oda sıcaklığı altındaki I - V ölçümlerinden idealite faktörü (n), doyum akım yoğunluğu (I_0) ve engel yüksekliği (ϕ_B) parametreleri hesaplanmıştır. Analizlenen parametre değerleri MOS yapısının seri direnç (R_s) etkileri de ilave

edilerek çeşitli metotlar ile belirlenmiştir. Al/TeO₂/p-Si (MOS) yapısının oda sıcaklığı altındaki empedans ölçümlerinden kapasitans-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G-V) eğimleri de incelenerek yorumlanmıştır. Sonuç olarak TeO₂ arayüzeye sahip MOS yapısındaki belirlenen elektriksel parametre değişimleri raporlanmış ve literatür ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

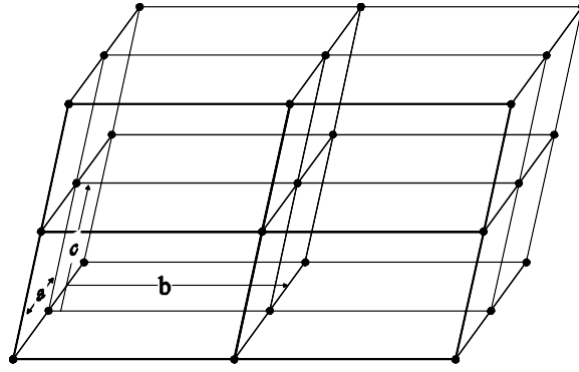
2.1. Kristal Yapılar

Kristal yapılar, atomların bilinen üç boyutlu belirli bir modüler düzenine göre oluşan yapıdır. Bu diziliş tekrar eden bir yapıya sahiptir. Kristal yapılar üzerine 18. yüzyıldan beri çalışmalar yapılmıştır. Sir William Lawrence Bragg ilk kez X-Işınlardan yararlanarak kaya tuzu kristalinin yapısını incelemiş ve kristalin atomik yapısıyla ilgili önemli bir girişimde bulunmuştur. Bu yöntemle araştırmacılar kristali oluşturan birim hücreyi bulmuşlardır. Bu hücre kristal yapının tüm özelliklerini taşır. Kristaller düğüm noktasının atomlar topluluğu olan örgü yapısıyla tarif edilir. Düğüm noktasında olan atomlar topluluğu baz olarak tanımlanır. Kristalin uzayda bazın periyodik bir şekilde kendini tekrarlanması sonucu oluşan yapıya denir. Eğer tekrarlama yoksa bu yapıya amorf yapı denir (Kılıç, 2016).

İlk zamanlarda X-Işınları ile devam edilen bu çalışmalar ilerleyen zamanlarda nötron ve elektron kırınım çalışmaları devamı sağlanmıştır. Ve bu yöntemle besin maddelerin minerallerin, metallerin, ilaçların, fiber ve plastik türü maddelerin inorganik ve organik materyalin atomik yapısını incelemesine imkân tanımıştır. Kristalleri; çözme, anlama bilimine kristalografi denir. Kristal olan maddelerin şekillerini ve yapılarını araştırır. Kristalografi; kimya, fizik, seramik, metalürji gibi birçok alanda sorunların çözümünde görev alır (Aytuğ, 2020).

2.1.1. Kristal sistemler ve Bravais örgüleri

Kristaller üç bölümden oluşur. Bunlar tekli (mono) kristal, çoklu (poli) kristal ve toz kristaldir. Tekli kristal atom ya da atom toplulukların sürekli bir şekilde belli plan doğrultuda tekrarlanarak oluşturdukları madde olarak belirtilir. Yemek tuzu tanecikleri, elması, kuvarısı, şeker taneciklerini tekli kristale örnek verebiliriz. Tekli kristallerin dağınık yığılmasıyla oluşmuş maddelere çoklu kristal denir. Toprak, taş, metal parçaları vb. gibi maddeleri hayatımızda rastladığımız pek çok maddelere çoklu kristal denir. Toz kristal ise tek kristal ya da çoklu kristalin öğütülmesi sonucu meydana gelir. Kristal yapıların çok küçük hacimli birimine hücre denilmektedir. Hücrenin kristali örgü ötelenmesiyle, vektörü ve doğrultusunda birer birer modüler şeklinde ötelenme sonucunda kristal yapı meydana gelir (Kaluznz vd., 2002).



Şekil 2.1. Kristal örgü.

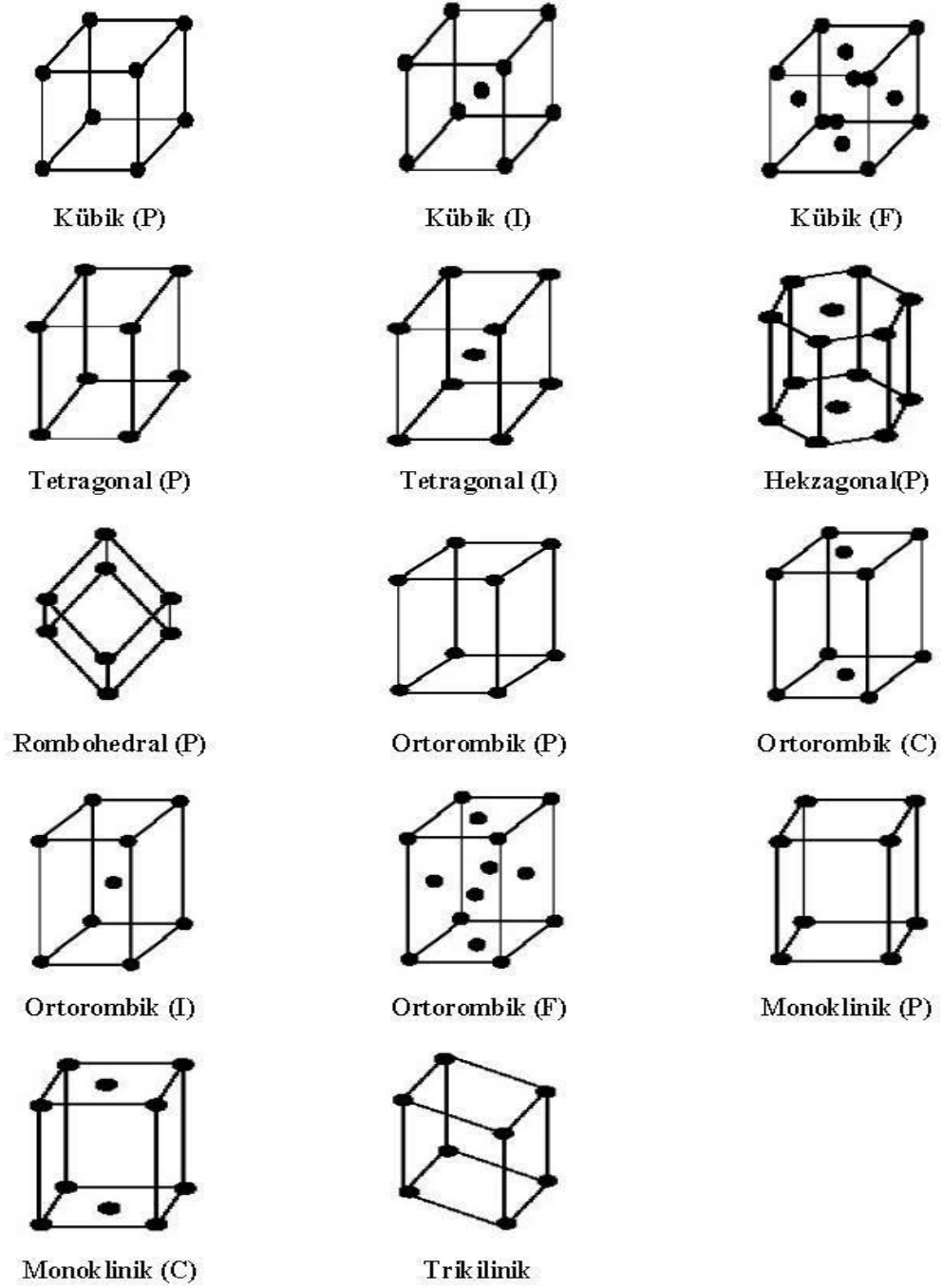
Ardışık kristal boyunca aşağıda verilen vektör ile yer değişimi sağlanarak şu şekilde izah edilir:

$$\mathbf{r} = \mathcal{U}\mathbf{a} + \mathcal{V}\mathbf{b} + \mathcal{W}\mathbf{c} \quad (2.1)$$

Burada gösterilen $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{c}$ öteleme vektörleri; $\mathcal{U}$, $\mathcal{V}$, $\mathcal{W}$ ise tam sayı olarak adlandırılır. Bu yöntemle bir vektör ile bağlantısı olan sonsuz bir kristal iki nokta saptanıp oraya bakıldığında aynı görünür.

2.1.2. Kristal düzenekleri

Uzay örgülerini ilk olarak Frankenheim 1835 yılında açıklamış ve kristal örgü düzeneklerinin on beş tane olacağını söylemiştir. Daha sonra Bravais tarafından bu rakam on dörde düşürülmüştür. Şekil 2.2’de Bravais adıyla anılan bu örgülerin birim hücreleri açıklanmıştır. Kenarları $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{c}$ olup birbirinden farklı boyut ve biçimindeki hücrelerin α , β , γ olan açıları belirtilmiştir. Bu açılar sırayla $\mathbf{a}$ - $\mathbf{c}$, $\mathbf{b}$ - $\mathbf{c}$, $\mathbf{a}$ - $\mathbf{b}$ eksenleri ile arasında yer alır. Çizelge 2.1’de gösterilen hücreler Bravais örgüleriyle açıklanmaktadır (Altınparmak, 2019).



Şekil 2.2. Bravais örgüleri.

Çizelge 2. 1. Kristal sistemleri ve Bravais örgüleri.

Sistem	Eksen Uzunlukları ve açıları	Bravais Örgüsü	Örgü Sembolü
Kübik	Eksenlerin üçü de birbirine eşittir. $a=b=c, \alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	Basit Hacim merkezli Yüzey merkezli	P I F
Tetragonal	Eksenlerin ikisi birbirine eşittir. $a=b \neq c, \alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	Basit Hacim merkezli	P I
Ortorombik	Eksenlerin üçüde birbirine eşit değildir. Açılar 90° 'ye eşit değildir. $a \neq b \neq c, \alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	Basit Hacim merkezli Taban merkezli Yüzey merkezli	P I C F
Rombohedral	Eksenlerin hepsi birbirine eşittir. Açıların hepsi birbirine eşittir. $a=b=c, \alpha=\beta=\gamma \neq 90^\circ$	Basit	R
Hekzagonal	Eksenlerin ikisi birbirine eşittir. Açılardan ikisi 90° , üçüncüsü 120° 'dir. $a=b \neq c, \alpha=\beta=90^\circ, \gamma=120^\circ$ 'dir.	Basit	P
Monoklinik	Eksenlerin üçü de birbirine eşit değildir. Açılardan ikisi birbirine eşittir. Ve 90° 'dir. $a \neq b \neq c, \alpha=\gamma=90^\circ \neq \beta$	Basit Taban Merkezli	P C
Triklinik	Eksenlerin üçü de birbirine eşit değildir. Açıların üçü de birbirine eşit değildir. $a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	Basit	P

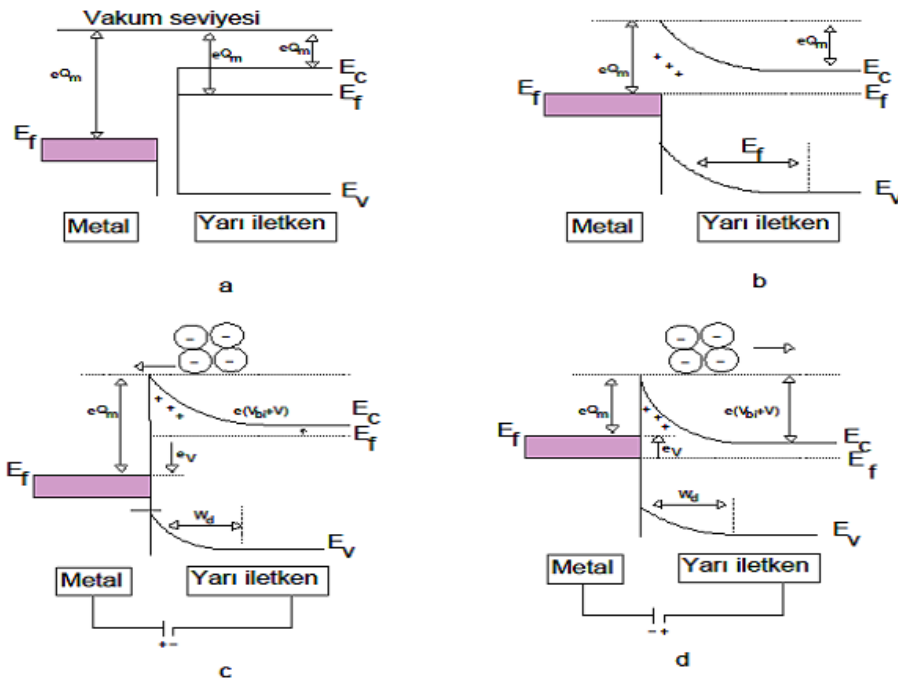
2.2. Metal/yarıiletken (MS) Kontaklar

Metal/yarıiletken temas haline getirildiğinde bu yapıya metal/yarıiletken kontak (MS) veya Schottky kontağı ismi verilir. Metal/yarıiletken kontakların iletkenlik durumlarını izlemek amacıyla yararlı kontakların oluşumu sağlanmalıdır. Metal ve yarıiletken maddeler eklemlendirmek istenildiğinde bunların iletkenlik özelliklerini inceleyebilmek için bu maddelerin bazı koşullara uygun olması gereklidir. Örneğin; kontak meydana geldiğinde kullanılan iki materyalin Fermi seviyelerinin ısısal dengede uyuma zorunluluğu olmalıdır. Bu nedenle kontak durumunda her iki maddeden Fermi seviyeleri eşitleninceye kadar geçen sürede bir yönden diğer yöne akacak bir şekilde elektron geçişi gerçekleşir. Oluşan bu yeni yük dağılımıyla bir potansiyel engel oluşur.

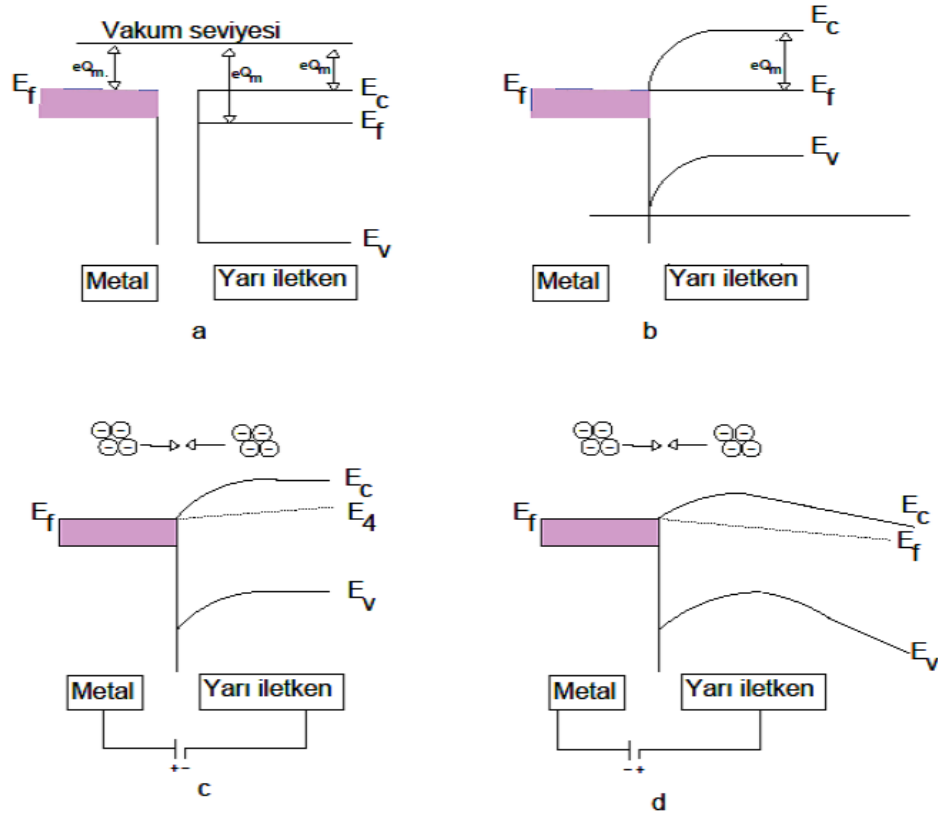
Bu potansiyel engel omik kontak ya da doğrultucu kontak olacak şekilde meydana gelir. Hangi durumun oluşacağı yarıiletken malzemenin cinsi, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonu vb. özellikleri ile tespit edilir.

2.2.1. Metal/n-tipi yarıiletken kontaklar

Metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda metalin iş fonksiyonu (ϕ_M), yarıiletkenin iş fonksiyonundan (ϕ_s) büyük olursa bu ara bölümde potansiyel engel oluşur. Bu bölgeye doğrultucu kontak ya da Schottky kontak ismi verilir. Şayet kontağa gerilim uygulanırsa kontak bölgesinde bir taraftan akım geçerken diğer taraftan ise potansiyel engeli olduğundan akım geçmez. Bu sebeple tek yönde akım doğrultucu olarak görev alır ($\phi_M > \phi_s$). Diğer durumda ise metalin iş fonksiyonu (ϕ_M), yarıiletkenin iş fonksiyonu (ϕ_s) küçük olursa; oluşan yapıya omik kontak ismi verilir. Temas eden ara bölgede potansiyel engel meydana gelmez ve akım bu bölgede iki yöne doğru geçer ($\phi_M < \phi_s$).



Şekil 2.3. ($\phi_M > \phi_s$) metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu halinde (a) Kontakt öncesi metal ile yarıiletken enerji-bant diyagramı, (b) Kontakt sonrası termal denge durumunu gösteren enerji-bant diyagramı, (c) İleri beslem durumunda enerji-bant diyagramı, (d) Ters beslem durumunda enerji-bant diyagramı.



Şekil 2.4. ($\phi_M < \phi_s$) metal/n-tipi yarıiletken omik kontak durumunda, (a) Kontak öncesi metal ile yarıiletken enerji-bant diyagramı, (b) Kontak sonrası termal denge durumunu gösteren enerji-bant diyagramı, (c) İleri beslem durumunda enerji-bant diyagramı, (d) Ters beslem durumunda enerji-bant diyagramı.

2.2.2. Metal/p-tipi yarıiletken kontaklar

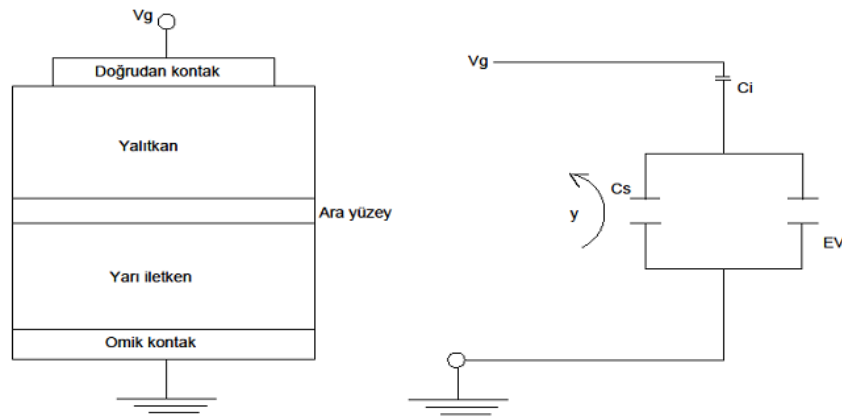
Metal/p-tipi yarıiletken kontaklarda, metalin sahip olduğu iş fonksiyonu değeri yarıiletkenin iş fonksiyonu değerinden küçük olur ise ($\phi_M < \phi_s$) bir potansiyel engeli meydana gelir. Bu tip kontağa doğrultucu kontak ya da Schottky kontağı adı verilir. Gerilim uygulandığında bu ara bölgede bir yönden akım geçerken diğer yönde ise potansiyel engel olduğundan akım geçmez.

Metalin iş fonksiyon değeri yarıiletkenin iş fonksiyonu değerinden büyük olur ise ($\phi_M > \phi_s$) ara bölgede potansiyel engel oluşmaz. Bundan dolayı akım bu bölgede iki tarafa da geçebilir. Oluşan bu tip kontağa omik kontak ismi verilir.

2.3. Metal/Oksit/Yarıiletken (MOS) Yapılar

Metal/oksit/yarıiletken (MOS) yapılı aygıtlar metal-yarıiletken yüzeyler arasında yerleştirilen oksit malzeme ile karakterize yapılıdır. Bu oksit tabaka metal ile yarıiletken arasında kendiliğinden ya da dışardan yapılan bir etki ile oluşturulabilir.

MOS yapılar genelde alttaş silisyum (Si) katman ve bu alttaş katmana kontak yapılmış arka omik kontakten oluşur. İnorganik oksit tabakadan meydana gelen arayüzeye eklenmiş bir metal kontak ile sağlanabilir.



Şekil 2.5. Metal/oksit/yarıiletken (MOS) yapısı ve eşdeğer devresinin birlikte gösterimi.

2.3.1. İdeal MOS yapılar

Birbirine karşı iki ayrı ara yüzey MOS yapılarda olur. Bu yüzeylere baktığımızda biri metal/oksit arayüzeyi, diğeri ise oksit/yarıiletken arayüzeyinden oluşur. Yükler, ideal bir MOS yapısında metalin oksit yüzeyinde ve yarıiletken olan yüzeyine yakın yerde yoğun olur. Oluşan bu yapıya doğru akım (DC) gerilimi uygulanırsa oksit olan bu tabakadan akım geçemez. Fakat bazı hallerde ise MOS yapılarının oksit olan tabakasından akım geçişi olabilir.

İdeal olan bir MOS yapısına gerilim uygulanırsa, yarıiletken yüzeyde yük kayması meydana gelir. Serbest halde olan yük sayısı ile hareketli olan yük sayısı yarıiletken, metallere göre kıyaslırsak daha fazla olur. Fakat gerilim uygulanırsa bu durumu değiştirir. Yarıiletken bölgesinde bulunan arayüzey bantları bükülür ve uzay yükleri ortaya çıkar. Termal denge oluşana kadar verilen gerilim büyüklüğü uzay yükünü gösterir.

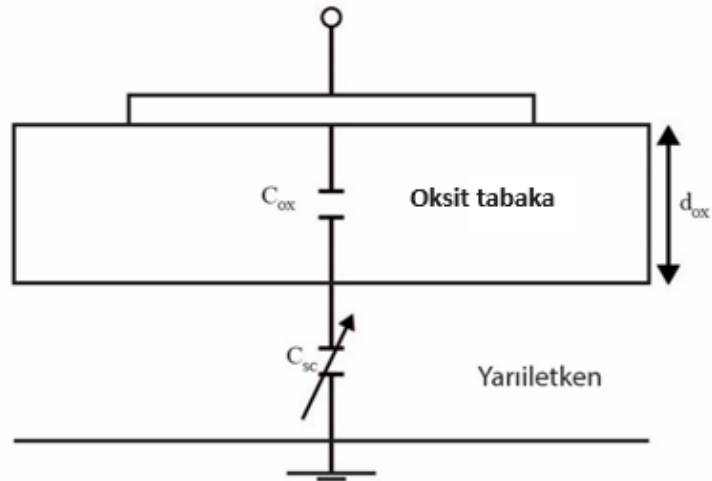
Yarıiletken bölgesinde olan yükler yapılan katkı durumuna göre azınlık ve çoğunluk taşıyıcı durumunda olur. Gerilim uygulanan yükler uzay yükü bölgesi ya da arayüzey bölgesinde yığılmaları oluşturur. Bu yığılmalar şu şekilde formülize edilebilir;

$$V_G = V_{OX} + \psi_s \quad (2.2)$$

V_G : Metal yüzeydeki gerilim

V_{OX} : Oksit yüzey üzerindeki gerilim

Yarıiletken yüzey ile metal yüzey arasında arayüzey tabakasından dolayı bir kapasitans (C) oluşur. MOS kapasitansı olarak bilinen kapasitansın özelliği kullanılan oksit malzeme ile meydana gelen yalıtkan/yarıiletken arayüzeyi tarafından belirlenir. MOS yapısının kapasitans gösterimi şekil 2.6'daki gibidir.



Şekil 2.6. Bir MOS yapısının kapasitans gösterimi, (d_{ox} : oksit tabakanın kalınlığı V : metal yüzeye uygulanan gerilim)

Şekil 2.6'de görüldüğü gibi bir MOS yapısının kapasitans ifadesi:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{SC}} + \frac{1}{C_{OX}} \quad (2.3)$$

C : Bir MOS yapı için kapasitans

C_{SC} : Uzay yükü kapasitansı

C_{OX} : Oksit tabaka kapasitansı

İdeal bir MOS yapısı aşağıdaki özellikleri barındırmalıdır;

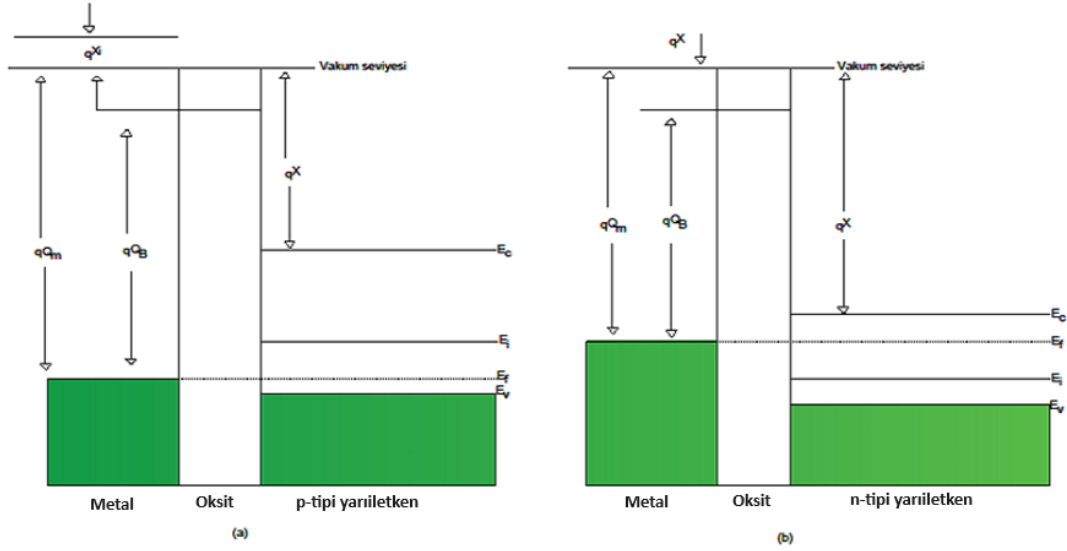
- 1) İdeal bir MOS yapısının denge durumunda metalin iş fonksiyonu (Φ_m) ile yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) arasındaki fark sıfır olmalıdır.

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \phi_B \right) = 0 \quad \text{n-tipi} \quad (2.4)$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \phi_B \right) = 0 \quad \text{p-tipi} \quad (2.5)$$

Burada $\phi_{ms}=0$ ve ϕ_B Fermi düzeyi ile saf yarıiletken için Fermi enerji düzeyi arasındaki enerji farkını vermektedir.

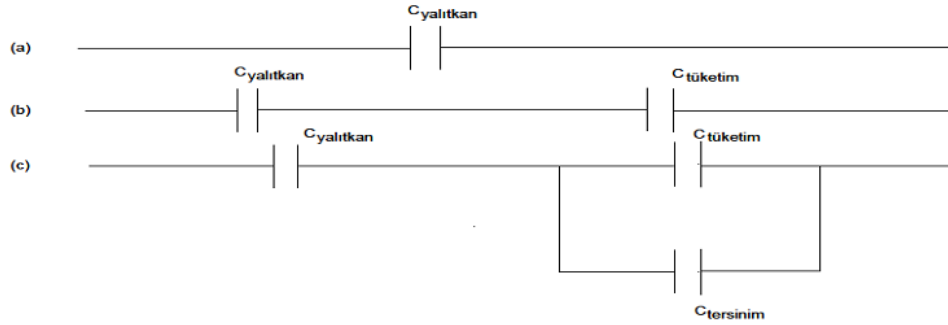
- 2) Metal ile yarıiletken katman arasındaki oksit arayüzeyinin bant genişliği (δ) büyüktür ve bu nedenle bu oksit tabaka ideal bir dielektrik gibi görev görür. Oksit bölgede ve oksit/yarıiletken arayüzeyinde tuzaklar ve sabit-hareketli yükler bulunmaz. Gerçekte MOS yapılarda, yerleşmiş durumlar, bu yarıiletken/oksit bölgede vardır ve bu nedenle ideal yapılardan farklıdır. İdeal MOS yapılarda oksit/yarıiletken arayüzlerinde arayüzey durumları ve arayüzey yükleri bulunmamaktadır.
- 3) Oksit arayüzey bölge genişliği (δ) çok büyüktür ve bu yüzden iletkenlik bandındaki yük taşıyıcı yoğunluğu ihmal edilir.
- 4) Oksit bölgede DC gerilimde yük geçişi olmaz ve ilgili bölge sonsuz direnç gibi davranır.
- 5) Herhangi bir gerilimde, MOS yapısındaki yükler oksit tabaka ile bitişiktir ve metal ile yarıiletken yüzeydekiler eşit miktarda ancak zıt yük ile yüklüdür.



Şekil 2.7. Denge halinde ideal MOS yapısının enerji-bant diyagramı; (a) p-tipi yarıiletken, (b) n-tipi yarıiletken.

İdeal bir MOS yapıya diyot aygıtını örnek verecek olursak, bu ideal bir MOS diyotta üç farklı eşdeğer davranış sergiler. Bunlar;

1. Yığılma (accumulation)
2. Tükenim (depletion)
3. Tersinim (inversion)

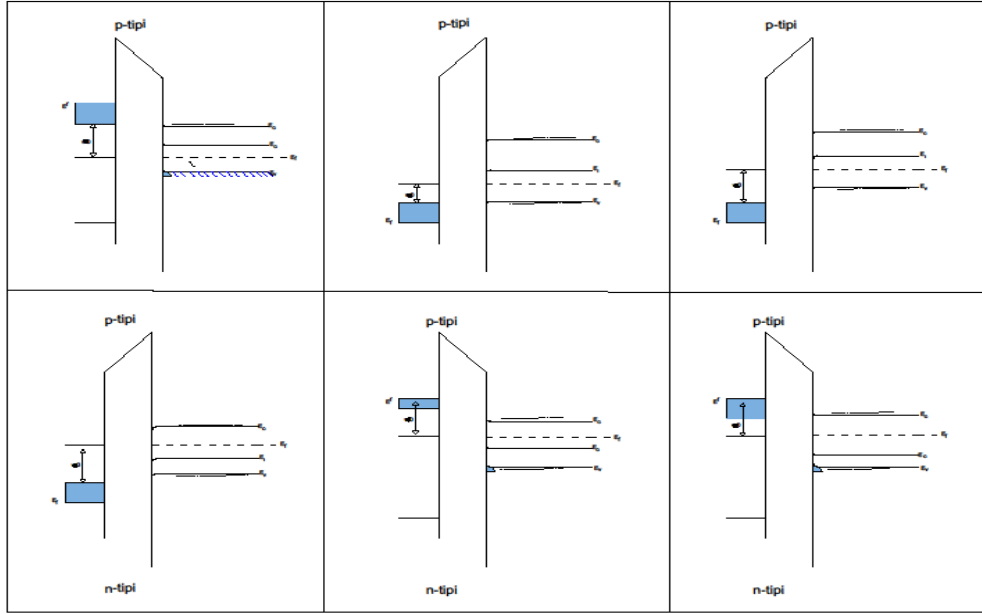


Şekil 2.8. İdeal MOS yapısının üç farklı şekildeki eşdeğer devresi (a) yığılma, (b) tüketim ve (c) tersinim.

2.3.1.1. Yığılma

P-tipi yarıiletkenli MOS yapılarında çoğunluk yük taşıyıcıları boşluklardır. MOS yapısının metal elektrotu ters gerilim ile beslendiğinde yani $V_G < 0$ uygulandığında oluşturulan elektrik alan bu boşlukları yarıiletken arayüzeyine doğru çeker. İdeal yapılarda yük akışı meydana gelmezse Fermi enerji seviyesi yarıiletkeninde değişmez. Taşıyıcı yoğunluğu bu enerji farkına ($E_F - E_V$) üstel olarak bağlıdır ve bu nedenle bant

bükülmesi yarıiletken yüzeyinin yakınlarında boşlukların yığılmasına neden olur. Valans bandı yarıiletken arayüzeyinde Fermi seviyesine yaklaşır. Bunun sonucunda iletkenlik bandı da yukarıya doğru bükülür. Bu duruma “yığılma” adı verilir. Yığılma sonucunda arayüzeyde biriken yük yüzey yükü ile aynıdır ve $C_{SC} \rightarrow \infty$ ve dolayısıyla eşdeğer kapasite de $C \rightarrow C_{OX}$ şeklinde gerçekleşir.



Şekil 2.9. Arayüzey tabakalara gerilim uygulandığında ideal bir MOS yapısının enerji-bant diyagramları;
(a) Yığılma, (b) Tükenim ve (c) Tersinim (Sze, 1981).

2.3.1.2. Tüketim

MOS yapısındaki metal levhaya az miktarda pozitif gerilim ($V_G > 0$) uygulanmasıyla oksit tabakasında oluşan elektrik alan yarıiletkenin yüzeyindeki boşlukları uzaklaştırır. Yarıiletkenin dış yüzeyindeki boşluk yoğunluğu içtekinе göre azalır ve bantlar bundan dolayı aşağıya doğru bükülür. Elektronlar bandın yarıiletkenin yüzeyine yakın yerde birikir. Yarıiletkenin yüzeyinde, gerilim uygulanmasıyla oluşan W büyüklüğünde bir bölümde boşlukların azaldığı tüketim bölgesi oluşur. Meydana geldiği bölüme “tüketim bölgesi” olaya ise “tükenim” denir.

2.3.1.3. Tersinim

Metal levhaya büyük bir pozitif gerilim ($V_G \gg 0$) uygulanırsa bant aşağıya doğru bükülür. Saf haldeki enerjisi E_i , Fermi enerji seviyesinden daha aşağı duruma gelir. Bu nedenle yarıiletkendeki azınlık taşıyıcı durumundaki elektronlar daha fazlalaşır ve elektron yoğunluğu, boşluk yoğunluğundan büyük olur. Bu evreden sonra p-tipi yarıiletken yüzeyi aynı n-tipi yarıiletken olarak davranır. Buna “tersinim” ismi verilmektedir.

2.4. MS ve MOS Yapılarda Akım İletim Mekanizmaları

MS ve MOS yapılarda;

- Ara yüzey durumları (N_{SS})
- Seri direnç (R_S)
- Katkı atomların yoğunluğu (N_A ve N_D)
- Tercih edilen Yarıiletken malzeme
- Sıcaklık
- Uygulanan gerilim(V)

gibi unsurlar akım iletimde önemli etmenlerdir. Akım-iletim mekanizmaları MS ve MOS yapılarda (Sharma ve ark., 1984; Rhoderick ve ark.; 1988; Sze vd., 2007)

:

1. Termiyonik Emisyon Teorisi (TE)
2. Difüzyon Teorisi (DT)
3. Temiyonik Emisyon-Difüzyon Teorisi (TED)
4. Uzay-Yük Bölgesi Rekombinasyonu
5. Kuantum Mekaniksel Tünelleme
6. T_O Etkili Akım İletimi

şeklinde verilir. Çalışmamızla ilgili alakalı olduğu için sadece temiyonik emisyon ve difüzyon kuramları ele alınacaktır.

2.4.1. Termiyonik emisyon teorisi

Shottky kontaklarda sıcaklığı yükseltilerek istenilen ısısal enerjiyi alan elektron

ve boşlukların (yük taşıyıcılar) potansiyel engeli geçerek yarıiletkeniden metale ya da metalden yarıiletkene doğru akışına termiyonik emisyon (TE) denir. Termiyonik emisyon, metal/p-tipi yarıiletken yapılarda yük taşıyıcı olarak boşluklarla, metal/n-tipi yarıiletkenlerde yük taşıyıcısı ise elektronlarda gerçekleşir.

Termiyonik emisyon teorisinin geçerli bir durumda oluşabilmesi için Maxwell-Boltzmann yaklaşımının uygulanabilir olması ve termal dengenin bundan etkilenmemesi için önlem alınmalıdır. Bunun için potansiyel engeli yüksekliği yani $\frac{kBT}{q}$ nin termal enerjisi değerinden daha büyük olduğu kabul edilir ve ayrıca da taşıyıcı çarpışmaları yok kabul edilir (Rhoderick ve Williams, 1988; Sze ve Kwok, 2007). Böylece boşluk ve elektronların kat ettikleri ortalama serbest mesafe, tüketim bölgesinden daha küçük alınmış olur. Toplam akım yoğunluğu (J) her iki yönde meydana gelen akım yoğunluğu toplamına eşittir. Şayet elektronların yoğunluğu ve hızları potansiyel engelini aşmaya yetecek enerjiye sahipse, yarıiletkeniden metale doğru olan akım yoğunluğu ($J_s \rightarrow m$) ve x yönünde iken şu şekilde ifade edilebilir (Sze ve Kwok, 2007);

$$J_{s \rightarrow m} = q \int_{E_F + q\phi_B}^{\infty} V_x dn \quad (2.6)$$

V_x : X yönündeki taşıyıcı hızı

E_F : Fermi enerji düzeyi

d_n : Dar bir enerji aralığındaki elektron yoğunluğu

ϕ_B : Bariyer yüksekliği

Metal/n-tipi yarıiletken yapılarda yarıiletkeniden metale geçen elektron yoğunluğu;

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-q\phi_B}{k_B T} \right] \exp \left(\frac{qV}{k_B T} \right) \quad (2.7)$$

m^* : elektron veya boşluğun etkin kütlesi

h : Planck sabiti

k_B : Boltzmann sabiti

Richardson sabiti A^* denklemde yerine yazılırsa;

$$J_{S \rightarrow m} = A^* T^2 \exp\left[\frac{-q\phi_B}{k_B T}\right] \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) \quad (2.8)$$

olur. Yarıiletkene metal yüzeyden geçen elektronlar değişken bir bariyer engeli ile karşılaşmaz. Gerilim uygulanmasına rağmen yarıiletkene metal yüzeyden doğru olan akım bu gerilimden etkilenmez. Bundan dolayı ($V=0$) denge durumunda olan akım, yarıiletkenden metale doğru olan akıma eşit olmalıdır. Buna göre yarıiletkenden metale doğru olan akım;

$$J_{S \rightarrow m} = A^* T^2 \exp\left[\frac{-q\phi_B}{k_B T}\right] \quad (2.9)$$

şeklinde ifade edilir. Buna göre hem yarıiletkenden metale hem de metalden yarıiletkene doğru olan akım yoğunluğu toplamı;

$$J_n = \left(A^* T^2 \exp\left[\frac{-q\phi_B}{k_B T}\right] \right) \left(\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right) \quad (2.10)$$

eşitliği elde edilmiş olur. Burada $\left(A^* T^2 \exp\left[\frac{-q\phi_B}{k_B T}\right] \right)$ denklemi akım yoğunluğudur (J_0).

2.4.2. Difüzyon kuramı

İki bölge arasında yoğunluk farkından dolayı, yüklerin çok yoğun bölgeden az yoğun bölgeye doğru akması olayına difüzyon veya difüzyon akımı denir. Shottky difüzyon kuramı; elektronları taşıyan enerji potansiyel engelini $\left(\frac{k_B T}{q}\right)$ aşacak yeterlilikte değildir ve bu geçiş aşamasında elektronların çarpışması ihmal edilir. Taşıyıcı derişimleri; $X=0$ ve $W=0$ durumunda termal dengededir. Yarıiletken bölgenin

safsızlık derişimi dejenere değıldir. Shottky difüzyon kuramında boşalan veya tüketilen bölgenin derişimi ve etki sahası bölgeler arasındaki yoğunluk farkına bağılıdır ve bu nedenle debi yoğunluğu denklemi ile ifade edilmelidir. n-tipi yarıiletkenlerden oluşan yapılar için bu debi yoğunluk denklemi;

$$J_x = J_n = q \left[n(x) \mu E(x) + D_n \frac{\partial n}{\partial x} \right] = q D_n \left[\left(\frac{-qn(x)}{k_B T} \right) \left(\frac{\partial v(x)}{\partial x} \right) + \frac{\partial n}{\partial x} \right] \quad (2.11)$$

$n(x)$: Elektron yoğunluğu

μ : Elektron mobilitesi

D_n : Elektron geçişme sabiti

$E(x)$: Elektrik alan

Bu durumda Shottky difüzyon hipotezine göre debi yoğunluğu;

$$J_x = J_{SD} \left[\exp \left(\frac{qV}{k_B T} \right) - 1 \right] \quad (2.12)$$

J_{SD} : Doygunluk akımı

Doygunluk akımı şu şekilde ifade edilebilir;

$$J_{SD} = \left(\frac{q^2 N_C D_n}{k_B T} \right) \left[\frac{2q(V_d - V) N_D}{\epsilon_s} \right]^{\frac{1}{2}} \exp \left(\frac{-q\phi_B}{k_B T} \right) \quad (2.13)$$

eşitliği elde edilir.

N_C : İletkenlik bandındaki hacim başına düşen izinli enerji durumları yoğunluğu

V_D : Geçiş potansiyeli

N_D : Verici katkı atomlarının yoğunluğu

ϵ_s : Yarıiletkenlerin dielektrik geçirgenliği

Buradan şu sonuca ulaşılabilir; termiyonik emisyon kuramı ve difüzyon kuramından ulaşılan eşitlikler benzer olur.

2.5. İdealite Faktörü

İdealite faktörü en basit şekliyle yarıiletken aygıt olan bir diyotun ideal bir durumdan saptığını ifade eden bir parametredir. Genellikle idealite faktörü değeri 1'e yakın olmalıdır. Bu değer büyür ise o aygıtın davranışı idealden o kadar sapmış olur. İdealite faktörü değerinin ideallikten sapması arayüzey arasında oluşan oksit bölgenin kalınlığına (δ) ve arayüzey durumlarının yoğunluğuna (N_{ss}) bağlıdır. Bu bağlılık (Card ve Rhoderick, 1971; Card, 1976) şu şekilde ifade edilir:

$$n = 1 + \frac{\left(\frac{\delta}{\epsilon_i}\right) \left(\frac{\epsilon_s}{W_d + qN_{sb}}\right)}{1 + \left(\frac{\delta}{\epsilon_i}\right) qN_{sa}} \quad (2.14)$$

n : İdealite faktörü

δ : Ara yüzeyler arasında oluşan oksit bölge kalınlığı

ϵ_i : Oksit tabakanın geçirgenliği

ϵ_s : Yarıiletkenin geçirgenliği

N_{sa} : Metal ile denge halinde arayüzey durum yoğunluğu

N_{sb} : Yarıiletken ile denge halinde durum yoğunluğu

W_d : Eklem bölgesinin genişliği

Eşitlik (2.14) arayüzey durumlarının yoğunluk miktarına göre üç farklı şekilde gösterilebilir:

1) Arayüzey durum yoğunluğu küçük olursa;

$$n = 1 + \frac{\delta \epsilon_s}{W_d \epsilon_i} \quad (2.15)$$

olur.

2) Arayüzey durum yoğunluğu metal yüzey ile denge durumunda;

$$n = 1 + \frac{\delta \varepsilon_s}{W_d (\varepsilon_i + \delta q N_{sa})} \quad (2.16)$$

olur.

3) Arayüzey durum yoğunluğu yarı iletken yüzey ile denge durumunda;

$$n = 1 + \left(\frac{\delta}{\varepsilon_i} \right) \left(\frac{\varepsilon_s}{W_d + q N_{sb}} \right) \quad (2.17)$$

olur.

2.5.1. İdeal durumlardan sapma sebepleri

MS ve MOS yapıların elektriksel parametre hesaplamalarında ideal durumdan sapmalar olabilir. İdeal durumdan sapma sebeplerinden bir tanesi seri direnç (R_s) etkisidir. R_s farklı nedenlerle gerçekleşebilir. Bu sapmalara kontakta gelen iletkenler, silisyum kristal ile kontak halinde olan arka omik kontak, bu arka kontak arasında oluşan kirli bir film tabakası veya harici yabancı maddeler, doğrultucu kontakta altındaki silisyum yüzeyinin kenarındaki tüketim, katman ile arka kontak arasındaki gövde direnci, doğrultucu kontakta altındaki silisyumdaki eşit olmayan katkı dağılımı sebep olabilir. Bu etki çeşitli yöntemler kullanılarak azaltılabilir. En yaygın kullanılan yöntem, arka kontakta ısıtma işlemiyle yarıiletken yüzeye biriktirmektir. Bu süreçte “alaşımlama” süreci denir.

Son yıllarda bu tip yapıların R_s değerinin hesaplanması için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden kullanılanlardan bir tanesi Norde tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemin amacı, tanımlanmış orijinal $F(V)$ fonksiyonunu (Norde, 1979) kullanarak $n=1$ durumu için R_s ve ϕ_b belirlemektir. Bu yöntem R_s ve ϕ_b 'nin sıcaklıkla değişmediği durumlara uygulandığı için yalnızca bir sıcaklıkta akım-gerilim

(I - V) eğrisi gerektirir. Norde'den sonra Sato ve Yasamura bu yöntemi geliştirerek n 'in 1'den büyük olduğu durumlarda ($1 < n < 2$), R_s ve ϕ_b 'nin hesaplanabileceğini göstermiştir (Sato ve Yasamura, 1985). Benzer bir çalışma McLean tarafından da yapılmıştır (McLean, 1986). Bohlin, ideal faktörün $1 < n < \delta$ olduğunda Schottky diyotun I - V analizlerinden elde edilen R_s , ϕ_b ve n değerlerinin bulunmasına imkan veren Norde fonksiyonunu yeniden düzenlemiştir (Bohlin, 1986). Ancak bu yöntemle bazı parametrelerin belirlenmesi biraz güçtür. Bir diğer yöntem Cheung'lar tarafından geliştirilmiştir. Cheung'lar tarafından geliştirilen yöntem ile I - V ölçümlerinden elde edilen fonksiyonları kullanarak R_s hesaplamak daha basittir (Cheung ve Cheung, 1986). Uygulanan gerilimin (V) tamamı diyot üzerine düşmediğinden ideal durumdan sapmalar mümkündür.

Norde yöntemine göre $n=1$ durumunda $F(V)$ fonksiyonu tanımlıdır. Yani bu fonksiyon R_s ve ϕ_b 'i tanımlamaktadır. Ayrıca bu yöntem R_s ve J_b (schottky engel yüksekliğinin iş akımı yoğunluğu) parametrelerinin sıcaklıktan bağımsız olduğu durumlarda geçerli olmaktadır. Gerekli analizler için belli bir sıcaklık değerinde oluşturulan I - V eğrisi kullanılabilir. Yukarıda da bahsettiğimiz gibi Yasamura ve Sato (1986), n 'in 1'den büyük olduğu yani ($1 < n < 2$) durumlarında R_s ve J_b nin hesaplanabileceğini göstererek, Norde yöntemini geliştirmişlerdir. Sıcaklığın değiştiği durumlarda bile R_s ve J_b değerleri hesaplanabilecek bu yöntem ile iki farklı sıcaklıkta ve minimum değere sahip I - V eğrisine ihtiyaç duyulur. Shottky diyotların akım gerilim-karakteristikleri belirten denklem;

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

(2.18)

eşitliği ile Shotkyy diyot parametrelerine yani R_s değerlerinden ϕ_b elde edilebilir. Bu denklem yeniden düzenlenirse;

$$F(V) = \phi_b + IR_s - \frac{V}{2} \quad (2.19)$$

bulunur. Bu eşitlik ideal durumlarda $R_s=0$ durumunda eğim $(-1/2)$ için lineer bir doğru elde edilir. Bu lineer doğru $F(V)$ eksenini kestiği nokta alındığında ϕ_b bulunur.

$F(V) = \frac{V}{2} - (\beta^{-1}) \ln\left(\frac{1}{AA^*T^2}\right)$ eşitliğinin sol tarafı $\frac{e}{kT} = \beta$ dönüşümü uygulandığında;

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

(2.20)

olur. Doğru beslem için $\ln(I)$ - V grafiğinde $\frac{kT}{e} < V < IR_s$ aralığında olan beslem gerilimlerinde lineer bir çizgi olacaktır (Ayyıldız, vd. 1996). Eğer R_s çok daha büyük olursa I_0 doyma akımını elde etmek güçleşir. Ayrıca R_s değerinin büyümesi grafikte ortaya çıkan lineer alanın daha da darlaşmasına sebep olacaktır. Norde bu R_s etkisini yok etmek için $F(V)$ fonksiyonu önermiştir. $F(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{1}{AA^*T^2}\right)$ eşitliği ve ohm yasası olan $V=I.R$ eşitliğini kullandı. $F(V)$ fonksiyonu için;

$$\frac{dI}{dV_d} = \beta I \quad (2.21)$$

eşitliği yüksek voltaj değerlerinde grafik eğiminin $1/2$ ye yaklaştığını gösterir. Böylece;

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

(2.22)

elde edilir. Bu eşitliğin V 'ye göre diferansiyeli alındığında;

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

(2.23)

olur. Burada ;

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_d + R_s dI} \quad \text{ve} \quad V = IR_s + V_d$$

Eşitlikleri birlikte çözüldüğünde;

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_d} \left[1 + R_s \left(\frac{dI}{dV_d} \right)^{-1} \right] \quad (2.24)$$

eşitliği bulunur. İdeal diyotta $n=1$ durumunda ise;

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

eşitlikleri $\frac{dF}{dV} = R_s \left(\frac{dI}{dV} \right) - \frac{1}{2}$ denkleminde yerlerine yazıldığında;

$$V_{d=(I_{\min})} = V_{\min} - I_{\min} R_s \quad (2.25)$$

elde edilmiş olunur. Böylelikle V' ye göre diferansiyel alınıp sıfıra eşitlendiğinde akımın minimum değeri bulunmuş olur.

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

eşitliklerine göre doğru beslemde $F(V)$ - V değişiminde $F(V)$ 'nin minimum olduğu nokta V_{min} noktasına denk gelir. V_{min} noktasına karşılık gelen akım değeri de minimum (I_{min}) olur. Buna göre $F(V)$ fonksiyonu;

$$F(V_{min}) = \frac{V_{min}}{2} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{I_{min}}{AA * T^2} \right) \quad (2.26)$$

olur ve ;

$$R_s = \frac{1}{\beta I_{min}} \quad (2.27)$$

olur.

$$\phi_b = F(V_{min}) + \frac{V_{min}}{2} - \frac{1}{\beta} \quad (2.28)$$

eşitlikleri bulunur. Norde fonksiyonu seri direnç değerinin küçük olduğu hallerde geçerlidir. İdeal olmayan yapılarda gerekli diyot parametrelerini hesaplama yöntemleri ise Norde fonksiyonu değiştirilerek elde edilebilmektedir (Bohlin, 1986). $F(V)$ fonksiyonuna idealite faktörü değerinden büyük bir α sayısı ile fonksiyon yeniden tanımlanmış olur.

$$F(V, \alpha) = \frac{V}{\alpha} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{I}{AA * T^2} \right) \quad (2.29)$$

R_s oluşturacağı etki ile idealiteden sapmaya sebep olur. Bu yüzden n , $1 < n < \alpha$ aralığında seçilir.

$$F(V, \alpha) = \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{n} \right) V + \phi_b + \frac{IR}{n} \quad (2.30)$$

R_s dirençsiz bir durumda eğimi $\left(n - \frac{\alpha}{\alpha n} \right)$ değerinde bir $F(V, \alpha)$ fonksiyonu tanımlanır.

Seri dirençli bir fonksiyon ise;

$$F(V, \alpha) = \frac{V}{\alpha} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{V}{R_s AA^* T^2} \right) \quad (2.31)$$

şeklindedir. Fonksiyonu $I < n < \alpha$ aralığında minimum bir değer verir.

$$F(V, \alpha) = \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{n} \right) V + \phi_b + \frac{IR_s}{n} \quad (2.32)$$

Eşitliğin V 'ye göre diferansiyeli alınıp gerekli dönüşümler uygulanacak olursa;

$$\frac{dF}{dV} = \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{n} \right) + \frac{R_s}{n} \left(\frac{dI}{dV} \right) \quad (2.33)$$

bulunmuş olur. R_s var iken ideal halden sapma olur ve TE teorisi;

$$I = AA^* T^2 \exp \left(\frac{e\phi_b}{kT} \right) \left[\exp \left(\frac{eV_d}{nkT} \right) \right] \quad (2.34)$$

ve

$$\frac{dI}{dV_d} = \frac{\beta I}{n} \quad (2.35)$$

olur ve $V_d = V - IR_s$ eşitliğinin I 'ya göre diferansiyeli alınır;

$$\frac{dV_d}{dI} = \frac{dV}{dI} - R_s \quad (2.36)$$

elde edilir. Gerekli dönüşümler yapılırsa;

$$\frac{dV}{dI} = \frac{dV_d + R_s dI}{dI}, \quad \frac{dI}{dV} = \frac{dI / dV_d}{1 + R_s dI / dV_d} \quad (2.37)$$

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI / dV_d}{1 + R_S dI / dV_d}, \quad \frac{dI}{dV} = \frac{\beta I / n}{1 + \beta I R_S / n} \quad (2.38)$$

olur. Eşitlikler birlikte çözüldüğünde;

$$\frac{dF}{dV} = \frac{n - \alpha + \beta I R_S}{\alpha (n + \beta I R_S)} \quad (2.39)$$

elde edilir. $\frac{dF}{dV} = 0$ eşitliğinde akım değeri minimum elde edilir.

$$I_{\min} = \frac{\alpha - n}{\beta R_S}, \quad V_d(I_{\min}) = V_{\min} - I_{\min} R_S \quad (2.40)$$

Doğru beslemde $F(V)$ - V grafiğindeki $F(V)$ minimum değeri $V_{\min}$ değerini verir. $V_{\min}$ noktasına karşılık gelen akım değeri ise akımın minimum ($I_{\min}$) değerini verir.

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

$$\phi_b = F(V_{\min}, \alpha) + \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{\alpha} \right) V_{\min} - \left(\frac{\alpha - n}{n} \right) \frac{1}{\beta} \quad (2.42)$$

$$R_S = \frac{\alpha - n}{\beta I_{\min}} \quad (2.43)$$

şeklindeki R_S 'in büyük olduğu durumlarda diyot parametrelerini veren eşitlikler elde edilmiş olur.

Yukarıda bahsedildiği gibi Cheung'ler MS temas bölgesine ileri beslem uygulandığında elde edilen I - V eğimi kullanılarak Shotky diyot parametrelerinin hesaplanması için farklı bir yöntem sunmuşlardır. TE'de var olan akım yoğunluğu (J) ve yapının etkin alanı (A) çarpıldığında, yapının akımı toplam olarak;

$$I = A J = \left[A A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_{bn}}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.44)$$

elde edilir. Bu denkleme göre $eV_a \gg kT$ ise 1 değeri ihmal edilebilir. Uygulanan gerilimin tamamı arınma bölgesine düşmez ve böylece sapmalar ortaya çıkar. Sapma miktarı idealite faktöründe (n) hesaplanır. Böylece akım denklemi;

$$I = A.J = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_{bn}}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV_a}{nKT}\right) \right] \quad (2.45)$$

eşitliğine dönüşür. Uygulanan gerilim (V_a)'dan IR_s miktarında gerilim R_s üzerine düşer ve $V_a \rightarrow V_a - IR_s$;

$$I = A.J = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_{bn}}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{e(V_a - IR_s)}{nKT}\right) \right] \quad (2.46)$$

şeklinde elde edilir. Buna göre;

$$V = \left(\frac{nKT}{q} \right) \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2} \right) + n\phi_b + IR_s \quad (2.47)$$

olur. Ya da MIS yapıya uygulanan gerilimin tamamen yapı üzerine düşmemesi ile ideal durumdan oluşan sapmalar şu şekilde de bulunabilir;

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) \quad (2.48)$$

Eşitliğine seri direnç etkisi eklenirse akım, eşitlik (2.48) şu şekilde bulunur;

$$n = I_0 \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nKT}\right) \quad (2.49)$$

IR_s : Uygulanan gerilimin seri dirençteki etkisi

Eşitlik (2.48)' nın logaritması alınarak eşitlik (2.49) ile yeniden işleme alınır;

$$V = \left(\frac{nKT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) + n\phi_b + IR_s \quad (2.50)$$

olacak şekilde aynı gerilim denklemi bulunabilir. Bu denklemin $\ln I$ 'ye göre diferansiyeli alınır.

$$\frac{d(V)}{d(\ln I)} = \frac{nKT}{q} + IR_s \quad (2.51)$$

şeklinde elde edilir. Potansiyel yüksekliği ise;

$$\ln(I) = \ln(AA^*T^2) - \frac{e\phi_b}{kT} + \frac{eV}{nKT} - \frac{eIR_s}{nKT} \quad (2.52)$$

$H(I)$ fonksiyonu tanımlanır. Böylece eşitlik (2.50) ve (2.51)'in birlikte çözümlenmesi ile;

$$H(I) = n\phi_b + IR_s \quad (2.53)$$

fonksiyonu elde edilir. Bu denklem ile $H(I)$ - I 'nin grafiği çizilirse, çizgisel bir doğru ortaya çıkacaktır. Bu doğrunun eğimi seri direnci verir. Yine bu doğrunun düşey eksenini kestiği nokta;

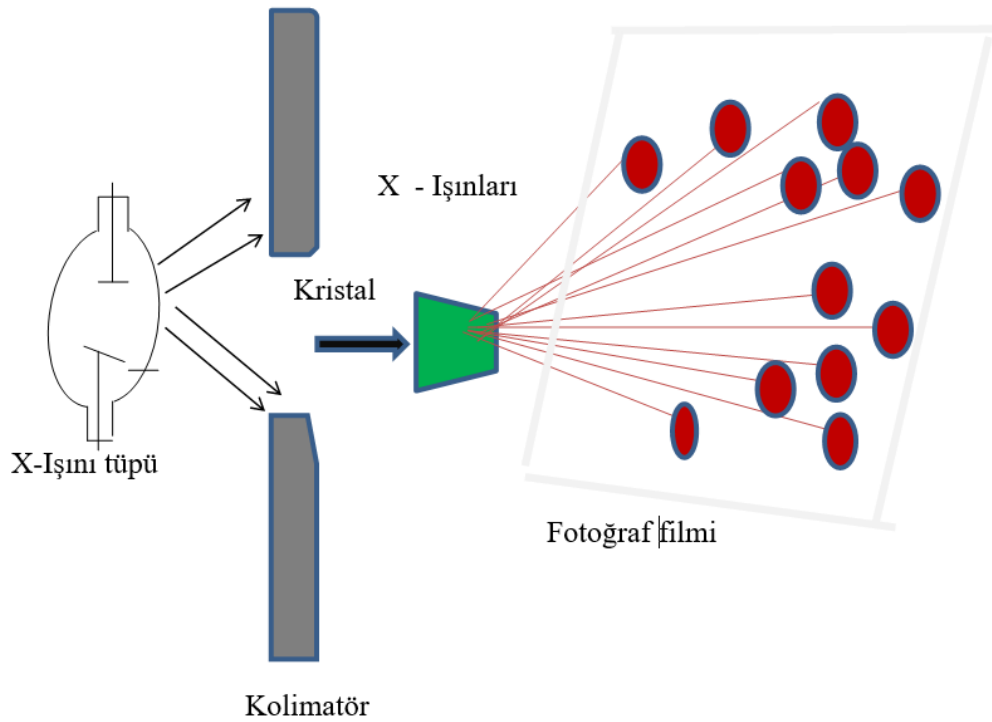
$$\frac{d(V)}{d(\ln I)} = \frac{nKT}{q} + IR_s \quad (2.54)$$

denkleminde bulunan n değerinin denklemde yerine yazılmasıyla engel potansiyeli bulunur.

2.6. İnce Filmlerde Yapısal Analiz

2.6.1. X-Işını kırınım deseni (XRD) metodu

X-Işını kırınım deseni (XRD) metodu kristal yapının üzerine X-ışını yollayarak atom düzeneklerine çarpması ve daha sonra bu düzeneklerden yansıması olayıdır. Materyal üzerine gönderilen X- Işını atom düzleminde bulunan elektronlarla etkileşime geçmesi sonucu saçılma olayı gerçekleşir. Saçılma sonucunda kristal yapısına ilişkin sonuçları buluruz. Aynı metotla kristal yapıyla ilgili hücre türü, malzemelerin kimyasal cinsi, faz çeşidi hakkında bilgi edinir. XRD metoduyla elde edilen yararlarından biri de şudur: Bulunan kırınım piklerin şiddetlerini, maddenin ölçüsüne bakılarak analiz imkânı sağlar. Elde edilen kırınım spektrumlarıyla JCPDS (International Centre For Diffraction Data) kartlarının aracılığıyla yeni bir malzeme bulunabilir. Spektrumda ortaya çıkan pik ve zemin şiddetleriyle yarı pik genişliklerinin incelenmesi sonucu malzemelerin kristalleşmesiyle ilgili bilgiler elde edilir.



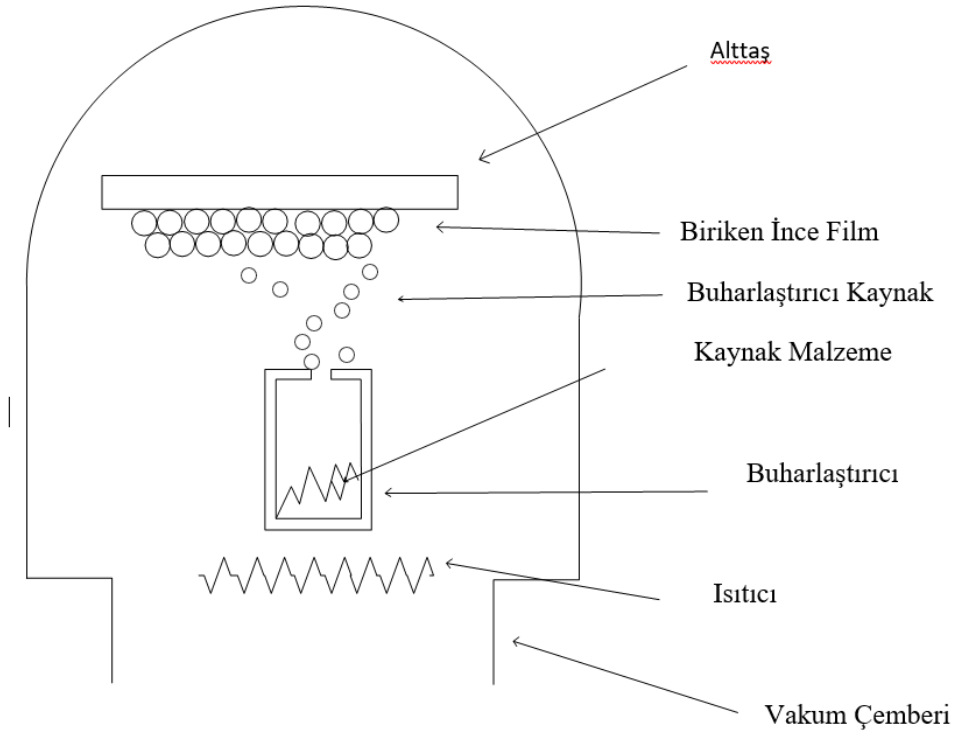
Şekil 2.10. Kristal yapının üstüne giden X-Işını demetinin ekranda oluşan görüntüsü.

2.7. İnce Film Elde Etme Metodları

2.7.1. Termal Buharlaştırma yöntemi

Fiziksel buhar biriktirme metodu, vakumlu yerde kaplama ile gerçekleştirilen bir yöntemdir. Vakum kaplama yöntemiyle bilinen bu uygulama eskiden beri kullanılmaktadır. İyonları ya da elektronları materyalden sökerek bunları buharlaştırma veya sıçratma işlemini uygulayarak alttaş üzerinde atom ya da iyonik bir biçimde yığılmasıyla oluşur (Uslu, 2008).

Termal buharlaştırma metoduyla bilinen ve en çok kullanılan bu yöntemle Şekil 2.11’de belirtildiği gibi vakum odası kullanılan malzeme, ısıtıcı ve alttaştan oluşur.



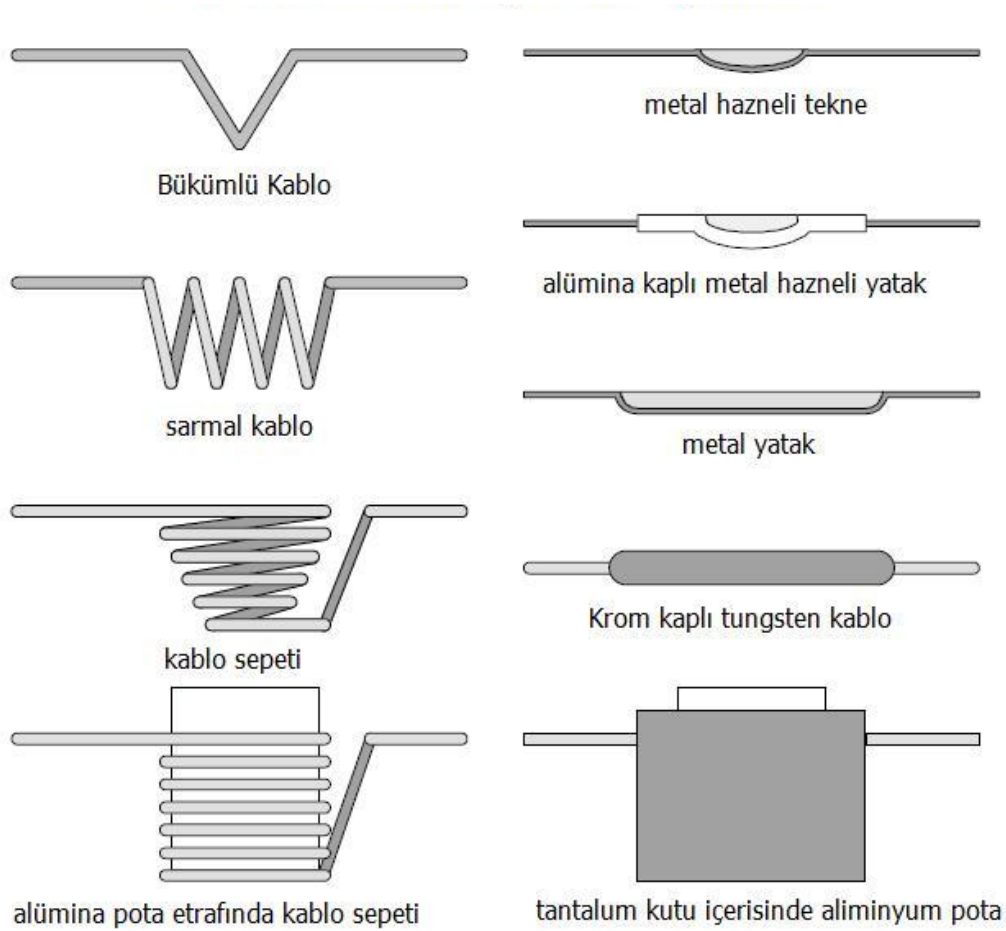
Şekil 2.11. Rezistans ısıtıcı ile buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi (Sharma vd., 2012).

Buharlaştırma sırasında ısıtıcı yardımıyla erime noktası yüksek olan malzemeden temin edilerek kullanılacak olan malzeme pota içine konulup rezistans teller ile potadan akım geçmesiyle ısıtılıp malzeme buhar evresinde olan taneciklerin saçılmaması için bu yöntem vakum içinde yapılması önemlidir. Akım sonucu ısıtılmış potayı ve alttaşı kıyasladığımızda tanecikler alttaş üstünde birikip yığılması sonucu ince

filmler elde edilir. Bu yöntemle istenildiğinde büyütme olayı sırasında kaplanan alttaşların sıcaklığı değişime uğratarak filmin yapısıyla değişiklik yapabiliriz.

Bu metotla yani rezistans ısıtıcıyı kullanarak buharlaştırma işlemiyle filmleri çok vakit harcamadan, erken ve ucuz bir biçimde elde ederiz. Kullandığımız bu metotla avantaj sağlamış oluruz. Fakat tüm maddeler için bu yöntem geçerli değildir. Birden fazla elementte bu uygulama olmaz, çünkü element veya bazı bileşiklerde buharlaştırma yöntemi onların yapısına uymaz.

Termal Buharlaşma işleminde kullanılan buharlaştırma kaynakları şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.12. Termal buharlaştırma yönteminde kullanılan buharlaştırma kaynakları.

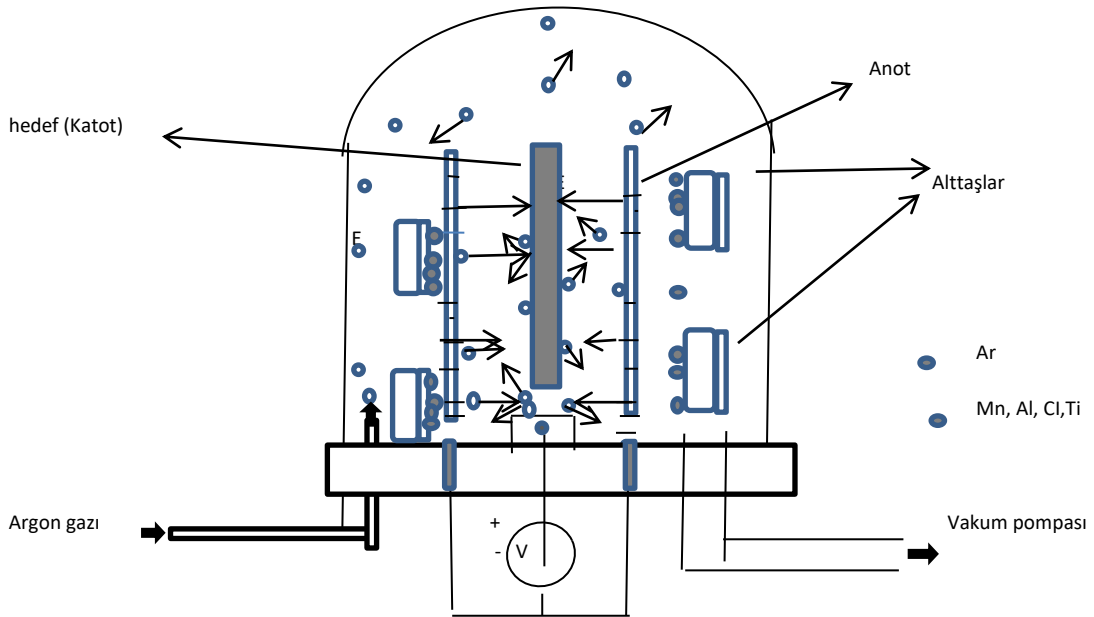
2.7.2. Saçtırma yöntemi

Saçtırma yöntemi katı bir yüzeyden atomların koparılması olayında dayanır. Saçtırma metodu pozitif iyonlar ile bombardıman edilen katı maddenin katmanından sökülen atomların tutucu özellik gösteren yüzeylerde film tabakasını oluşturmaktır. Yüzey bombardımanında yararlanılan parçacıklar çoğu kez ağır bir asal gazın iyonlarını kullanır. Endüstriyel ortamda genel olarak en fazla faydalanılan argon asal gazdır. Teknoloji alanında saçtırma metodunda faydalanılarak ince film yüzeylerinde kaplama yöntemi kullanılır.

Bu metotta, kaynağı katı bir maddeden enerjisi fazla olan iyonlar tarafından bombardımana maruz bırakılır ve kaynaktan sökülen atom veya moleküller alttaş üzerine yığılarak ince film meydana getirir.

Bu metotta maddenin hallerinden plazma halinde olan, alçak basınçta tutulan bu asal gaz vakum olan yerde tutulur. Tutulan bu yerde katot ile anotun ortasına verilen yüksek dozda gerilim şunu yapar. Kaynağı bir şekilde hedef olarak gösterilen elektrot yönüne hareketlendirilir. İstenilen yere giden büyük enerjiye sahip asal gaz iyonlarına momentum verilmesi sonucunda hedef kaynaktan aşağı yukarı % 90 civarında nötr, % 10 civarında da iyonlaşan atomlar sökülür. Hedeften koparılan atomların alttaş üstünde yığılması sonucu istenilen ince film oluşur.

Şekil 2.13’da saçtırma metodu şekli verilmiştir.



Şekil 2.13. Saçtırma metodun gösterimi.

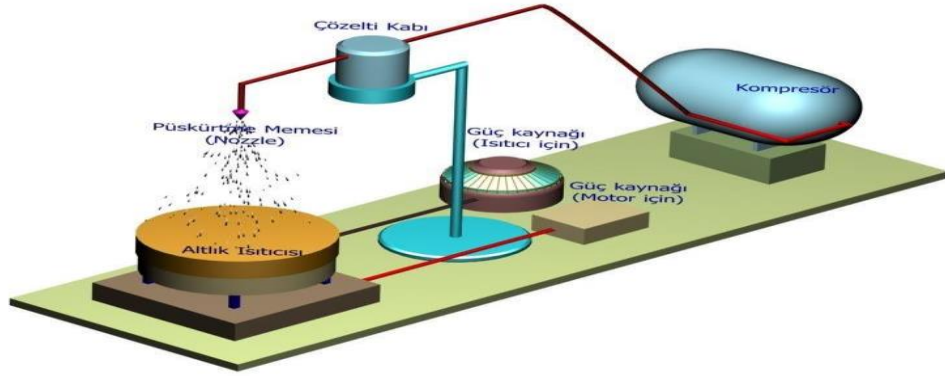
Bu metotta önemli özelliklerden bir tanesi de malzeme bakımından geniş bir alanda kullanılmasıdır. Kaplamayı meydana getiren madde akısının buhar durumuna geçmesi kimyasal veya ısıtılma yerine mekanik çarpışma ile moment aktarımı sağlanmasında malzemelerin birçoğu bu işleme uğrar. Metal maddenin saçırlanmasında çoğunlukla doğru akım (DC) kullanılır. İletken özelliği bulunmayan hedef malzemenin saçırlanmasında da radyo frekans (RF) gerilimleri kullanılır. İnce film kaplama yöntemiyle kıyaslandığında saçırtma metodunun birden fazla avantajı vardır. Örneğin yerinden sökülen enerjisi yüksek olan atomlar ince film üzerine daha iyi yer kaplar. Bu metotla doğada element veya alaşım haline bulunan atomları yüzey kısımlarının kaplanmasında da bu yöntem kullanılır. Ayrıca deneylerde de kullanılan kaynak maddeyi alttaşı alt kısmına bırakılmayabilir.

2.7.3. Kimyasal püskürtme yöntemi

Püskürtme metodu, istediğimiz filmleri oluşturmak amacıyla oluşturulan sulu çözeltilerin karışımını sağlayarak istenilen yüzeyin üstüne basınç, hava veya azot gazı etkisiyle yüzeye püskürtme işlemidir. Püskürtülen yüzeyin sıcaklığı veya soğukluğu pek etki etmez. Püskürtme metodu ince film üretimi bakımından en elverişli yöntemdir. Çünkü bu işlem sırasında istenilen değişiklik yapılabilir. Araç ve gereç yönünden oldukça ekonomik olması kolay ve çok maliyetli olmaması yapılan işlemi her dakika izlememiz gibi özellikleriyle birçok yöntemle göre bayağı avantajlıdır.

Taban sıcaklığı deneyde kullanılan püskürtme miktarı, filmin kalın bir yapıda olması gibi faktörler deneysel parametrelere göre azalır artırılabilir.

Kimyasal püskürtme metodun dezavantajlarına bakılırsa üretilen ince filmin kalınlık oranının sürekli aynı olmaması, oluşturulan çözelti oranının çok olması gibi faktörleri örnek verebiliriz. Şekil 2.14’de kimyasal püskürtme şekli gösterilmektedir.



Şekil 2.14. Püskürtme metodunun şematik gösterimi.

2.7.4. Langmuir-Blodgett (LB) yöntemi

Elde edilen ince filmin su yüzeyinde bulunan moleküllerin analizini yapılmasını sağlayan yöntemdir. Langmuir-Blodgett (LB) izoterm grafiğiyle yüzeyin alanını basıncın değişken özelliğine göre incelenmesini sağlar. 1910'lu yıllarda Irving Langmuir suyun üstünde yüzen tek tabakalıkların çalışmasını gerçekleştirir. Irving Langmuir moleküllerin yüzey tabakasıyla ilgili basınç ve alan değişiklikleriyle ilgili bilgi verir. Suyun üzerinde olan yağ asidi atomlarının tek bir tabaka biçiminde oluşması Langmuir (L) filmi olarak isimlendirilir.

Katherine Blodgett su, hava ara yüzeylerinden oluşan Langmuir filmleri homojen şekilde katı yüzeyine geçirilmiştir. Langmuir ve Blodgett (LB) kişilerin yaptığı bu deneylerle katı yüzeyin üstüne geçirilen tek tabakalı filmleri elde edilmiştir. Langmuir-Blodgett (LB) İnce film teknolojisiyle filmin kalınlığının çok küçük olması, oluşumu kolay ve maliyeti az olmasından dolayı (LB) ince film bunlardan ötürü bu yöntemle ilgi artmıştır.

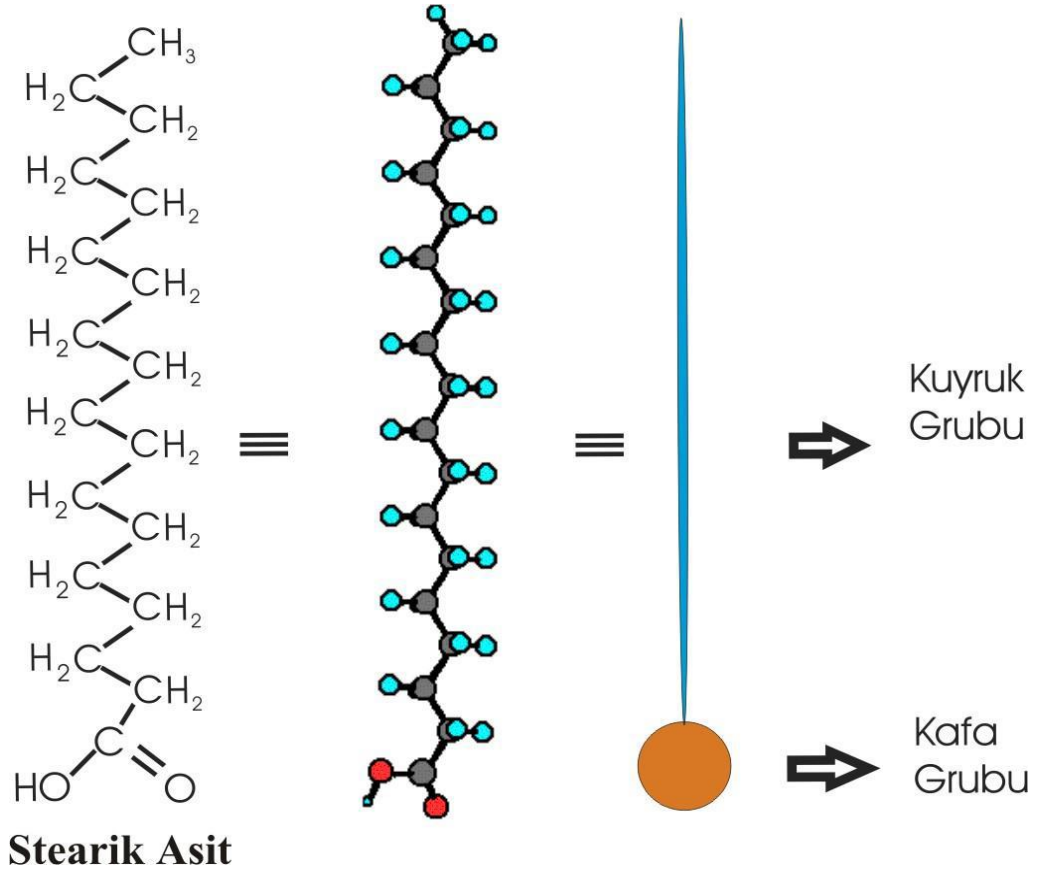
Bu yöntemle ince filmin üretilmesinde tüketilen maddeye göre değişir ve bu maddelere göre süreleri değiştirebiliriz. Birden çok farklı organik moleküller kullanılır. Bu moleküllere göre de süreleri değiştirebilir. Nanoteknoloji ve (LB) kıyaslandığında Langmuir-Blodgett(LB) ince filmleri çok avantajlı olduğu görüldüğü için bilim insanlarının daha çok ilgisini çekmeye başlamıştır.

Bu yöntemle ince film üretilmesinde hareket halinde olan katı yüzey olan alüminyum, cam gibi molekülleri geçirebilmesi için su üstünde yüzmesi ve suyun içerisinde çözünmemelidir. Bu nedenlerden tüm kimyasal maddeler bu teknik için uygun olamaz. Bu teknikte kullanılan maddeler amfifilik özellikte olmalıdır. Amfifilik özellik gösteren iki bölümde inceleyebilir. Baş kısım ve kuyruk kısım olmak üzere iki grupta inceleyebilir. Baş bölümüne hidrofilik denir. Suyu seven polar moleküller denir. Kuyruk bölümüne ise hidrofobik denir. Buna suyu sevmeyen apolar moleküller diye bilinir.

Polar moleküller, su molekülleriyle aralarında hidrojen bağı olur. Bu polar moleküllerine örnek olarak OH, COOH veya NH₂ verilebilir. Bu hidrofilik moleküller yani suyu seven moleküller olarak adlandırdığımız bunlar kafa kısmını meydana getirir. Apolar moleküller ise su molekülleriyle aralarında bağ oluşmaz, apolar moleküller kendi içinde birbirleriyle bağlanır.

CH₂ ve CH₃ hidrokarbonları apolar moleküllerden birkaçıdır. Bunlar hidrofobik yani suyu sevmeyen kısmın meydana getirir. Örnek olarak amfifilik özellik gösteren stearik asidi verebilir (C₁₇H₃₅CO₂H).

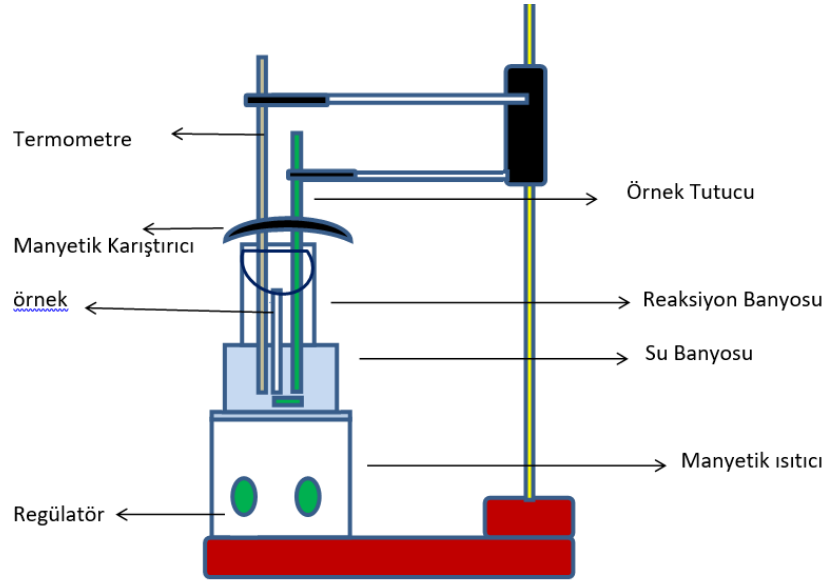
Şekil 2.15’de şeklinde belirtildiği sterik asitin suyu seven ve suyu sevmeyen bölümlerini gösterir. LB filminin elde edilmesinde en uygun yöntemle gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Stearik asit ($C_{17}H_{35}CO_2H$)'in molekül yapısı.

2.7.5. Kimyasal banyo depolama yöntemi

Kimyasal banyo depolama yönteminde kullanılacak malzemeler şunlardır: manyetik ısıtıcı, örnek tutucu, termometre, manyetik karıştırıcı, birer reaksiyon banyosu ve su banyosu, alttaş ve PH'ı ölçen PH metreden oluşur. Bu durum Şekil 2.16'ta gösterilmektedir. Kimyasal banyo depolama yöntemiyle de istenilen ince film elde edilir. Temiz olan cam, oluşturulan çözeltinin içine bırakılıp daldırılarak cam yüzeyinde ince film oluşur. Bu çözelti içeriğinde selenit, hidroksit, metal sülfürü ihtiva eder. Kimyasal banyo yöntemi diğer metoda göre kıyasladığımızda bu metot; kolay, ucuz ve kısa bir sürede bu metot ile gerçekleşir.



Şekil 2.16. Kimyasal banyo depolamanın sistemi.

2.7.6. Sol-Jel kaplama yöntemi

Sol jel metodunda sıvı faza sol denir. Katı faza da jel denir. Bu teknikle sıvı safhadan katı safhaya doğru geçer. Sol jel tekniğini kısaca tanımlarsak şöyle diyebiliriz. Çözelti içerisinde 1um büyüklüğünde katı taneciklerin sıvının içerisinde belli bir düzen içinde asılı kalmasıdır. Sıvının içerisinde katı malzeme belli bir düzen içerisinde saçıldığı evreye de “jel” denir. Tüm çözeltilerde jel faza dönüşümü gerçekleşmez. Jelin meydana gelmesi için tanecik ile çözücünün birleşimine etkili bir birleşim olmalıdır (Palalı, 2005). Sıvı çözeltisi fazla bulunan katı ve sıvı fazlar arasında oluşan kısma jel denir. Jelleşmeyi meydana getiren moleküller güçlü ya da zayıf bağlar ile birbirlerine bağlanır. Aralarında oluşan boş kısımlarda sıvı bulunur ve bu ortamda da dokular meydana gelir. Jeller kendi arasında üç kısma ayrılır

Tiksotropik, elastik ve rijittir. Elastik jellere birkaç örnek olarak verilirse bunlar: nişasta, birbirinden farklı sabunlar, alüminyum hidroksit, jelatin gibi. Bu elastik jelde moleküller arasında oluşan bağ Van der waals bağıdır. Bu bağ zayıf olduğundan sıcaklık farkından dolayı basit bir biçimde kopar ve bundan dolayı faz ters özellik gösterir. Rijid jeline örnek olarak da silika jel verilir. Bu jelde kuvvetli bağlarla birbirleriyle bağlandığından jel, katı faz ya da sıvı eklesek bile değişiklik olmaz.

Diğer bir jel olan Tikotropik jellerde ise karıştırmayla, sallanmayla ya da yüksek frekansla oluşan seslerin etkileşimiyle kolloid çözelti hazırlanır. Bu jelle ise metalik sabun, ferritoksit örnek verilebilir (Evcin, 2006).

Sol jel yöntemiyle teknolojiye kullanılan birtakım metotlar aşağıdaki çizelge 2.2’de mevcuttur.

Çizelge 2.2. Sol-jel yönteminin kullanıldığı yerler.

İnce seramik tozlarının oluşumunda
Sol-Jel elde edilmesin de, Optik amaçlı filtre kaplamasında
DVD. CD ROM vb. Kopmak disklerde kullanımı
Televizyon tüpü fosforu kaplama yönteminde
Mikro devre oluşumunda ve foto dirençleri kaplamak için
Manyetik disk kaplamalarında
Kimyasal ve Termal koruyucu katmanlarında
Düz ekran gösterge kaplamasında- Anti- yansıma kaplamasında

Sol-jel yöntemin başlıca avantajları şöyledir;

- Bilinen eski yöntemlerle eritmeyle elde edinmesi zor bir şekilde gerçekleşen, erime sıcaklığı yüksek özellik belirten malzemeler seçilir. Bu malzemelerden çok küçük sıcaklıkta cam üretimi gerçekleşir.
- Birbirinden farklı atomların katkılarıyla farklı yapıda seramik ya da cam üretilir.
- Filmlerin saflığı başlangıç maddenin saflığına bağlı olarak değişir.
- Ortamdaki kirlilik en aza indirilir.
- Elde edilen ürünler büyük oranda saflıkta üretilir.
- Deney esnasında karıştırılanlar moleküler biçimde olduğu için elde edilen seramik ve camlar homojen özellik gösterir. Bundan dolayı optik malzemelerin üretiminde de kullanılır.
- Yapılan bu yöntem basit ve ucuzdur.
- İşlem sırasında olması gereken sıcaklıklar genelde 10000 C ‘den düşük olduğu için çok miktarda enerjiden tasarruf elde edilir.
- Erime esnasında buharlaşma meydana gelir. Ve bu buharlaşmadan dolayı en az kayıpla kullandığımız bu metot ile gerçekleştirebiliriz.
- Çok tabakalı yapıların üretimi olur.

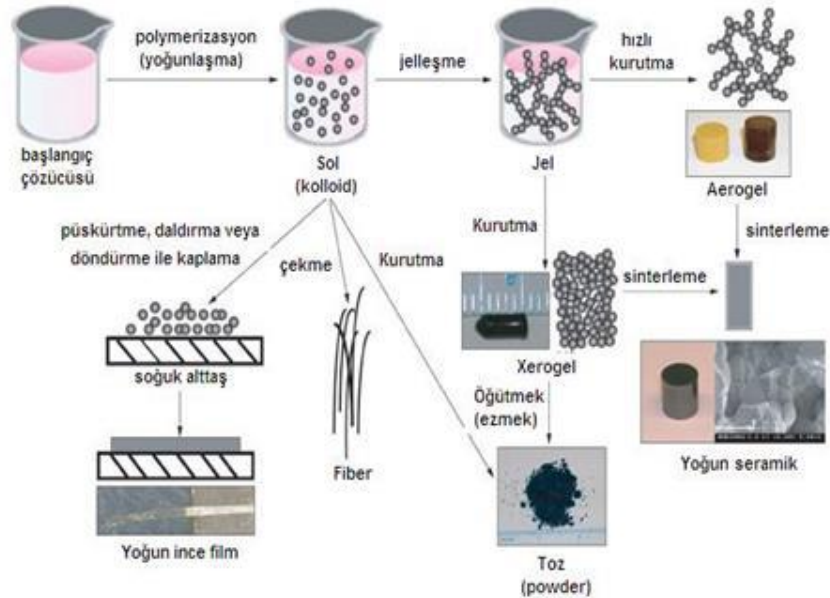
Sol-Jel yönteminin dezavantajları ise şöyledir;

- Hammadde fiyatları pahalı olduğu için uygulanan yöntemler birkaç özel seramik ve kaplama üretilmesi ile olur.
- Yapılan yöntemin süresinin fazla olması üretim miktarını azaltır.
- Organik maddelerin kullanılmasıyla sağlığa zarar verdiğinden uygulama esnasında koruyucu tedbirler alınmasına sebep olduğu için maliyeti yüksek olur.
- Bu yöntemle jelin iç kısmında olan porlar seramik, karbon atomları ya da hidroksil iyonlarına zarar verir.

Sol-jel metodu, günümüz teknolojik alan gibi birçok yerde kullanılan bir tekniktir. Sol jel metodunda birden fazla kullanım alanını örnek gösterirsek tarihi eserlerinin zarar görmemesinde, polimer ya da porselen maddelerin kimyasal etkiye karşı olunması nem tutmasını önlenmesi amacıyla kullanılır.

Gaz alışverişini yani (CO_2 ve O_2) düşürür. Cam veya plastiklerin yoğuşmasını ya da buz tutmasını önlemek gibi birçok alanda kullanılır. Ayrıca elektronik, cam gıda otomotiv gibi sektörlerde de kullanım alanı mevcuttur (Boz toprak, 2007).

İnce film kaplamasında sol-jel yöntemiyle bu biçimlerde olur: Döndürme (Spin) ve daldırma (dip) yöntemleriyle sol-jeli bu yöntemlerle kaplama işlemini gerçekleştirebiliriz. Şekil 2.17’te sol-jel tekniğinin süreçleri verilmiştir.



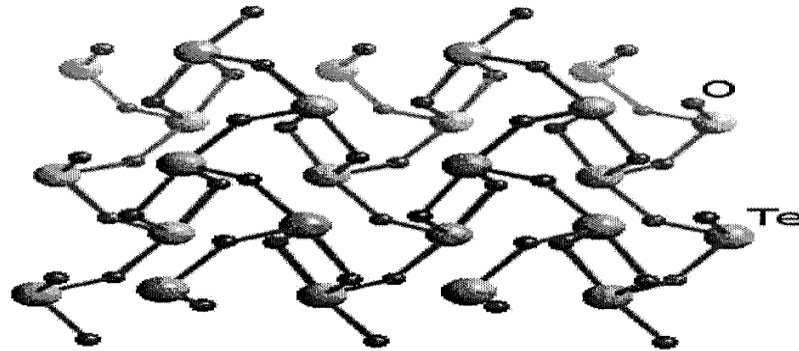
Şekil 2.17. Sol-jel tekniği süreçleri.

2.8. Tellüroksit (TeO_2)

Tellür kimyasal bir elementtir. Tellür “Te” sembolüyle ifade edilir. Atom numarası 52’ dir. Periyodik çizelgenin 6A grubunda yer alır. 2, 4, ve 6 değerliklerini alır. Yarı metalik özellik gösterir. Parlak, beyaz-gümüş renğinde kırılma özelliği gösteren elementtir. Doğada gri renginin daha yoğun halinde ve toz biçiminde olur. Tellür elementi havayla etkileştiğinde yeşilimsi mavi bir alev ortaya çıkar. Bu etkileşim sonucunda tellüroksit (TeO_2) oluşturur. Tellür elementi su veya hidroklorik asitte çözünmez. Tellüroksit (TeO_2), kristali nitrik asit içerisinde de çözünmesi sonucu hazır hale gelir. Yer kabuğunda tellür elementi milyonda 0,001 civarında vardır. Tellür elementi doğada saf halde bulunabilir. Ayrıca tellür minerallerin içinde kalaverit, tellürit ve silvanit vardır.

Tellür 1783 yılında Franz-Joseph Müller Van Reichenstein tarafından keşfedildi. Daha sonraki yıllarda Martin Klaproth 1796 yılında verileri kanıtlayan örnek gösterdi. Klaproth, saf halde elde ettiği numuneyi üretti ve bu numuneye de Tellür olarak adlandırdı.

TeO_2 ; beyaz bir tozdur. Tellürün katı bir oksitidir. Tellüroksit tetragonal yapıda kristaller oluşturur. Şekil 2.18’de TeO_2 ’in kristal şekli gösterilmektedir. TeO_2 ; buharlaştırma, biriktirme gibi alanlarda kullanılır. TeO_2 tellür metali, tellürik asit ve birden fazla tellür tuzu hazırlanmasında kullanılır.



Şekil 2.18. TeO_2 .

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Al/TeO₂/p-Si (MOS) Yapılarının Oluşturulması

3.1.1. Silisyum tutucularının hazırlanması

Tez çalışmamızda kullanmış olduğumuz kristaller (111) kristal yönelimli, 5 Ω.cm özdirence sahip, bir yüzeyi parlatılmış tekli (mono) p-tipi silisyumdur. Kaplaması yapılacak kristal yüzeyler 1×1 cm²'lik ebatlarda kesilmiş ve “RCA (Radio Corporation of America)” kimyasal temizlik işlemine bırakılmıştır (Kern, 1993). Organik, oksit ve iyonik işleme tabi tutulmuş kristallerin süreçleri:

1- Organik Temizlik Süreci: 18 MΩ deiyonize su, Hidrojen peroksit [H₂O₂ Merck] ve amonyum hidroksit [NH₄OH, Merck 5:1:1 oranlarında beher içerisinde karıştırılarak ve kesilmiş kristaller beher içine bırakılarak 10 dakika 60 °C’de kaynamaya bırakılmıştır.

2- İyonik Temizlik Süreci: 18 MΩ deiyonize su, Hidrojen peroksit [H₂O₂ Merck] ve hidroklorik asit [HCl, Merck] 6:1:1 oranlarında beher içinde karıştırılmış ve kesilmiş kristaller beher içinde on dakika 60 °C’de kaynamaya bırakılmıştır.

3- Oksit Temizlik Süreci: 18 MΩ deiyonize su ve Hidroflorik asit [HF, Merck] 10:1 oranında beher içinde karıştırılarak, kesilmiş kristaller beher içine bırakılmış ve beher ultrasonik banyoda otuz saniye süre ile işleme bırakılmıştır.

Tüm temizleme süreçlerinde kesilmiş kristaller deiyonize su dolu beher içinde ultrasonik banyo ya bırakılmıştır. Ara safhalarda kesilmiş kristal yüzeylerindeki oksitlemeyi önlemek amacıyla azot gazı (N₂) ortamına tabi tutularak kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Temizlik sürecine tabi tutulan kristallerin alt mat yüzeyleri vakum cihazına bırakılmış, %99, 99 saflıkla alüminyum (Al) metali 10⁻⁶ Torr vakum altında 1200 Å kalınlığında bu yüzeye kaplanmıştır. Kaplama işleminden sonra seri direnç etkisini en aza indirmek amacıyla kaplanan kristaller tüp fırın içerisinde 580 °C sıcaklıkta azot gazı (N₂) ortamında üç dakika boyunca tutularak alüminyumun çökmesi (alloying) sağlanmıştır.

3.1.2. TeO₂ ince filmin silisyum tutucu yüzeylere kaplanması

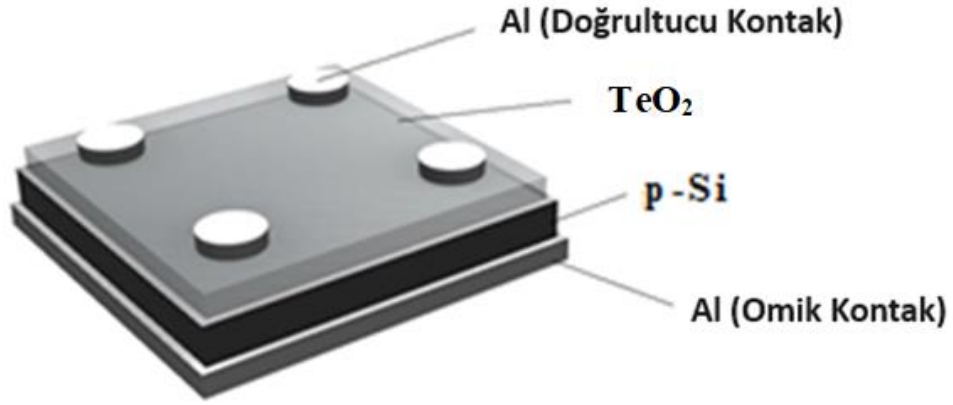
Çalışmamızda Sigma Aldrich firmasından alınmış 243450 ve 7446-07-3 CAS numarası sahip Tellür (IV) oksit malzemesi kullanılmıştır. Kaplama işlemimiz termal buharlaştırma yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi NANOVAK firmasına ait NVTH-350 termal buharlaştırma cihazı ile kaplanmıştır. Tellür (IV) oksit malzemesi Al₂O₃ seramik pota içine yerleştirilerek 10⁻⁷ Torr vakum altında kesilmiş kristallerin parlak yüzeylerine buharlaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Aynı vakum cihazına bir adet de X-ışınımı kırınımı (XRD) analizleri için kaplanmak üzere bir adet cam bırakılmıştır.



Şekil 3.1. Nanovak NVTH-350 Termal buharlaştırma cihazı (Batman Üniversitesi).

3.1.3. Al/TeO₂/p-Si (MOS) yapılarının oluşturulması

Kesilmiş p-Si parlak yüzeyine kaplanmış TeO₂ film yüzeyine maskeleme uygulanarak Al doğrultucu kontaktların buharlaştırılması ile süreç tamamlanmıştır. Kaplama işlemi yine 10⁻⁶ Torr vakum altında %99,99 saf alüminyum metali buharlaştırılması ile gerçekleştirilerek Al/TeO₂/p-Si (MOS) yapısı (Şekil 3.2) oluşturulmuştur.



Şekil 3.2. Al/TeO₂/p-Si (MOS) yapısı.

3.2. Deneylerde Kullanılan Aletler

Cam yüzeye kaplı TeO₂ ince filmin yapısal analizi Şekil 3.3’de görüldüğü gibi Rigaku MiniFlez-II X-Işınımı kırınımı (XRD) cihazı ile yapılmıştır. Protherm PTF 12/75/800 (Şekil 3.4) tüp fırından tavlama işlemlerinde yararlanılmıştır. Al/TeO₂/p-Si (MOS) yapılarının karanlık altında ve oda sıcaklığındaki tüm elektriksel ölçümler Şekil 3.5’te de görüldüğü gibi kapalı kutu içerisinde gerçekleştirilmiştir. MOS yapıların akım-gerilim (*I-V*) ve kapasitans-gerilim (*C-V*) ölçümleri Keithley 4200 SCS (Semiconductor Characterization System) cihazı ile yapılmıştır.



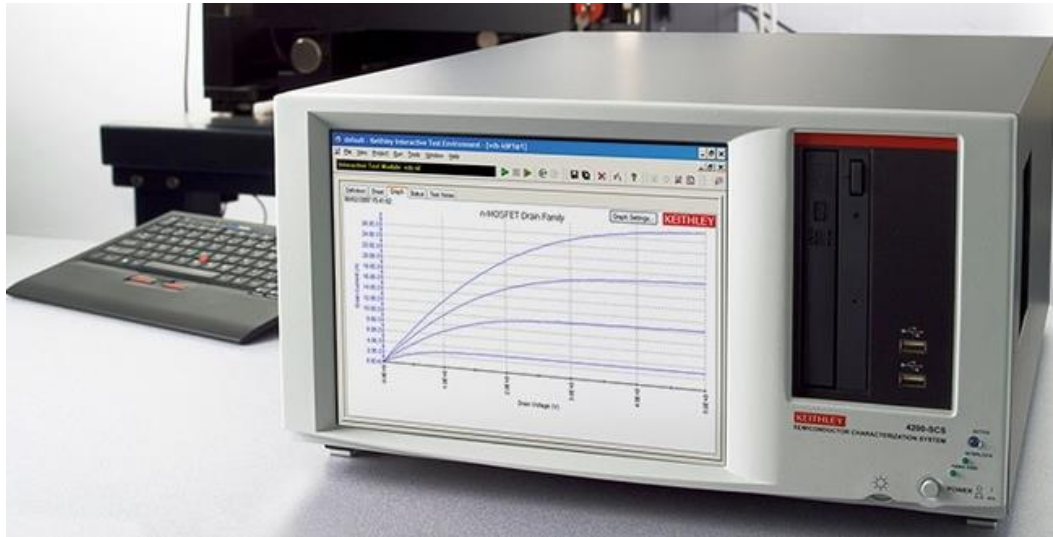
Şekil 3.3. X-Işını kırınımı (XRD) cihazı (Batman Üniversitesi).



Şekil 3.4. 0-1200 °C ayarlı Protherm PTF 12/75/800 tüp fırın (Batman Üniversitesi).



Şekil 3.5. MOS yapıların elektriksel ölçümlerin gerçekleştirildiği kapalı kutu (Batman Üniversitesi).



Şekil 3.6. Keithley 4200 SCS yarıiletken karakterizasyon cihazı.

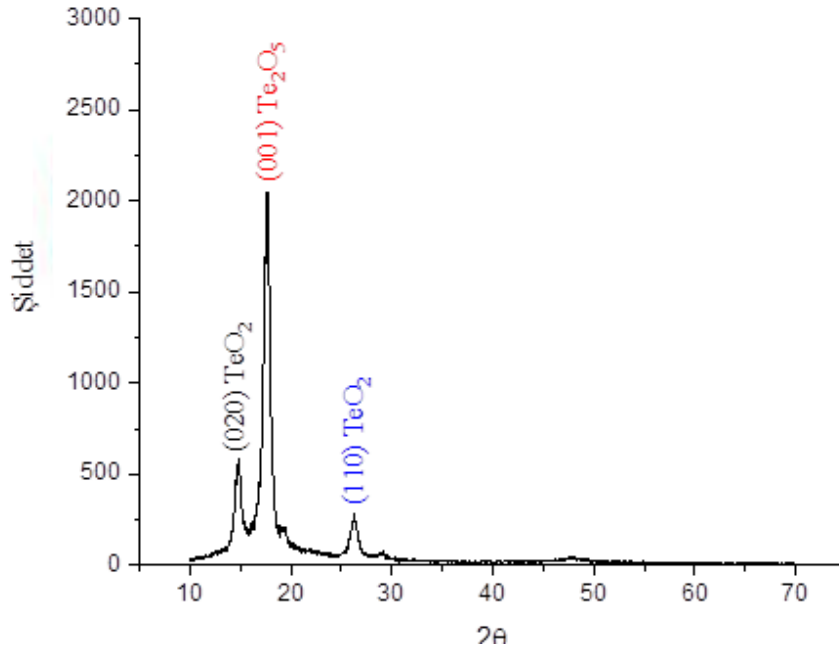
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. XRD Sonuçları

Doğrultucu kontak öncesi $\text{TeO}_2/\text{p-Si}$ yapısının film kaplı yüzeyinin ölçülen XRD desenleri Şekil 4.1’de görülmektedir. 14,84 derecede (020), 17,67 derecede (001) ve 26,22 derecede (110) yönelimlerine sahip sırasıyla ortonombik TeO_2 , monoklinik Te_2O_5 ve tetragonal TeO_2 yapılarının pikleri elde edilmiştir. Analizlenen pikler 9-433, 43-1047 ve 76-269 sıralı “standart PDF” numaraları ile uyumludur. Elde edilen bu piklerin ayrıca smooth very analizleri uygulanmış ve gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Çizelge 4.1’de analizlenen XRD desenlerinin verileri görülmektedir. 17,67 derecede elde edilen Te_2O_5 yapısında,



Ortamda oksijen olduğundan bu şekilde yapı elde edilmiştir. Diğer bir husus XRD desenlerinde alt tabaka olan Si elementinin pikleri rastlanmamıştır. Bunun nedenini de kaplama yüzeyinin tamamıyla üst yüzeyi sarmış olabileceği şeklinde düşünebiliriz.



Şekil 4.1. p-Si yüzeyine kaplı TeO_2 ince film XRD desenleri.

Çizelge 4.1. XRD desenlerinden bulunan veriler.

Formül	(hkl)	2θ (gözlemlenen)	2θ (PDF)	PDF No	Yapı	Boyutlar (a,b,c) (Å)
TeO ₂	(020)	14,84	14,72	9-433	Ortorombik	a=5,60, b=12,03, c=5,46
Te ₂ O ₅	(001)	17,67	17,07	43-1047	Monoklinik	a=5,36, b=4,69, c=7,95
TeO ₂	(110)	26,22	26,25	74-269	Tetragonal	a=4,79, c=7,62

4.2. Al/TeO₂/p-Si (MOS) Yapısının Akım-Gerilim (I-V) Sonuçları

300 K sıcaklıkta ve karanlık ortamda Al/TeO₂/p-Si (MOS) yapımızın elektriksel parametrelerinin analizleri için akım-gerilim (I-V) ölçüm karakterizasyonlarından yararlanılmıştır. Bilindiği gibi metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapılarında farklı akım-iletim kuramları mevcuttur. Bu tür yapılarda doğru gerilim altında ($V \geq 3kT/q$) ve seri direnç etkisinin olduğu ortamlarda akım-iletim kuramlarından olan termioyonik emisyon (TE) kuramı,

$$I = I_0 \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{-q(V - IR_s)}{kT}\right)\right] \quad (4.2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada ifade edilen doyum akımı I_0 , $\ln I-V$ grafik eğrisinden sıfır gerilimde kestiği noktadan;

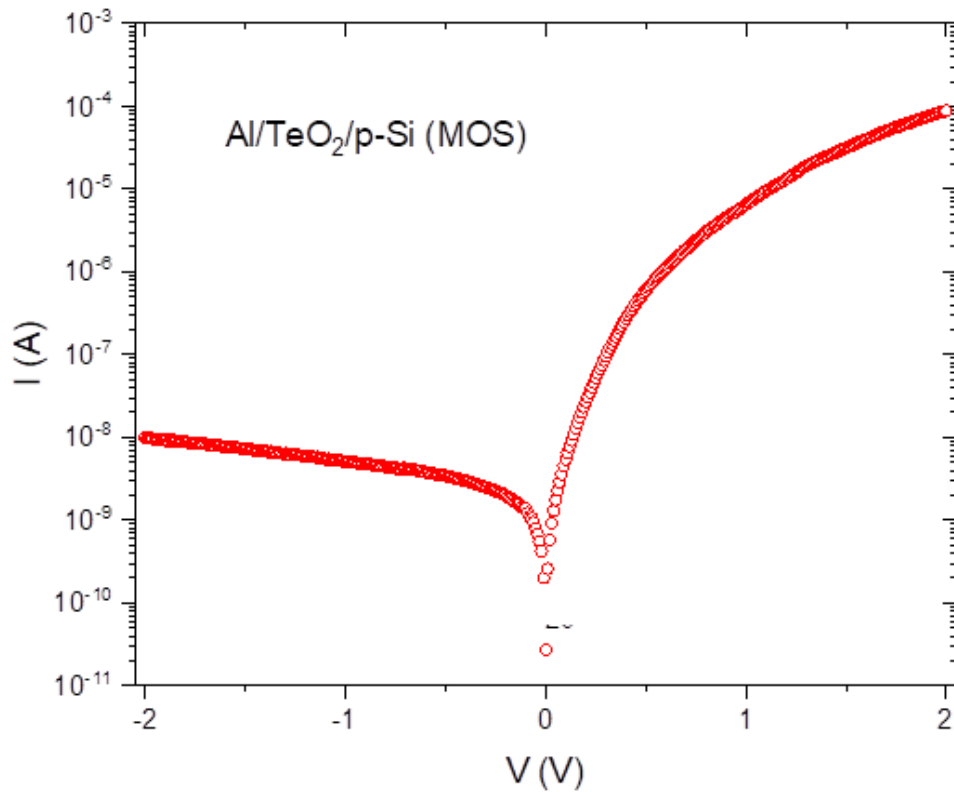
$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{b0}}{kT}\right) \quad (4.3)$$

ifadesi ile belirlenir. Burada A doğrultucu kontak alanı, A^* etkin Richardson sabiti ($32A/cm^2K^2$, p-tipi Si), n idealite faktörü, q elektron yükü, ϕ_{b0} sıfır beslem engel yüksekliği, R_s seri direnç ve T mutlak sıcaklığı ifade eder. Eşitlik 4.1'den idealite faktörü değeri,

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

ifadesi ile hesaplanabilir.

I - V ölçümlerinden elde edilen Al/TeO₂/p-Si (MOS) yapımızın $\ln I$ - V grafiği Şekil 4.2’de görülmektedir. Hesaplanan doğrultma (rectifying) oranı ± 2 V değerinde 10^4 oranındadır. Eşitlik (4.3) ve (4.4) yardımıyla Al/TeO₂/p-Si (MOS) yapımızın hesaplanan idealite faktörü değeri 1,55 ve sıfır beslem engel yüksekliği değeri de 0,76 eV olarak bulunmuştur. İdealite faktörü değerimiz ideal değer olan 1’den büyük çıkmıştır. Bunun nedeni Al/p-Si ara yüzeyinde TeO₂ ince filmin olmasından ve bu ara yüzey durumlarının dağılımı, yine ayrıca Şekil 4.2’de görüldüğü gibi +1 V’tan sonra bükülmenin sebep olduğu seri direncin varlığına atfedilebilir (ref).



Şekil 4.2. Al/TeO₂/p-Si (MOS) yapısının $\ln I$ - V grafiği.

4.2.1 Seri direnç hesaplama

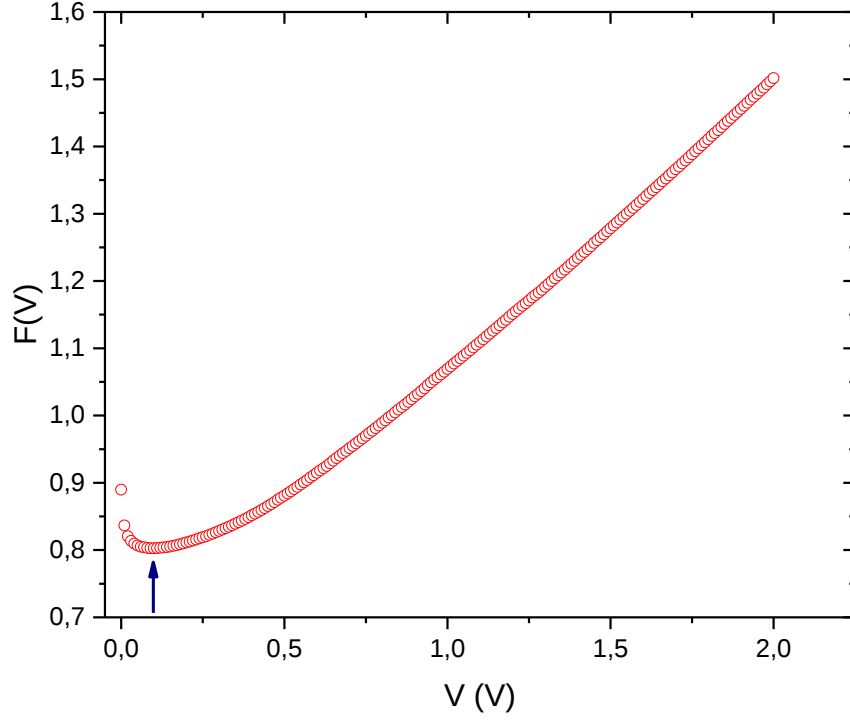
Metal/yarıiletken (MS) ve metal/oksit/yarıiletken (MOS) yapılarının akım-gerilim (I - V) ölçümlerinde belli gerilim değerlerinden sonra akım değerlerinde bükülme meydana gelebilmekte ve bu bükülmenin de yapıdaki seri direnç (R_s) etkisinden ortaya çıktığı belirtilmektedir. Al/TeO₂/p-Si (MOS) yapımızın (I - V) ölçümünde Şekil 4.2’de de görüleceği gibi +1 V’tan sonra bu şekilde bir bükülme meydana gelmiştir. Araştırmacılar bugüne kadar bu tip yapılarda seri direnci tayin etmek için birçok metot önermişlerdir (ref). Al/TeO₂/p-Si (MOS) yapımızın seri direnci belirlemede ilk uyguladığımız metot Norde tarafından geliştirilmiş metottur (Norde, 1979). Norde metodunda seri direnci tayin etmek için bir $F(V, \gamma)$ fonksiyonu belirlenir. Buna göre;

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

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

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

eşitliklerinden yararlanılır. Eşitliklerde yer alan gama (γ) ifadesi değeri idealite faktörü değerinden büyük en küçük tam sayıyı, V_0 Norde fonksiyonundaki minimum gerilim ve I_{min} da minimum akım değerlerini vermektedir.



Şekil 4.3. Al/TeO₂/p-Si (MOS) yapısının Norde grafiği.

Eşitlik (4.5)'den yararlanarak bulunan Norde fonksiyonu Şekil 4.3'de verilmiştir. V_{min} ve I_{min} değerleri sırasıyla 0,1 V ve $5,43 \times 10^{-9}$ A olduğu bulunmuştur. Eşitlik (4.6) ve (4.7) den faydalanılarak hesaplanan seri direnç ve engel yüksekliği değerleri sırasıyla 2150 K Ω ve 0,82 eV olarak bulunmuştur.

Seri direnç tayin metotlarından bir tanesi de Cheung'ler tarafından önerilen fonksiyonlar vasıtasıyla analizlenen metottur (Cheung ve Cheung, 1986). Cheungler akım-gerilim (I - V) ölçümü gerçekleşen yapının analizlerinde, doğru gerilim I - V eğimlerinin tam büküm noktasından itibaren seri direncin etkili olacağını ifade etmekte ve bu büküm noktasının seri direnç değerini hesaplamada dikkat etmemiz gerektiğini belirtmektedir. Cheung metoduna göre Eşitlik (4.2)'in her iki yanının logaritması alınıp yeniden düzenlenirse,

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

olur ve $\ln I$ 'ya göre diferansiyeli alınırsa,

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

ifadesi elde edilir. Diğer taraftan da

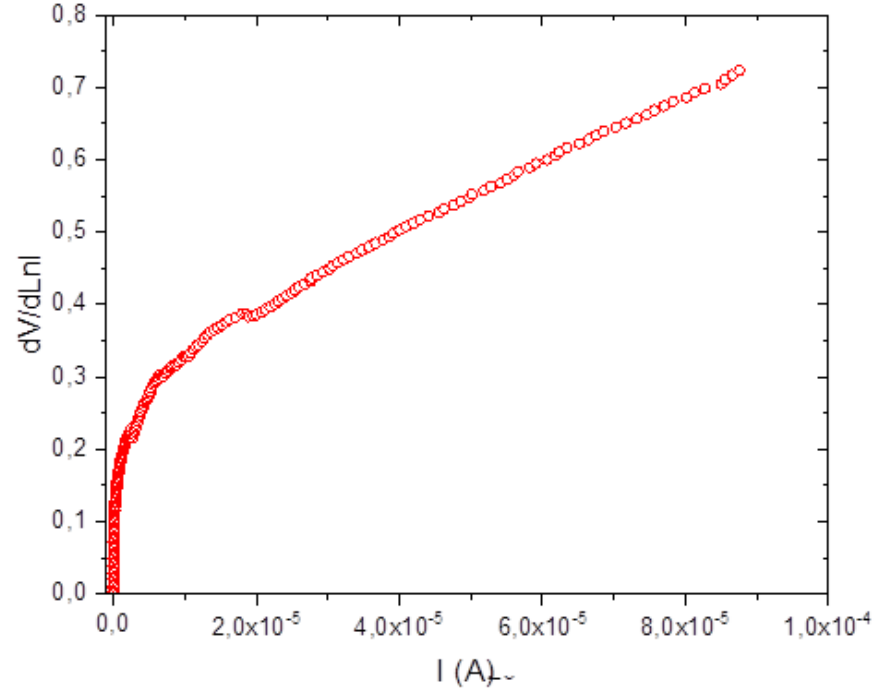
$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (4.10)$$

$H(I)$ fonksiyonu belirlenerek seri direnç tayin edilebilir. Bu ifadeye göre $H(I)$,

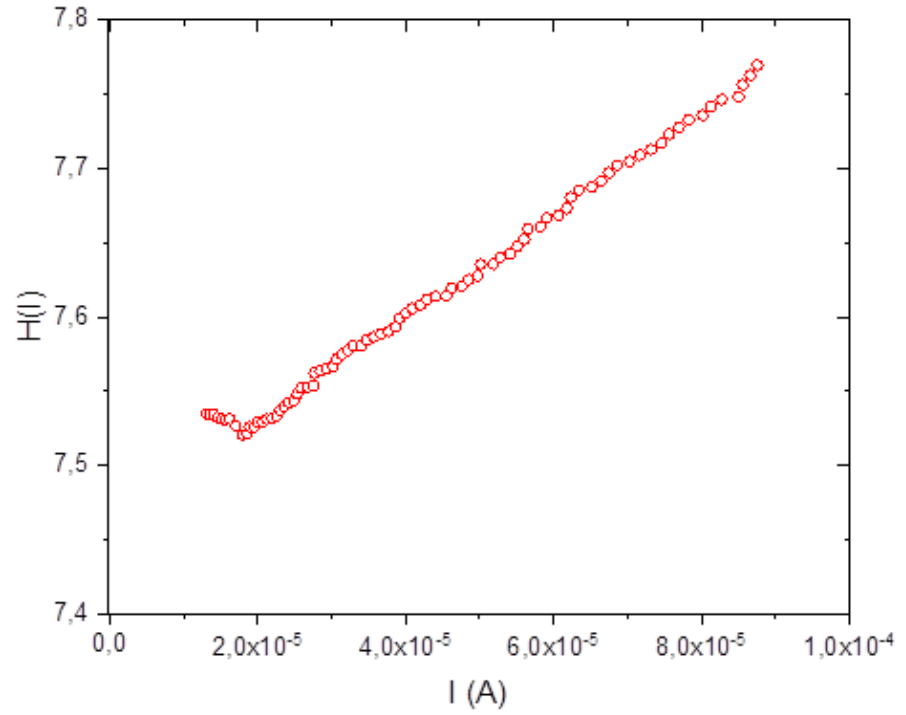
$$H(I) = n\phi_b + IR_s \quad (4.11)$$

olur.

(4.9) ve (4.11) eşitliğinden yararlanarak Al/TeO₂/p-Si (MOS) yapımızın $dV/d(\ln I)$ - I ve $H(I)$ - I grafikleri Şekil 4.4 ve 4.5 verilmiştir. Eşitlik (4.9) ve $dV/d\ln(I)$ - I eğimi kullanılarak idealite faktör ve seri direnç değerini hesaplayabiliriz. Analizlenen deneysel sonuçlardan idealite faktör ve seri direnç değeri 11,5 ve 4918 Ω olarak hesaplanmıştır. Diğer taraftan eşitlik (4.11) ve $H(I)$ - I eğiminden faydalanarak engel yüksekliği ve seri direnç değerini de bulabiliriz. Engel yüksekliği ve seri direnç değeri 0,65 eV ve 3470 Ω olarak hesaplanmıştır. Tablo 4.2’de I - V ölçümlerinden hesaplanan tüm elektriksel parametreler verilmiştir.



Şekil 4.4. Al/TeO₂/p-Si (MOS) yapısının $dV/d(LnI)$ - I grafiği.



Şekil 4.5. Al/TeO₂/p-Si (MOS) yapısının $H(I)$ - I grafiği.

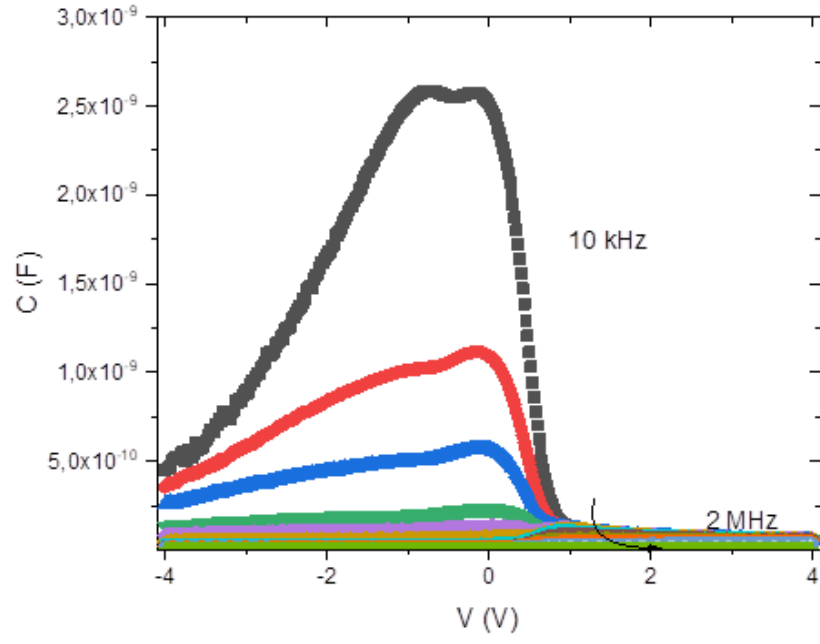
Çizelge 4.2. Al/TeO₂/p-Si (MOS) yapısının I - V ölçümünden hesaplanmış elektriksel parametre değerleri.

I - V ($\ln(I)$ - V)			Norde ($F(V)$ - V)		Cheung 1 ($dV/d(\ln I)$ - I)		Cheung 2 ($H(I)$ - I)	
n	Φ_b (eV)	I_0 (A)	R_s (K Ω)	Φ_b (eV)	R_s (Ω)	n	R_s (Ω)	Φ_b (eV)
1,55	0,76	$4,5 \times 10^{-10}$	2150	0,82	4918	11,5	3470	0,65

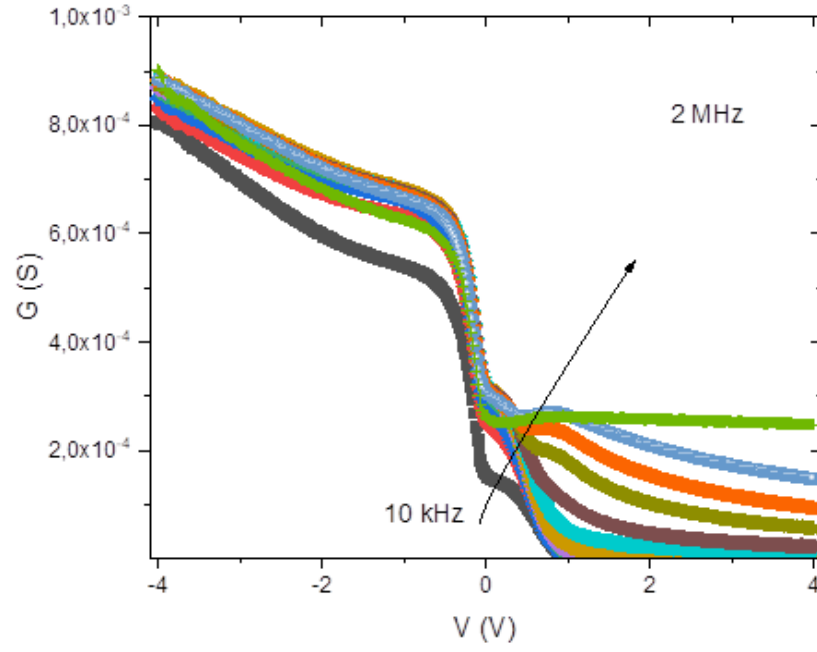
Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi termoiyonik emisyon teorisinden hesaplanan idealite faktörü değeri 1,55, Cheung fonksiyonundan hesaplanan değer de 11,5 olup termoiyonik kuramından hesaplanan değere göre çok yüksektir. Aradaki farkın bu denli yüksek olmasının nedeni ara yüzey durumlarına, p-Si ile Al ara yüzeyinde yer alan TeO₂ oksit tabakasının dielektrik sabitine ve kalınlığının yanında; seri direnci hesaplar iken kullanılan metotlar farkı gibi etmenlere bağlanmaktadır. Yine çizelge 4.2’de de görüldüğü gibi her bir metotta hesaplanan engel yükseklikleri ve seri direnç değerleri de birbirlerinden farklıdır. Nedeni ise hesaplamalarda termoiyonik emisyon kuramında doğru beslemdeki I - V değişiminin lineer kısmı, Norde ileri beslemdeki I - V değişiminin tamamındaki veriler ve Cheung fonksiyonunda da I - V değişiminin bükülme anındaki başlama yerinden itibaren lineer olmayan kısımlar kullanır. Bu nedenle Cheung fonksiyonundan elde edilen seri direnç değeri Norde yönteminden elde edilen seri direnç değerinden oldukça büyüktür.

4.3. Kapasite-Gerilim (C - V) Sonuçları

Oda sıcaklığı ve karanlık altındaki Al/TeO₂/p-Si (MOS) yapımızın kapasite-gerilim (C - V) ve iletkenlik-gerilim (G / V) analizleri sabit frekans 10 kHz-2 MHz aralığında gerçekleştirilmiş ve ilgili grafikler Şekil 4.6(a) ve 4.6(b)’de gösterilmiştir. Kapasite-gerilim (C - V) grafiğinde görüleceği gibi kapasite değeri uygulanan sabit frekans değeri yükseldikçe kuvvetli yığılma bölgesinden kuvvetli tersinim bölgesine doğru alçalmaktadır. Aynı şekilde tüketim ve yığılma bölgesinde de yapımızın kapasite değeri uygulanan sabit frekansın yükselmesiyle alçalmaktadır. Frekansa bağımlı iletkenlik-gerilim (G / V) değişimlerin de tüketim bölgesinde uygulanan sabit frekansın yükselmesiyle alçalmış ve yığılma bölgesine doğru kaymıştır.



(a)



Şekil 4.6. Farklı frekanslardaki Al/TeO₂/p-Si (MOS) yapısının oda sıcaklığında (a) C - V (b) G / V eğrileri.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Sigma Aldrich firmasından alınmış 243450 ve 7446-07-3 CAS numarası sahip Tellür (IV) oksit arayüzey malzemesi Al/p-Si yapısına katkılanarak Al/TeO₂/p-Si metal/oksit/yarıiletken (MOS) yapısı elde edilmiştir.

Çalışmamızın ilk aşamasında temizlenmiş ve omik kontağı hazır p-Si alttaş üzerine termal buharlaştırma metoduyla TeO₂ kaplanmıştır. TeO₂/p-Si yüzeyinin yapısal analizi X-ışını kırınım (XRD) metoduyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen XRD kırınım desenlerinden 14,84 derecede (020), 17,67 derecede (001) ve 26,22 derecede (110) yönelimlerine sahip sırasıyla ortorombik TeO₂, monoklinik Te₂O₅ ve tetragonal TeO₂ yapılarının pikleri elde edilmiştir. Analizlenen pikler 9-433, 43-1047 ve 76-269 numaralı “standart PDF” numaraları ile uyumludur. Elde edilen bu piklerin ayrıca smooth very analizleri “Microcal Origin 8.0” yazılımı ile uygulanmış ve gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Te₂O₅ piki görülmesinin sebebi de ortamda oksijen olmasına yorumlayabiliriz. Ayrıca XRD desenlerinde alt tabaka olan Si elementinin pikleri rastlanamamasının nedenini de kaplama yüzeyinin tamamıyla üst yüzeyi sarmış olabileceği şeklinde düşünebiliriz.

Sonraki işlemlerde; ince film kaplı yüzeye termal buharlaştırma yöntemiyle Al doğrultucu kontağı uygulanarak Al/TeO₂/p-Si metal/oksit/yarıiletken (MOS) yapısı elde edilmiştir. Elde edilen Al/TeO₂/p-Si (MOS) yapısının oda sıcaklığında ve karanlık altındaki elektriksel karakterizasyonları akım-gerilim (*I-V*) ve kapasite-gerilim (*C-V*) ölçümleri ile gerçekleştirilmiştir.

I-V ölçümlerinden Al/TeO₂/p-Si (MOS) yapısının *LnI-V* grafiği çizilmiş ve yapının doğrultma (rectifying) oranı $\pm 2V$ değerinde 10^4 oranındadır. İdealite faktörü değeri 1,55 ve sıfır beslem engel yüksekliği değeri de 0,76 eV olarak hesaplanmıştır. İdealite faktörü değerinin 1 den büyük çıkmasının sebebi Al/p-Si arasındaki oksit tabakanın varlığına ve arayüzey durum dağılımlarına, ayrıca da p-Si yarıiletken tabakasının nötral bölgesinin seri direncinin yüksek olması ideallikten sapmaya atfedilebilir (Singh 1985; Szatkowski ve Sieranski 1988; Cova ve Singh 1990; Singh,1990). Pakma ve arkadaşları; yapmış oldukları çalışmada Al/p-Si arayüzeyine oksit tabaka olarak zirkonyum oksit (ZrO₂) malzemesi kaplayarak elde ettikleri Al/ZrO₂/p-Si (MOS) yapısının idelite faktörü değerlerini ZrO₂ kalınlığına bağlı olarak 2,07-2,34 arasında ve engel yüksekliği değerlerini de 0,622-0,706 eV arasında hesaplamışlardır (Pakma vd., 2016).

Al/TeO₂/p-Si (MOS) yapımızın $LnI-V$ grafiğinde + 1 V'tan sonra R_s etkisinden dolayı bükülme olduğu görülmüştür. R_s etkisini de Norde ve Cheung yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Norde metodundan R_s ve Φ_B değerleri sırasıyla 2150 K Ω ve 0,82 eV olarak bulunmuştur. Cheung yöntemiyle n ve R_s için hesaplanan deneysel sonuçlar 11,5 ve 4918 Ω olarak bulunmuştur. Diğer taraftan eşitlik (4.11) ve $H(I)-I$ eğiminden faydalananarak Φ_B ve R_s için hesaplanan deneysel sonuçlar 0,65 eV ve 3470 Ω olarak bulunmuştur. TE kuramından analizlenen idealite faktörü değeri 1,55 hesaplanmasına rağmen Cheung metodundan hesaplanan değerin 11,5 gibi yüksek bir değerde olması arayüzey durumlarına, arayüzeyde yer alan oksit tabakanın dielektrik sabitine ve oksit tabakanın kalınlığının yanında; seri direnci hesaplar iken kullanılan yöntem farkı gibi etmenlere bağlanmaktadır. Diğer taraftan her bir yöntemde hesaplanan engel yükseklikleri ve seri direnç değerleri de birbirlerinden farklıdır. Çünkü TE yönteminde ileri beslemdeki $I-V$ eğrisinin lineer kısmı, Norde ileri beslemdeki $I-V$ değişiminin bütünündeki verileri ve Cheung fonksiyonun da ise $I-V$ değişiminin bükülme anı ile başladığı yerdeki lineer olmayan kısmı kullanır. Bu nedenle Cheung yönteminden elde edilen seri direnç değeri Norde fonksiyonundan elde edilen seri direnç değerinden oldukça büyüktür.

Al/TeO₂/p-Si (MOS) yapımızın oda sıcaklığı altındaki kapasite-gerilim ($C-V$) ve iletkenlik-gerilim (G/V) analizleri sabit frekans 10 kHz-2 MHz aralığında yapılmıştır. MOS yapımızda kapasitans değeri uygulanan sabit frekans değeri yükseldikçe kuvvetli yığılma bölgesinden kuvvetli tersinim bölgesine doğru alçalmaktadır. Diğer taraftan tüketim ve yığılma bölgesinde de yapımızın kapasitans değeri uygulanan sabit frekansın artmasıyla azalmaktadır. Frekansa bağımlı G/V değişimlerin de tüketim bölgesinde uygulanan sabit frekansın artmasıyla azalmış ve yığılma bölgesine doğru kaymıştır. Analizlenen $C-V$ ve $G-V$ grafik eğimleri ideal MIS yapısı grafikleri ile uyumlu olduğu görülmektedir (Sze ve Kwog, 2007).

Elektronik aygıt teknolojisinde kullanılan oksit malzemelere aday olabilecek tellüroksit (TeO₂), silisyumoksit (SiO₂) gibi malzemelere karşı aday potansiyel bir malzemedir. Özellikle yüksek dielektrik özelliğe sahip malzeme olması, elde edilebilir ve ucuz olması teknolojide kullanımını cazip hale getirmektedir (Luo, vd. 2023).

KAYNAKLAR

- Akyüz, A. H., 2021, Krom katkılı HfO₂ İnce filmlerin fiziksel özelliklerini incelenmesi, *Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* , Batman, 13-21.
- Al-Kuhaili, M.F., 2004, “Optical properties of hafnium oxide thin films and their application in energy-efficient Windows” *Optical Materials*.
- Altıparmak, İ., 2019, Porfirin tabanlı üretilmiş langmuir-blodgett (LB) ince filmlerde organik buharların difüzyon katsayılarının hesaplanması, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 5-7.
- Aydoğan , Ş., 2001, Katıhal Fiziği Nobel Akademik Yayıncılık Türkiye.
- Aynibal , F., 2009, IVB Grubu Metal Borürlerin ve Lantan Hekzaborürün Mekanokimyasal Reaksiyon Ortamında Sentezlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* 60-62.
- Aytuğ, C.. 2020, Fiziksel buhar biriktirme yöntemi ve Doktor Blade kaplama tekniği ile üretilen CuInSe₂ ince Filmlerin özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli,
- B. D. Colwell., 20 Interesting Facts About Tellurium. (18 Mayıs 2019). Alındığı Tarih: 13 Şubat 2021. Alındığı Yer: Brian D. Colwell. Arşiv Bağlantısı. <https://briandcolwell.com/20-interesting-facts-about-tellurium/>.
- Binnig, G., Quate, C. F., & Gerber, C., 1986., Atomic force microscope. *Physical review letters*, 56(9), 930.
- Boher, p., Defraneaoux C, Heinrich p, Wolsenholme J, Bender H ,2004, “VUV Spectroscopic ellipsometry applied to the characterization of high-k dielectrics” *Mat Sci Eng B*109:64
- Bouchenaki, C., Ullfich, B, and Zielenger, J,P., 1991, “Preparation Characterization and Bistable Photoconductivity Properties of Thin CdS Layers”, *Opt,Soc,Am,,B8*, 691-700
- Cullity, B.D., 1978, *Elements of X-Ray Diffraction*. 2nd Edition, Addison- Wesley publishing Company, Inc., Reading , MA, 102.
- Demir. A., 2021, Ag Katkılı Metal/HfO₂/C-Si Yapılarının Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Batman,

- Deng B., He G., Lv J. G., Chen X.F., Zhang J.W., Zhang M.,Sun Z. Q., 2014, “Modulation of the structural and optical properties of sputtering –derived HfO₂ films by deposition power” *Optical Materials* 245-250:37
- Durmuş, O., 2011, Vanadyum oksit İnce filmlerinin sol –jel yöntemi ile hazırlanması ve karakterizasyon, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı* , İstanbul,
- Encyclopedia Britannica. Tellurium. Chemical Element. Alındığı Tarih: 13 Şubat 2021. Alındığı Yer: Encyclopedia Britannica. Arşiv Bağlantısı. <https://www.britannica.com/summary/tellurium#:~:text=tellurium%2C%20Metallic%20chemical%20element%2C%20chemical,properties%20as%20ductility%20and%20machinability..>
- Erdem, E., 2021, Sılar Yöntemi Kullanılarak PbO İnce Filminin Üretimi ve Pb/PbO/ p-Si MIS Kontaktlarının elektronik ve arayüzey Özellikleri, Yüksek lisans Tezi, *Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* , Batman, 18-21.
- Ersanlı, C. C., 2004, Bazı organik ve organo-metalik kristallerin kristal yapılarının tayini, Doktora Tezi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı* , Samsun,
- Ertuğrul. G., Metal/Al_{0.20}Ga_{0.80}N Schottky Diyotun Akım –Gerilim Ölçümlerinden Engel Yüksekliğinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri,15-20.
- Fang Q, Zhang JY, Wang ZM, He,G,Yu J,Boyd JW., 2003, High-k dielectrics by UVphoto-assisted chemical vapour deposition, *Microel Eng* 66 :621
- Ferrari, S., Modreanu M, Scarel G, Fancinelli M (2004) “ X-Ray reflectivity and layers in high-κ materials” *Thin Solid Films* 450:124
- Güllü, Ö., 2008, H₂ Öntavlamalı Au/n-GaAs Diyotlarda Elektriksel Karakteristiklerin Schottky Metal Kalınlığı Ve Sıcaklığa Bağlı Değişiminin İncelenmesi , Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum,15-25
- Hakeem A., Ramzan M., Ahmed E., Rana A,M,,Khalid N,R,,Niaz N,A,, Selek,H.S., 2008, Elektronik-1 Seçkin Yayıncılık, Ankara,
- Kalem, V., 2003, (1-X)TeO₂-XGeO₂(X=0,10,0.20,0.30) Camların Isıl Analizi ve Mikroyapısal İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-4.

- Kalužný, J., Ležal, D., Kublíha, M., Pedlíková, J., & Mariani, E. (2002). Electrical and dielectric properties of TeO₂-ZnO glasses. *Ceramics– Silikáty*, 46(4), 140-147.
- Kasap, S., Capper, P., 2006, dielectric materials for microelectronics, Springer Handbook of Electronic and photonic Materials
- Karimi, J., 2016, Fe ve Cu içelikli metal organik tek kristallerinin sentezlenmesi, kristal yapılarının analizi ve manyetik özelliklerin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırıkkale 2-6.
- Kaval, Ş., 2018, Sol-Jel yöntemiyle hazırlanmış Ag katkılı HfO₂ İnce Filmlerin yapısal ve optiksel özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı*, Batman, 9-12.
- Kutlu, T. (2012). Polimerik membranlar kullanılarak bazı metallerin sulu çözeltilerden destekli sıvı membran tekniği ile ayrılması, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli,
- Lenntech. Tellurium (Te) - Chemical Properties, Health And Environmental Effects. Alındığı Tarih: 13 Şubat 2021. Alındığı Yer: Lenntech. Arşiv Bağlantısı. <https://www.lenntech.com/periodic/elements/te.htm>.
- Özdemir, C., 2018, Kimyasal Banyo Depolama Yöntemiyle Hazırlanmış ZrO₂ İnce Filmlerin yapısal ve optiksel Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Batman,
- Özenç, M. E., 2022, Trimetilolpropane Triakrilat (Tmpta) Arayüze Sahip Metal-Polimer-Yarıiletken (Mps) Aygıtların Elektriksel Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Batman,
- Pakma, O., 2008, Metal/ TiO₂ / C-Si/ Metal Yapılarında Yüzey Şartlarının Elektriksel Belirtilenler Üzerindeki Etkisi, Doktora Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı*, Ankara, 3-22.
- Pakma, O., Özdemir, C., Kariper, İ. A., Özyayın. C., Güllü, Ö., (2016). Wet chemical methods for producing mixing crystalline phase ZrO₂ thin film. 377, 159-166.
- Pirgholi-Givi, G., Altındal, Ş., Asl, M. S., Namini, A. S., Farazin, J., & Azizian-Kalanderagh, Y. (2021). The effect of cadmium impurities in the (PVP–TeO₂)

interlayer in Al/p-Si (MS) Schottky barrier diodes (SBDs): Exploring its electrophysical parameters. *Physica B: Condensed Matter*, 604, 412617.

Royal Society of Chemistry. Tellurium - Element Information, Properties And Uses. Periodic Table. Alındığı Tarih: 13 Şubat 2021. Alındığı Yer: Royal Society of Chemistry. Arşiv Bağlantısı. <https://www.rsc.org/periodic-table/element/52/tellurium>.

Shakoor A., Samia Ali ,Ureed Asghar, Nadeem M,Y,,(2015) “Effects of vacuum annealing on surfaca and optical constants of hafnium oxide thin films” *Materials Sciencein Semiconductor Processing* 98:30.

Şafak, B., 2012, Dört Dişli Schiff Bazı Ligandları Kullanılarak Sentezlenen Demir Komplekslerinin Kristal Yapılarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi.

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı. Balıkesir,3-9.

ThoughtCo. What Is Tellurium Metal Used For?. Alındığı Tarih: 13 Şubat 2021. Alındığı Yer: ThoughtCo | Arşiv Bağlantısı. <https://www.thoughtco.com/metal-profile-tellurium-2340156#:~:text=Tellurium%20is%20a%20heavy%20and,semiconductor%20in%20solar%20cell%20technology>.

Yıldırım, E., 2013, Znse Yarıiletken ince filmlerinin karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Mersin, 11.