



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MOS YAPILARIN DİELEKTRİK
UYGULAMALARI İÇİN VANADYUM OKSİT
İNCE FİLMLERİN İNCELENMESİ

Yusuf BİLGİN
DOKTORA TEZİ
Fizik Anabilim Dalı

2019
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Yusuf BİLGİN tarafından hazırlanan "MOS Yapıların Dielektrik Uygulamaları İçin Vanadyum Oksit İnce Filmlerin İncelenmesi" adlı tez çalışması 25/12/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Ali YILMAZ

Danışman

Doç. Dr. Osman PAKMA

Üye

Prof. Dr. M. Zafer KÖYLÜ

Üye

Prof. Dr. Sezai ASUBAY

Üye

Doç. Dr. Ömer GÜLLÜ

İmza

.....

.....

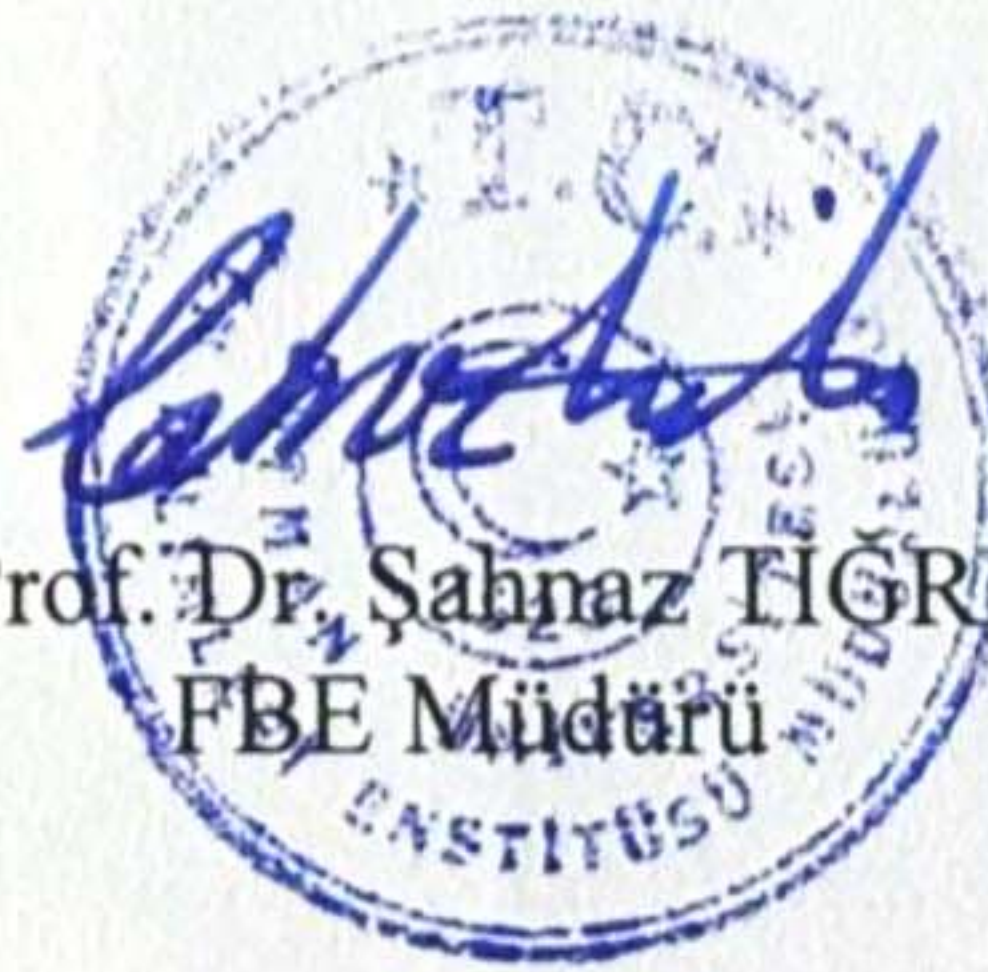
.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Şahnaz TİGREK
FBE Müdürü

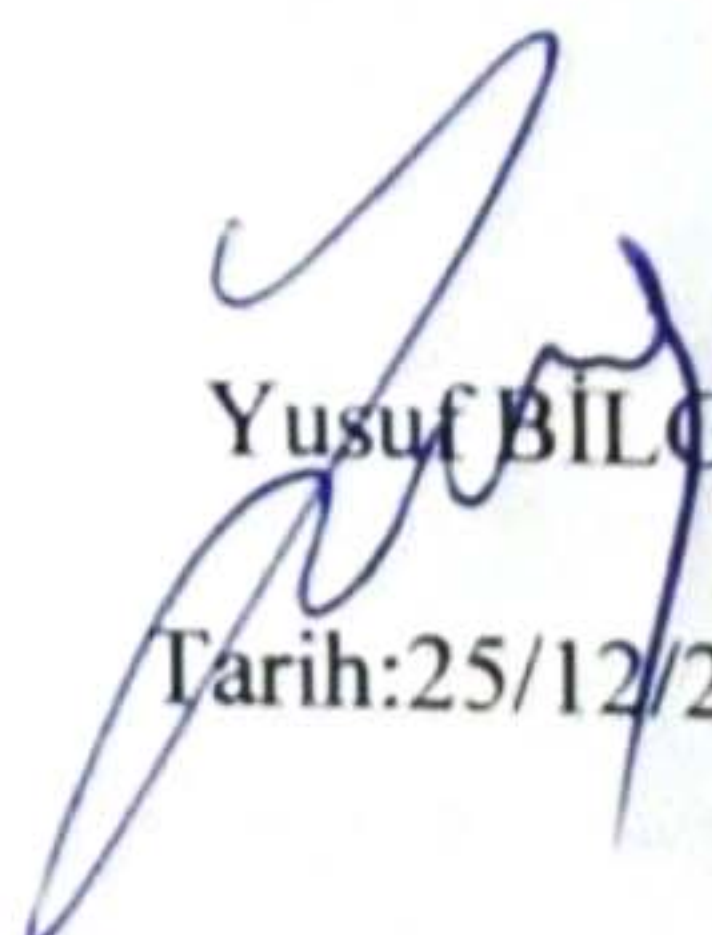


TEZ BİLDİRİMİ

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.


Yusuf BİLGİN

Tarih:25/12/2019

ÖZET

DOKTORA TEZİ

MOS YAPILARIN DİELEKTRİK UYGULAMALARI İÇİN VANADYUM OKSİT İNCE FİMLERİN İNCELENMESİ

Yusuf BİLGİN

Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Osman PAKMA

2019, 112 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Osman PAKMA

Prof. Dr. Ali YILMAZ

Prof. Dr. M. Zafer KÖYLÜ

Doç. Dr. Ömer GÜLLÜ

Prof. Dr. Sezai ASUBAY

Bu çalışmada V_3O_7 ve V_8O_{15} ince filmler sol-jel daldırma yöntemiyle cam ve p-Si yarıiletken yüzeyler üzerine kaplanmış; AFM ile yüzey yapısı araştırılmış, XRD ile filmlerin polikristal yönelimleri ve kristal yapıları incelenmiştir. EDX ile filim muhtevası araştırılmış. UV-VIS ölçümleri ile optik özellikleri araştırılmıştır. Elde edilen filmlerden Al/VOx /p-Si/Al MOS yapılar oluşturularak akım-gerilim, kapasite-gerilim-frekans yöntemleriyle elektriksel ve fiziksel özellikler incelenmiştir.

İnce filmleri elde etmek için %99 saflıkta V_2O_5 tozu, HCl, HNO_3 , H_2O_2 çözücülerinin farklı birleşimleri içinde çözünerek homojen çözeltiler elde edilmiş ve kaplanacak olan cam veya p-Si yüzey bu çözelti içerisine $600 \mu m/s$ hızla daldırılmıştır. Bu şekilde kaplanan yüzey öncelikle 300 derece 5 dakika tavlama işlemine tabi tutulmuş 10. kattan sonra 400 ile 500 derece arasında değişen sıcaklıkta 1 saat tavlama tabi tutulmuştur.

MOS yapılar elde etmek için p-Si üzerine elde edilen filmlerin bir tarafı buharlaştırma yöntemiyle Al kaplanmış, diğer tarafı yine buharlaştırma yöntemiyle delikli maske kullanılarak Al kaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: İnce Film, MOS, V_3O_7 , V_8O_{15} , Vanadyum Oksit

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

INVESTIGATION OF VANADIUM OXIDE THIN FILMS FOR DIELECTRIC APPLICATIONS OF MOS STRUCTURES

Yusuf BİLGİN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Osman PAKMA

2019, 112 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Osman PAKMA

Prof. Dr. Ali YILMAZ

Prof. Dr. M. Zafer KÖYLÜ

Assoc. Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

Prof. Dr. Sezai ASUBAY

In this study, V_3O_7 and V_8O_{15} thin films were coated on glass and p-Si semiconductor surfaces by sol-gel dipping method; Surface structure was investigated by AFM, polycrystalline orientation and crystal structure of the films were examined by XRD. Film content was investigated with EDX. Optical properties were investigated by UV-VIS measurements. Al / p-Si / VOx / Al MOS structures were obtained from the obtained films then electrical and physical properties were examined by current-voltage, capacity-voltage-frequency methods.

In order to obtain thin films, 99% pure V_2O_5 powder was dissolved in different combinations of HCl, HNO_3 , H_2O_2 solvents. After homogeneous solutions were obtained glass or p-Si surface to be coated was dipped into this solution at $600 \mu m / s$. The coated surface was exposed to annealing at 300 degrees for 5 minutes. After the 10th layer coated film annealed for 1 hour at a temperature between 400 and 500 degrees.

In order to obtain MOS structures, p-Si substrate were coated with Al by evaporation technique. The other side of the film firstly coated by VOx by the same technique above the film was then coated with Al using a mask.

Keywords: Thin Film, MOS, V_3O_7 , V_8O_{15} , Vanadium Oxide

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında VO_x ince filmlerinin sol-jel daldırma yöntemle büyütülmesi, elektriksel iletkenliğinin ölçülmesi, VO_x ince filmlerinin yüzey yapısının AFM ile araştırılması, kırınım yöntemiyle ince filmlerin polikristal yönlenmelerinin belirlenmesi; bu filmlerden çeşitli MOS (metal-oksit-yarıiletken) yapıları yapılarak, oksit-yarıiletken ara yüzeyinde oluşan yüzey durumlarının akım-gerilim ve kapasite-gerilim-frekans yöntemiyle elektriksel belirtkenleri arasındaki fiziksel ilişkinin araştırılması yapılmıştır.

Yusuf BİLGİN
BATMAN-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER	3
2.1 Yarı İletkenler	3
2.2 Bant Teorisi.....	3
2.3 Metal-Yarıiletken Kontaklar	5
2.4 Metal-Yarıiletken Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları	10
2.4.1 Termiyonik emisyon.....	11
2.4.2 Difüzyon teorisi.....	14
2.4.3 Engel boyunca tünelleme	15
2.5 Metal Oksit Yarıiletken (MOS) Yapılar	16
2.5.1 İdeal MOS kapasitör.....	16
2.5.2 SiO ₂ – Si MOS kapasitörler.....	26
2.6 Metal Oksit Yapılarda Elektriksel Özellikler.....	34
2.6.1 Metal-yarıiletken kontaklarda kapasitans gerilim ölçümleri.....	34
2.6.2 Metal-yarıiletken kontaklarda akım gerilim ölçümleri	36
2.7 Vanadyum Oksitler ve Özellikleri	38
2.8 İnce Film Kaplama Yöntemleri.....	41
2.8.1 Sol – jel yöntemi.....	42

2.8.2	Buharlaştırma yöntemi	46
2.9	İnce Film Optiği (UV-VIS).....	52
2.10	İnce Film Analiz Yöntemleri.....	53
2.10.1	X-ışını kırınımı (XRD).....	53
2.10.2	Taramalı elektron mikroskopu (SEM)	56
2.10.3	Atomik kuvvet mikroskobu (AFM)	58
2.10.4	Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX).....	60
3.	MATERYAL VE YÖNTEM.....	63
3.1.	p-Si ve Cam Tabanların Temizlenmesi.....	63
3.2.	VO _x Çözeltisinin Hazırlanması	64
3.3.	İnce Filmlerin Kaplanması.....	65
3.4.	Elektriksel Ölçümler İçin Cam Yüzeylerin Hazırlanması	67
3.5.	MOS Yapıların Oluşturulması	67
3.6.	Optik-Yapısal ve Elektriksel Ölçümler	69
4.	ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	71
4.1.	X-İşını Kırınımı (XRD) Sonuçları	71
4.2.	AFM ve SEM Sonuçları.....	78
4.3.	Morötesi-Görünür Bölge Spektroskopisi (UV-VIS).....	83
4.4.	Enerji Ayrımlı X-İşını Spektroskopisi (EDX) Sonuçları	89
4.5.	Elektriksel Özellikler	89
4.5.1.	Kapasite – gerilim (C-V) ölçümleri.....	90
4.5.2.	Akım – gerilim (I-V) ölçümleri.....	95
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	100
	KAYNAKLAR	105
6.	ÖZGEÇMİŞ	112

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A^*	Richardson sabiti
Ag	Gümüş
Al	Alüminyum
Au	Altın
B	Manyetik alan
χ	Elektron eğilimi
C	Toplam kapasitans
C_0	Oksit tabakası kapasitansı
C_j	Boşalım katmanı kapasitansı
Cr	Krom
C-V	Kapasitans-Voltaj
δ	Film kalınlığı
d	Atomlar arası uzaklık
$\Delta\phi_\beta$	Schottky Engel Alçalması
D_{it}	Ara yüz tuzağı yoğunluğu
D_n	Elektron difüzyon sabiti”
E	Elektrik alan
e	Elektronun yükü
E_a	Aktivasyon enerjisi
E_F	Fermi düzeyi
E_m	Maksimum Elektrik Alan
f	Frekans
ϕ_B	Bariyer yüksekliği
$\phi_{\beta o}$	Sıfır Beslem Potansiyel Engel Yüksekliği
ϕ_M	Metal iş fonksiyonu
g	Yerçekimi ivmesi
H_2O_2	Hidrojen peroksit
HCl	Hidroklorik asit
HNO_3	Nitrik asit

I_0	Doyma Akımı
J_0, J_{SD}	Doyma akım yoğunluğu
J_n	Toplam akım yoğunluğu
K	Kelvin
k	Boltzmann sabiti
λ	Dalga boyu
Li	Lityum
m^*	Etkin kütle
n	İdealite Faktörü
$n(x)$	Elektron yoğunluğu
Na	Sodyum
Na	Alıcı yoğunlukları
N_c	İletkenlik bandındaki taşıyıcı yoğunluğu
N_D	Verici yoğunluğu
n-GaAs	n tipi katkılanmış Galyum-arsenik
Ni	Nikel
nm	Nano metre
p-GaAs	p tipi katkılanmış Galyum-arsenik
p-Si	p tipi katkılanmış Silisyum
Pt	Platin
q	Elektrik yükü
Θ	Tünelleme olasılığı
θ	Kırınım açısı
Q_{it}	Arabirimde yakalanan yük miktarı
Q_m	Metalde yük yoğunluğu
Q_{ot}	Oksitte tutulan yük miktarı
Q_s	Yarıiletkendeki pozitif yük yoğunluğu
R	Yansıtma değeri
R_a	Yüzey mutlak yükseklik değişiminin aritmetik ortalama değeri
R_{max}	Maksimum yükseklik
$R_{ms}(R_q)$	Yüzey yükseklik değişiminin kök ortalama değeri
R_s	Kontağın seri direnci
SO_2	Sülfür dioksit

SO_3	Sülfür trioksit
T	Kelvin cinsinden sıcaklık
T	Geçirgenlik
U_0	Daldırarak kaplamada geri çekme hızı
V_0	Oksit tabakadaki potansiyeli
$V_{2n}\text{O}_{5n-2}$	Vanadyum oksitin Wadsley fazları
$V_2\text{O}_3$	Vanadyum trioksit
$V_2\text{O}_5$	Vanadyum pentoksit
V_d	Difüzyon Potansiyeli
V_{FB}	Düz bant voltajı
V_i	Minimum potansiyel engeli aşma hızı
$V_n\text{O}_{2n-1}$	Vanadyum oksitin Magneli fazları
VO	Vanadyum monoksit
V_o	Kesme Gerilimi
VO_2	Vanadyum dioksit
V_x	Yarıletkendeki elektronların hızı
W	Tungsten
W_d	Tüketme Bölgesinin Genişliğini
W_m	Yüzey boşalım bölgesinin maksimum genişliği
ψ_σ	Yüzey potansiyeli
α	Soğurma katsayısı
ΔH	Entalpi değişimi
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik geçirgenliği.
η	Sıvı viskozitesi
μ	Elektronun mobilitesi
$\rho(x)$	Oksit içindeki hacim yükü yoğunluğu

Kısaltmalar

AC	Alternatif akım
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskopisi
CAS	Chemical Abstracts Service
CCD	Yük-çifti cihaz
CRT	Cathode Ray Tube - Katot ışını tüpü
CVD	Kimyasal buhar biriktirme
DC	Doğru akım
EDX	Enerji ayırmalı x-ışını spektroskopisi
eV	Elektron-Volt
FE	Alan emisyonu
LB	Langmuir-Blodget
MIT	Metal yalıtkan faz geçişi
MOS	Metal Oksit Yarıiletken
MOSFET	Metal oksit yarı iletken alan etkili transistör
MS	Metal-Yarıiletken
MY	Metal-yarıiletken
NIR	Kızıl ötesi kenarı
PLD	Atımlı Lazer Kaplama
PSPD	Position sensitive photo diode
RCA	Radio Corporation of America
RF	Radyo Frekans
ROS	Yüksek yüzey direnci
rpm	Dakikadaki devir sayısı
SCS	Semiconductor Characterization System
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
Sol-Gel / Sol-Jel	Solüsyon – jelleşme işlemi
TE	Termiyonik emisyon
TFE	Termiyonik alan emisyonu
UV	Mor ötesi ışık
VIS	Görünür ışık
XRD	X Işını Kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Yarıiletkenlerin Bant Yapısı	4
Şekil 2.2 Fermi-Dirac Dağılımı.	5
Şekil 2.3 Metal yarıiletken kontağın temel yapısı.....	6
Şekil 2.4 Metal ve yarı iletkenlerin enerji bant diyagramı.....	6
Şekil 2.5 Metal-yarıiletken temasının enerji bandı diyagramı.....	8
Şekil 2.6 Metal yarı iletken bağlantısının enerji bandı diyagramı	9
Şekil 2.7 Schottky diyotlardaki akım taşıma mekanizmaları.....	10
Şekil 2.8 MOS kapasitörün görünümü.....	16
Şekil 2.9 İdeal MOS kapasitörün $V=0$ 'dak enerji bant diyagramı.....	17
Şekil 2.10 İdeal MOS Kapasitörün enerji bant diyagramı ve yük dağılımı.....	19
Şekil 2.11 p tipi yarıiletkenin yüzeydeki enerji bandı diyagramı	21
Şekil 2.12 Si ve GaAs'e ait maksimum boşalım katmanı genişliğinin değişimi.	22
Şekil 2.13 a) İdeal MOS kapasitörün bant diyagramı.	24
Şekil 2.14 Yüksek frekans MOS C-V eğrisi	25
Şekil 2.15 MOS kapasitörünün termal denge içindeki enerji bandı diyagramı. .	28
Şekil 2.16 Termal olarak oksitlenmiş silikon ile bağlantılı yükler için şema.	29
Şekil 2.17 Alıcı/Verici durumlarından oluşan herhangi bir ara-tuzak sistemi....	30
Şekil 2.18 Oksit içerisinde tabaka yükünün etkisi	32
Şekil 2.19 İdeal bir MOS kapasitörünün C-V özellikleri.....	33
Şekil 2.20 İdeal MOS kapasitörünün C- V_a eğrileri	35
Şekil 2.21 Vanadyum oksit çözeltilerin farklı renklerde görünümü.	39
Şekil 2.22 Vanadyum oksitin farklı fazlarına ait kristal yapıları	39
Şekil 2.23 Sol-jel sürecinin şematik gösterimi.....	42
Şekil 2.24 Sol-gel yönteminde atom grupları oluşumu.....	42
Şekil 2.25 Sol-gel yönteminde büyük moleküllerin oluşumu.....	43
Şekil 2.26 Sol-jel yöntemiyle elde edilen camlar.	43
Şekil 2.27 Daldırma yönteminin aşamaları.	44
Şekil 2.28 Buharlaştırma yöntemi modeli.....	47
Şekil 2.29 Kaynak materyal ile hedef materyalin düzeni.	49
Şekil 2.30 AFM'in Şematik çizimi ve gerçek AFM fotoğrafı.....	59
Şekil 2.31 Mesafeye bağlı olarak uç ve numune arasındaki kuvvetler.	59
Şekil 2.32 Kuvvet-mesafe eğrisinin şematik gösterimi.	60

Şekil 2.33 Elektron-madde etkileşiminin farklı ürünleri.	61
Şekil 3.1 Daldırma Ünitesi.....	65
Şekil 3.2 Isıtma işlemi için kullanılan fırın.....	66
Şekil 3.3 İki nokta yöntemi ile akım-gerilim ölçmek üzere hazırlanan örnek...	67
Şekil 3.4 Nanovak NVTH-350 buharlaştırma sistemi.	68
Şekil 3.5 VO _x MOS yapısı.....	69
Şekil 4.1 VOC1 nolu numuneye ait XRD sonuçları.	71
Şekil 4.2 VOC2 nolu numuneye ait XRD sonuçları.	72
Şekil 4.3 VOC3 nolu numuneye ait XRD sonuçları	73
Şekil 4.4 VOC4 nolu numuneye ait XRD sonuçları.	74
Şekil 4.5 VOC5 nolu numuneye ait XRD sonuçları.	75
Şekil 4.6 VOS1 nolu numuneye ait XRD sonuçları.....	76
Şekil 4.7 p-Si üzerine V ₈ O ₁₅ film 135x92 µm SEM görüntüsü.	78
Şekil 4.8 p-Si üzerine V ₈ O ₁₅ film 55x37 µm SEM görüntüsü.	79
Şekil 4.9 p-Si üzerine V ₈ O ₁₅ film 9x6 µm SEM görüntüsü.	79
Şekil 4.10 p-Si üzerine V ₈ O ₁₅ film 1,85x1,27 µm SEM görüntüsü.	80
Şekil 4.11 p-Si üzerine V ₈ O ₁₅ filmin 10 µm kesitinin AFM görüntüleri.	80
Şekil 4.12 p-Si üzerine V ₈ O ₁₅ filmin 5 µm kesitinin AFM görüntüleri.	81
Şekil 4.13 p-Si üzerine V ₈ O ₁₅ filmin 1.843 µm kesitinin AFM görüntüleri.....	81
Şekil 4.14 VO _x filmlerin geçirgenlik-dalga boyu grafiği	83
Şekil 4.15 VO _x filmlerin yansımada-dalga boyu grafiği.....	84
Şekil 4.16 VO _x filmlerin soğurma-dalga boyu grafiği	84
Şekil 4.17 VO _x filmlerin kırılma indisi-dalga boyu grafiği.....	85
Şekil 4.18 VO _x filmlerin sanal kırılma indisi-dalga boyu grafiği	85
Şekil 4.19 VO _x filmlerin Dielektrik sabiti-dalga boyu grafiği	86
Şekil 4.20 VO _x filmlerin sanal dielektrik sabiti-dalga boyu grafiği.....	86
Şekil 4.21 VOC2 filminin $h\nu - (\alpha h\nu)^2$ grafiği ve bant genişliği (E_g) değeri	87
Şekil 4.22 VOC4 filminin $h\nu - (\alpha h\nu)^2$ grafiği ve bant genişliği (E_g) değeri	88
Şekil 4.23 VOC5 filminin $h\nu - (\alpha h\nu)^2$ grafiği ve bant genişliği (E_g) değeri	88
Şekil 4.24 VOS1 nolu filme ait EDX histogramı.....	89
Şekil 4.25 VOC5 nolu film için $\ln\sigma - 1/T$ grafiği ve eğimi.	90
Şekil 4.26 MV1 yapısına ait farklı frekanslarda kapasitans-gerilim grafiği	91
Şekil 4.27 MV1 yapısına ait farklı frekanslarda iletkenlik-gerilim grafiği.....	91

Şekil 4.28 Farklı frekanslarda MV1 yapısının $R_s - V$ eğrileri	92
Şekil 4.29 MV1 yapısına ait $C^{-2} - V$ eğrilerinin lineer bölgeleri	93
Şekil 4.30 MV1 yapısına ait akım – gerilim eğrisi	95
Şekil 4.31 MV1 yapısına ait $\ln(I)-V$ grafiği	96
Şekil 4.32 MV1 yapısına ait $H(I) - I$ grafiği	98

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Bazı metaller ile yarıiletken yüzeyler arasındaki bariyer yüksekleri.	8
Çizelge 2.2 Sol-jel yönteminin kullanıldığı bazı uygulamalar.	46
Çizelge 2.3 Sol-jel yönteminin üstünlük ve sınırlılıkları.	46
Çizelge 2.4 Buharlaştırma yönteminde filament çeşitleri	51
Çizelge 2.5 Standart bir difraktometrede bulunan parçalar.	55
Çizelge 2.6 SEM ile materyalden elde edilen salınımlar ve sağladıkları bilgi ...	58
Çizelge 3.1: Kullanılan çözeltilerin özellikleri ve son tavlama sıcaklıkları.	65
Çizelge 4.1: Elde edilen filmlere ait XRD yapıları	77
Çizelge 4.2: Elde edilen filmlerin tanecik boyutları.	78
Çizelge 4.3 VOS1 nolu filme ait yüzey morfolojisi sonuçları.....	82
Çizelge 4.4 VOS1 nolu filme ait EDX sonuçları	89
Çizelge 4.5 Al/VO _x /p-Si (MOS) Yapısının Oda Sıcaklığında Ölçülmüş I – V ve C – V ölçümlerinden elde edilmiş temel belirkenlikleri.	99

1. GİRİŞ

Günümüzde ince filmler yiyecek endüstrisinden, uzay teknolojisine kadar çok geniş bir alanda kullanıma sahiptirler. İnce film teknolojisi sayesinde küçük hacimlerde karmaşık yapılar oluşturulabilmekte ve yüksek hızda çalışabilen düşük güç tüketimine sahip cihazlar üretilmektedir (Chopra, 1969)

Metal-yarıiletken veya metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapılar günümüzde birçok elektronik aygıt teknolojisinde kullanılmaktadırlar (Cavalleri ve ark., 2004; Barker ve ark., 1966; Chae ve ark., 2005).

Vanadyum oksit, ince film çalışmalarında uzun yıllardır ilgi odağı olmaktadır. Günümüzde bilinen yaklaşık 20 farklı vanadyum oksit çeşidi vardır (Durmuş, 2011).

Vanadyum oksitler V_nO_{2n-1} şeklinde Magneli fazları ve $V_{2n}O_{5n-2}$ şeklinde Wadsley fazları gibi farklı oksit fazlarına sahip oksijen ile çok farklı bileşikler oluşturabilen bir yapıya sahiptirler (Zaitsev ve ark., 1986) . Bu çeşitlilik vanadyum oksitleri MOS yapılar oluşturmada cazip bir bileşik yapar.

1959 yılında F.J. Morin tarafından VO_2 , V_2O_3 , VO için yarıiletken-metal faz geçişi keşfedildiğinden beridir hem faz geçişlerine hem de vanadyum oksitlere ilgi artmıştır (Morin, 1959).

Vanadyum Oksitin VO_2 , V_3O_7 , V_4O_9 , V_6O_{13} , V_8O_{15} gibi birçok türünde bu tür faz geçişleri gözlenmektedir.

V_8O_{15} 69 K faz geçişi yaparken VO_2 340 K ile oda sıcaklığına en yakın faz geçişi sıcaklığına sahiptir (Ladd ve Paul, 1969; Helmenstine, 2018; Ramanathan ve Zhou, 2013; Nagasawa ve ark., 1970) .

Vanadyum oksitlerin bu faz geçişleri ile optik özelliklerde ve elektriksel iletkenlikte ani değişimler meydana gelir (Morin, 1959; Barker ve ark., 1966; Ladd ve Paul, 1969).

Faz geçişleri sıcaklık, elektrik alan ve foton soğrulması gibi birçok farklı şekilde geekleşebilir (Ramanathan ve Ko, 2008; Chae ve ark., 2005; Cavalleri ve ark., 2004). Vanadyum oksit tabanlı MOS cihazlar faz geçişinin fiziksel özelliklere yaptığı ani etkiden dolayı çok fonksiyonlu cihazlar için büyük bir potansiyele sahiptirler.

Vanadyum oksit ile yapılan uygulamalar arasında balometre (Almeida ve ark., 2004; Jerominek ve ark., 1993) , elektro optik modölatör (Xu ve ark., 2002), kızıl ötesi detektörler, hafıza elemanları (Lee ve ark., 2007), MOS kapasitörler (Scherber ve Schlag, 2000; Bugaev ve ark., 2001; Ramanathan ve Changhyun, 2009) , akıllı pencereler (Manning ve Parkin, 2004) , fiber optik anahtarlar (Lee ve ark., 1989; Soltani ve ark., 2004), ultra hızlı anahtarlama aygıtları, elektriksel anahtarlama aygıtları (Kim ve ark., 2007; Chen ve ark., 2008), holografik depolama sistemleri (Bugayev ve Gupta, 2003), uzay araçları için akıllı radyatör cihazları, fotonik kristaller (Xiao ve ark., 2005), yüksek kapasiteli Li-iyon pilleri için katot kaplamaları ve termal algılayıcılar sayılabilir (Kumar ve ark., 2003; Wu ve ark., 2008; Meng ve ark., 2006; Lim ve ark., 2007).

Ayrıca son zamanlarda Lee ve arkadaşları metalik vanadyum oksidin düşük termal iletkenlik ile yüksek elektriksel iletkenliği bir arada gösterdiği yepyeni bir uygulamaya imza atmışlardır (Sangwook ve ark., 2017).

Vanadyum oksit bulk, ince film ve nano parçacık formlarından farklı metotlarla üretilbilmektedir. Bu metotlar arasında RF sıçratma (Miyazaki ve ark. , 1996; Felde ve ark., 1997; Takahashi ve ark., 1996), magnetron sıçratma (Wang ve ark., 2005), kimyasal buhar biriktirme (CVD) (Greenberg, 1983), sol-gel (Lu ve ark., 1997; Guzman ve ark., 1996), vakumda termal buharlaştırma (Lee ve ark., 1996), iyon implantasyonu (Gea ve ark., 1997; Jin ve ark., 1998), atımlı lazer kaplama (PLD) ve püskürtme (spray pyrolysis) sayılabilir (Bouzidi ve ark., 2002).

Bu çalışmada V_3O_7 ve V_8O_{15} ince filmler sol-jel daldırma yöntemiyle cam ve p-Si yüzeyler üzerine kaplanmış; AFM ile yüzey yapısı araştırılmış, XRD, ile filmlerin polikristal yönelmeleri ve kristal yapıları incelenmiştir. Elde edilen filmlerden Al/VO_x/p-Si /Al MOS yapılar oluşturularak akım-gerilim (I-V), kapasite-gerilim-frekans (C-V-f) yöntemleriyle elektriksel ve fiziksel özellikler incelenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Yarı İletkenler

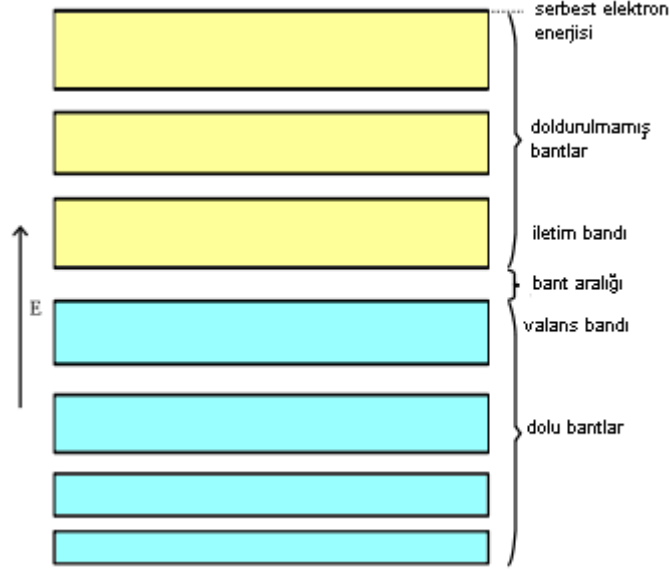
Yarı iletken elektriksel iletkenliği geçici veya kalıcı olarak geniş bir aralıkta kontrol edilebilen bir katıdır. Yarı iletkenler ekonomik ve teknolojik olarak oldukça büyük öneme sahiptirler. Bilgisayarlar, cep telefonları, dijital ses çalarlar gibi elektriksel cihazların en önemli gereçlerinin birçoğu yarı iletken cihazlardan elde edilir.

Yarı iletkenler yalıtkanlara çok benzer. Yalıtkanlar ile iletkenleri ayıran en önemli özellik elektronları serbest hareket edebilmesi için aşmaları gereken bant aralığıdır. Yarı iletkenlerde yalıtkanlarda olduğu gibi oda sıcaklığında çok az elektron iletkenlik için gerekli olan serbest bant aralığını geçecek termal enerjiye sahiptir. Bu nedenle katkısız yarı iletkenler ve yalıtkanlar dışardan uygulanan bir elektriksel alan olmadıkça benzer elektriksel özellikler gösterirler. Daha küçük bant genişliğine sahip yarıiletkenlerin elektriksel özelliklerini sıcaklık ile kontrol etmek daha kolaydır.

Yarıiletkenlerin asıl elektriksel özellikleri genellikle safsızlıklar ile elde edilir. Bu işleme katkılama denir. Genellikle her bir safsızlık atomunun katıya serbest hareket eden bir elektron veya bir boşluk eklediğini varsaymak geçerli bir yaklaşımdır. Yeterli katkılama ile yarıiletkenler neredeyse metaller kadar iletken olabilir. Safsızlığın türüne bağlı olarak yarıiletkenin katkılanmış bölgesi daha fazla elektron veya hol içerebilir. Elektronların ilettime daha çok katkı sağladığı yarı iletkenlere n-tipi, hollerin ilettime daha çok katkı sağladığı yarı iletkenlere ise p-tipi yarı iletken denir (Simon, 1981) .

2.2 Bant Teorisi

Bir atom kesikli enerji düzeylerine sahiptir. İki atom bir araya geldiğinde her bir enerji düzeyi daha yüksek ve daha düşük enerji seviyelerine ayrılarak moleküler orbitalleri oluştururlar. Atom sayısı bir kristaldeki gibi çok yükseldiğinde enerji düzeyleri artar ve bant yapısı ortaya çıkar. Yarıiletkenler birçok bant içerir. Eğer en yüksek işgal edilmiş durum ile en düşük işgal edilmemiş durum arasında büyük bir enerji farkı varsa bir bant genişliği ortaya çıkar.



Şekil 2.1 Yarıiletkenlerin Bant Yapısı

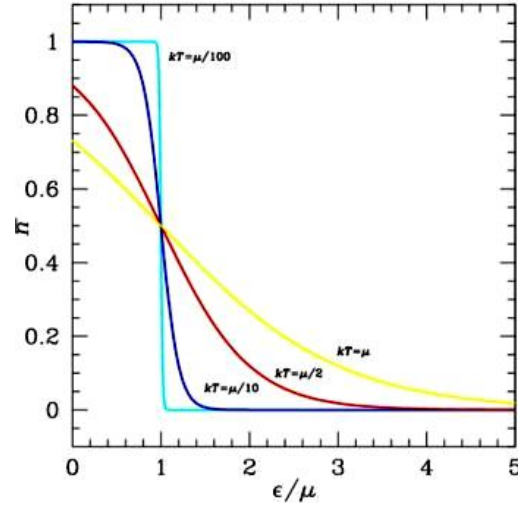
Diğer katılarda olduğu gibi yarıiletkenlerde de elektronlar sadece belirli bantlardaki enerjilere sahip olabilirler. Enerji bantlarının her biri farklı kuantum durumları ile ilgilidir ve düşük enerjili (çekirdeğe yakın olan) durumların çoğu doludur. Bu durumlara valans bandı denir. Yarıiletkenler ve yalıtkanlarda metallerden farklı olarak genel durumda valans bandı neredeyse tamamen doludur. Yarıiletkenlerdeki elektronlar valans bandından iletim bandına bant genişliğine bağlı olarak uyarılabilir. Yalıtkanlar ile yarıiletkenler arasındaki fark bant aralığının genişliğinden kaynaklanır. Bir yarıiletkenin sıcaklığı mutlak sıfırın üstüne çıkartıldığında elektronların bir kısmı valans bandından iletim bandına geçecek enerjiye ulaşırlar.

İletim bandına geçen elektronlar valans bandında işgal edilmemiş elektron boşlukları (holler) bırakırlar. Hem iletim bandındaki elektronlar hem de valans bandındaki holler elektriksel iletkenliğe katkıda bulunurlar. Holler tek başlarına hareket etmezler ancak komşu elektronlar bu holleri doldurarak geride yeni bir hol oluştururlar. Bu şekilde holler pozitif yüklü parçacıklar gibi davranırlar.

Katıdaki komşu iki atom arasındaki kovalent bağ tek bir elektron ile atom arasındaki bağdan on kat daha güçlüdür. Bu nedenle serbest elektronlar kristal yapısını

bozmaz. Elektronların enerji dağılımı hangi enerji durumlarının boş hangilerinin dolu olduğunu tanımlar. Bu dağılım Fermi-Dirac istatistiği ile tanımlanır. Dağılım elektronların sıcaklık ve Fermi enerjisi veya Fermi düzeyi ile karakterize edilir. Mutlak sıfırın altındaki şartlarda Fermi enerjisi elektronların işgal ettiği en üst enerji düzeyi olarak tanımlanabilir. Daha yüksek sıcaklıklarda Fermi enerjisi bir durumun işgal edilme olasılığının 0,5'e düştüğü enerji olarak tanımlanabilir.

Elektron enerji dağılımının sıcaklığa bağlılığı yarı iletkenlerin iletkenliklerinin neden sıcaklığa sıkı bir şekilde bağlı olduğunu açıklar.

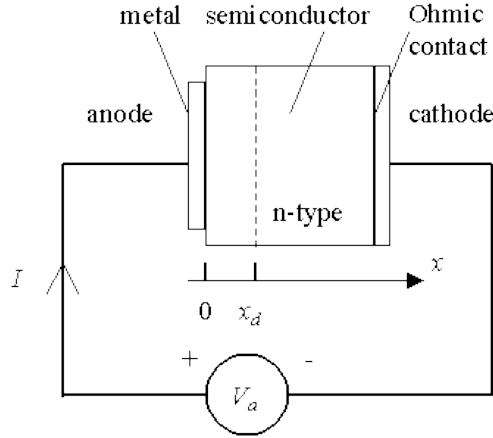


Şekil 2.2 Fermi-Dirac Dağılımı.

2.3 Metal-Yarıiletken Kontaklar

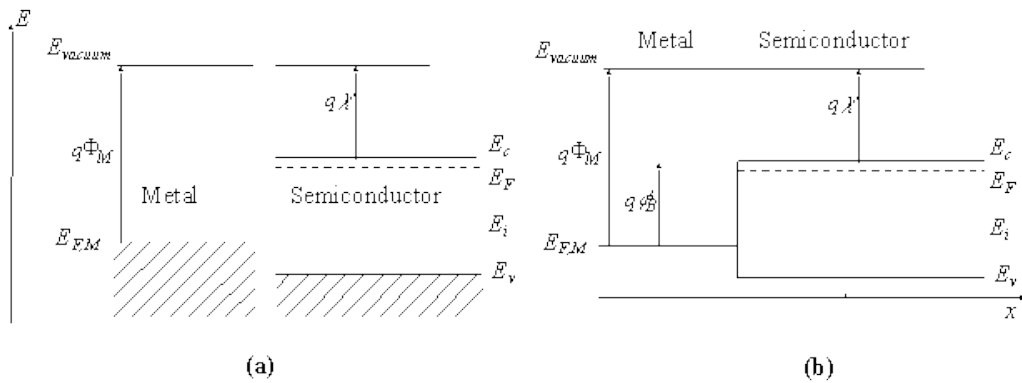
Metal-yarı iletken (MS) kontakları, birçok yarı iletken cihazda bulunduğu için büyük önem taşır. Bir Schottky bariyeri gibi davranabildikleri gibi ara yüz durumlarının karakterine bağlı omik kontak gibi de davranabilirler.

Metal yarı iletken birleşim yerinin yapısı Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Bir yarı iletken ile temas eden bir metalden oluşur. İdeal bir omik kontak yarıiletken ile metal arasında potansiyel bulunmayan kontak türüdür. Metal yarıiletken kontakının temel yapısı Şekil 2.3'de gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Metal yarıiletken kontağın temel yapısı

Metal ve yarı iletken arasındaki bariyer bir enerji bandı şemasında tanımlanabilir. Bu tür bir şema oluşturmak için önce metal ve yarı iletkenin enerji bandı şemasını göz önünde bulundurur ve bunları Şekil 2.4 (a) 'da gösterildiği gibi aynı vakum seviyesini kullanarak hizalanır. Metal ve yarı iletken bir araya getirildiğinde, metalin ve yarı iletkenin Fermi enerjileri hemen değişmez. Bu, Şekil 2.4 (b) 'nin düz bant diyagramını verir.



Şekil 2.4 Metal ve yarı iletkenlerin (a) ve (b) temasından önce enerji bant diyagramı.

Bariyer yüksekliği, ϕ_B , metalin Fermi enerjisi ile çoğunluk taşıyıcılar bulunan bant kenarı arasındaki potansiyel farkı olarak tanımlanır. Şekil 2.4 (b) 'den bir n tipi yarı iletken için bariyer yüksekliği aşağıdaki gibi bulunur:

$$\Phi_B = \Phi_M - \chi \quad , n \text{ tipi yarıiletken için} \quad (2.1)$$

Burada ϕ_M metal iş fonksiyonunu, χ elektron eğilimini göstermektedir. Bazı metallerin vakumda ölçülen iş fonksiyonları Çizelge 2.1'deki gibidir. p tipi bir malzeme için bariyer yüksekliği valans bant kenarı ile metalin fermi enerjisi arasındaki farktan elde edilir.

$$\Phi_B = \frac{E_g}{q} + \chi - \Phi_M \quad ,p \text{ tipi yarıiletken için} \quad (2.2)$$

Eğer düz bant diyagramında metalin Fermi enerjisi iletim bandı ile valans bandı kenarları arasında bir yerde ise metal-yarıiletken eklemi elektronlar ve holler için bir bariyer oluşturur.

Ayrıca ϕ_I yerleşik potansiyeli metalin Fermi enerji seviyesi ile yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi arasındaki fark olarak tanımlanır.

$$\phi_I = \Phi_M - \chi - E_c - \frac{E_{F,n}}{q}, \quad n\text{-tipi} \quad (2.3)$$

$$\phi_I = \chi + \frac{E_c - E_{F,p}}{q} - \Phi_M \quad ,p\text{-tipi} \quad (2.4)$$

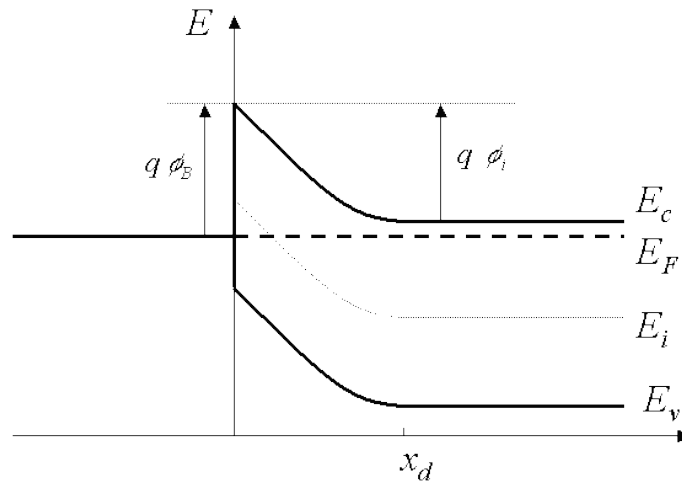
Bazı metal yarı iletken eklemlerinin ölçülen bariyer yüksekliği Çizelge 2.1'de listelenmiştir. Bu deneysel bariyer yükseklikleri genellikle Denklem 2.1 veya Denklem 2.2 kullanılarak hesaplananlardan farklıdır. Bu metal yarı iletken ara yüzünün ayrıntılı davranışından kaynaklanmaktadır. İdeal metal-yarı iletken teorisi, her iki malzemenin de sonsuz derecede saf olduğunu, iki malzeme arasında etkileşim olmadığını ve istenmeyen bir ara yüzey katmanını olmadığını varsaymaktadır. Metal ve yarı iletken arasındaki kimyasal reaksiyonlar, yarı iletken yüzeyinde ve ara yüzey katmanlarının yüzeyinde ara yüzeyleri olduğu gibi bariyer yüksekliğini de değiştirir. Bununla birlikte, bazı genel eğilimler hala gözlemlenebilir. Denklem 2.1'den anlaşılacağı gibi, n tipi yarı iletkenler, silikon için doğrulanabilecek daha yüksek iş işlevine sahip metaller için artar. Galyum arsenitinin, yüksek yüzey yoğunluğuna sahip olduğu, böylece bariyer yüksekliğinin neredeyse metalden bağımsız olacağı bilinmektedir. Ayrıca, literatürde

bildirilen bariyer yüksekliklerinin, farklı yüzey temizleme prosedürleri nedeniyle geniş ölçüde değiştiği tespit edilmiştir.

Çizelge 2.1 Bazı metallerin eV birimlerinde cinsinden germanyum, silisyum ve galyum arsenit yüzeyler arasında ölçülen bariyer yüksekleri.

	Ag	Al	Au	Cr	Ni	Pt	W
$\phi_M(\text{vakumda})$	4,3	4,25	4,8	4,5	4,5	5,3	4,6
n-Ge	0,54	0,48	0,59		0,49		0,48
p-Ge	0,5		0,3				
n-Si	0,78	0,72	0,8	0,61	0,61	0,9	0,67
p-Si	0,54	0,58	0,34	0,5	0,51		0,45
n-GaAs	0,88	0,8	0,9			0,84	0,8
p-GaAs	0,63		0,42				

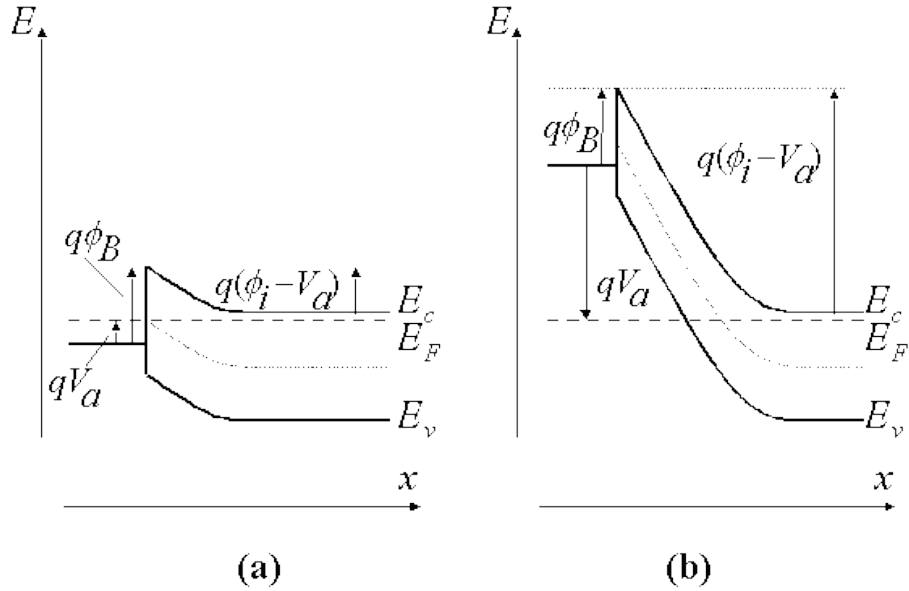
Şekil 2.4 (b) 'de gösterilen düz bant diyagramı, termal denge durumuna ait değildir, çünkü metaldeki Fermi enerjisi yarı iletkeninden farklıdır. n tipi yarı iletkendeki elektronlar, kavşaktan geçerken enerjileri azalabilir. Elektronlar yarı iletkeninden ayrıldıklarında, iyonlaştırılmış donör atomlarından dolayı pozitif bir yük geride kalır. Bu yük negatif bir alan oluşturur ve yarı iletkenin bant kenarlarını düşürür. Elektronlar, yarı iletkeninden metale elektronların difüzyonu ve iyonize safsızlık atomlarının oluşturduğu alanın neden olduğu elektronların sürüklenmesi arasında denge sağlanana kadar metale akar. Bu denge, yapı boyunca sabit bir Fermi enerjisi ile karakterize edilir.



Şekil 2.5 Metal-yarıiletken temasının termal denge içindeki enerji bantı diyagramı.

Termal dengede, yani herhangi bir harici voltaj uygulanmadan, yarı iletken kavşağa yakın mobil taşıyıcılardan boşalan bir bölge bulunduğuna dikkat etmek önemlidir. Buna tükenme bölgesi denir. Bu bölge ile yarı iletken arasındaki potansiyel, yerleşik potansiyele ϕ_i eşittir.

Bir metal-yarı iletken eklemine ileri ve geri besleme altında çalışması Şekil 2.6 ile gösterilmektedir. Metale pozitif bir besleme uygulandığı için (Şekil 2.6 (a)), metalin Fermi enerjisi yarı iletkendeki Fermi enerjisine göre azalır. Bu, yarı iletken boyunca daha küçük bir potansiyel düşüşüyle sonuçlanır. Difüzyon ve sürüklenme arasındaki denge bozulur ve yarı iletken içine sürüklenenden daha fazla elektron metale doğru sürüklenir. Bu yerleşik potansiyel ile karşılaştırılabilir bir voltajda eklemeye doğru pozitif bir akıma neden olur.



Şekil 2.6 (a) ileri ve (b) ters besleme altında bir metal yarı iletken bağlantısının enerji bandı diyagramı

Negatif voltaj uygulandığında (Şekil 2.6 (b)), metalin Fermi enerjisi yarı iletkenindeki Fermi enerjisine göre yükselir. Yarı iletken üzerindeki potansiyel artık artmakta, böylece ara yüzde daha büyük bir tükenme bölgesi ve daha büyük bir elektrik alanı ortaya çıkmaktadır. Elektronları metale sınırlayan bariyer, uygulanan voltajdan bağımsız olduğundan elektron akışını sınırlar. Pozitif bariyer yüksekliğine sahip metal-yarı iletken eklemi bu nedenle belirgin bir doğrultma davranışına sahiptir. İleri besleme altında büyük bir akım varken, ters besleme altında neredeyse hiç akım yoktur.

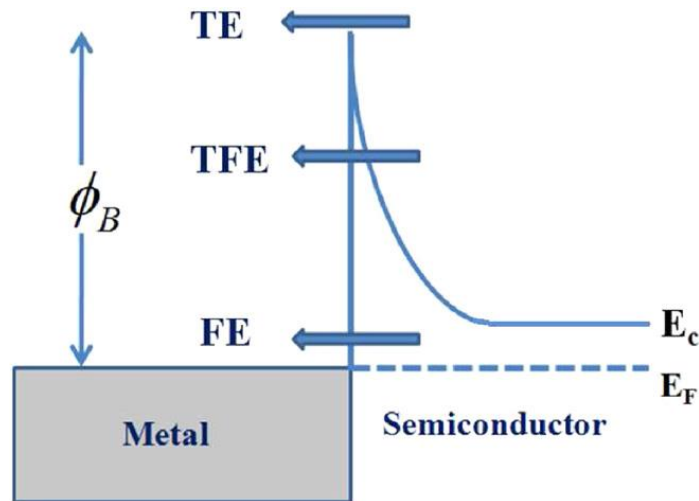
Yarı iletken boyunca potansiyel bu nedenle yerleşik potansiyeli, ϕ_I , ile uygulanan voltaj, V 'nin farkına eşittir (Zeghbroeck, 2011).

$$\phi(x = \infty) - \phi(x = 0) = \phi_I - V_a \quad (2.5)$$

2.4 Metal-Yarıiletken Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları

Metal ile yarıiletkenin temas ettiği kontak bölgelerinde (MYK) akımı çoğunluk taşıyıcıları belirler. Bilindiği gibi p tipi yarıiletkenlerde holler, n tip yarı iletkenlerde elektronlar akımı taşır. MYK arasına elektriksel potansiyel farkı uygulandığında oluşan akım birçok etmenden etkilenir. Bu etmenlerin başlıcaları potansiyel farkın kutuplarının uygulandığı nokta, ara yüzey durumları, seri direnç, yarıiletken ile metal arasındaki oksit tabakası, sıcaklık, yarıiletkenin p tipi veya n tipi oluşudur.

Metal yarıiletken kontaklarda akım iletim mekanizmaları farklı başlıklar altında incelenebilir. Bunlar Termiyonik emisyon, Difüzyon teorisi, Termiyonik emisyon-difüzyon teorisi, Engel boyunca tünelleme, T_0 etkili akım iletimi, Tüketim bölgesinde yük oluşumu ve yeniden birleşimi, Azınlık taşıyıcı enjeksiyonu olarak sıralanabilir.



Şekil 2.7 Metal / yarı iletken Schottky diyotlardaki akım taşıma mekanizmaları.

Şekil 2.7, metal / yarı iletken Schottky diyotlardaki akım taşıma mekanizmasını göstermektedir. Termiyonik emisyon (TE) teorisine göre, taşıyıcı, komşu enerji bariyerini, Fermi seviyesinin üstünde maksimum bariyer yüksekliğiyle aşar. Taşıyıcıların

en üst enerjiden daha düşük enerjilerde tünellenmesi, yüksek katkılı yarı iletkenlerde gerçekleşir. Bu mekanizmaya termiyonik alan emisyonu (TFE) denir ve yüksek doping konsantrasyonlu ($\sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) yarı iletkenler için önemli ölçüde baskındır. Alan emisyonu (FE) teorisinde Metal / yarı iletken ara yüzünde, kusur yoğunluğuna belirleyici ana etmendir (Roul ve ark., 2015).

2.4.1 Termiyonik emisyon

Sıcak bir yüzeyden hol veya elektron salınması Termiyonik emisyonu ifade eder. Schottky diyotlarda elektron/hol gibi taşıyıcıların metal yarıiletken arasında geçişlerini termal enerjini kullanarak yapmaları termiyonik emisyonu ifade eder. Metal/n-yarıiletken kontaklarda termiyonik emisyon elektronlar ile, metal/p-yarıiletken kontaklarda holler ile gerçekleşir. Termiyonik emisyon teorisinin varsayımları "Engel yüksekliği Φ_B , kT/q enerjisinden çok daha yüksektir", "Schottky bölgesinde taşıyıcı çarpışmaları gerçekleşmemektedir", "Engelde görüntü yükün etkisi yoktur" şeklinde sıralanabilir.

Yarıiletkenden metale doğru akım yoğunluğu;

$$J_{sm} = \int qV_x dn \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilir. Bu akım yoğunluğu potansiyel engeli aşacak yeterlilikte enerjiye sahip elektronların konsantrasyonu ve hızı şeklinde tanımlanabilir.

Denklemdaki V_x yarıiletkendeki elektronların hızını, q ise elektronların yükünü ifade etmektedir. MY kontak noktalarına gerilim uygulanmadığında termal dengede net akım sıfırdır. Çok küçük bir enerji aralığındaki enerji yoğunluğu dn aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$dn = N_D \left(\frac{m}{2kT} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(m * \frac{V_x^2}{2kT} \right) dV_x \quad (2.7)$$

Burada N_D verici (donör) yoğunluğu, m^* taşıyıcı parçacığın (elektron) etkin kütlesi, k Boltzmann sabitini ve T kelvin cinsinden sıcaklığı ifade etmektedir. Denklem 2.6 ile Denklem 2.7'den akım yoğunluğu;

$$J_{sm} = qN_D \left(\frac{kT}{2m^*} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{m^* V_x^2}{2kT} \right) \quad (2.8)$$

şeklinde bulunur. Potansiyel engeli aşan tüm elektronlar bunu kinetik enerjileri ile gerçekleştiriyorsa bu aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{1}{2} m^* V_x^2 \geq qV_i \quad (2.9)$$

Burada V_i elektronun potansiyel engelini aşabilmesi için sahip olması gereken minimum hızı ifade eder. V_i hızı aşağıdaki denklem ile bulunur.

$$V_{ox} = \left(\frac{2qV_i}{m^*} \right)^{1/2} \quad (2.10)$$

Bu denklem, denklem 2.8'te yerine yazılırsa akım yoğunluğu aşağıdaki gibi bulunur.

$$J_{sm} = qN_D \left(\frac{kT}{2m^*} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{qV_i}{kT} \right) \quad (2.11)$$

İletkenlik bandı taban enerjisi sıfır olarak alındığında, yarıiletkenin verici taşıyıcı yoğunluğu;

$$N_D = N_C \exp \left(-\frac{E_F}{kT} \right) = 2 \left(\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp \left(-E_F/kT \right) \quad (2.12)$$

şeklinde verilir ve denklem 2.11' de yerine yazıldığında, akım yoğunluğu;

$$J_{sm} = \left(\frac{4\pi m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left(-qV_i + \frac{E_F}{kT} \right) \quad (2.13)$$

olarak elde edilir. Schottky kontağın metal kısmındaki potansiyel engel yüksekliği $q\Phi_B = qV_i + E_F$ şeklindedir. Bu eşitlik, eşitlik Denklem 2.13'da yerine konulduğunda akım yoğunluğu Denklem 2.14'deki gibi bulunur.

$$J_{sm} = \left(\frac{4\pi m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \quad (2.14)$$

$A^* = (4\pi m^* k^2/h^3)$ şeklindeki Richardson sabiti Denklem 2.14'te yerine yazılırsa akım yoğunluğu Denklem 2.15 'deki gibi bulunur.

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \quad (2.15)$$

Metal/n-yarıiletken eklemine pozitif potansiyel farkı uygulanırsa engel yüksekliği azalır. Bu durumda diyot akımında, $\exp(eV/kT)$ ile orantılı bir azalma olur. Bu durumda akım yoğunluğu Denklem 2.16 olur.

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \quad (2.16)$$

Metal ile yarıiletken arasında elektronlar için engel yüksekliği farkı bulunmamaktadır. Bu nedenle yarıiletkenden geçen akım uygulanan gerilime göre değişmez. Başka bir ifadeyle gerilim sıfır olduğu denge durumundaki akım ile yarıiletkenden metale geçen akım eşittir. Bu durumda Denklem 2.16'de $V=0$ için akım yoğunluğu Denklem 2.17' deki gibi bulunur.

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \quad (2.17)$$

J_n toplam akım yoğunluğu olmak üzere J_{sm} ile J_{ms} 'nin toplamıdır ve Denklem 2.16 ve 2.17 gerekli işlemlere tabi tutularak Denklem 2.18'deki gibi bulunur.

$$J_n = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) [\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1] \quad (2.18)$$

J_0 doyma akımını ifade etmek üzere Denklem 2.18'te $n=0$ durumudur ve Denklem 2.19 şeklinde bulunur.

$$J_0 = A^* T^2 \left(-\frac{q\Phi_B}{kT} \right) \quad (2.19)$$

Denklem 2.18 ve 2.19 birlikte kullanıldığında toplam akım yoğunluğu denklem 2.20'deki gibi bulunur.

$$J_n = J_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.20)$$

2.4.2 Difüzyon teorisi

Yük yoğunluğunun fazla olduğu bölgeden az olduğu bölgeye elektrik yüklerinin geçişi difüzyon olarak adlandırılır. Difüzyon teorisi; "potansiyel engel yüksekliği kT/q enerjisinden büyüktür", "tüketim bölgesindeki elektronlar arasındaki çarpışmaların etkisi önemsiz düzeydedir.", " $x=0$ ve $x=w$ bölgelerindeki taşıyıcı konsantrasyonları akımdan bağımsızdır.", "yarıiletken safsızlık konsantrasyonu dejenere değildir." varsayımları üzerine kuruludur. Metal/n-yarıiletken kontaklar için varsayımlarımıza uygun akım yoğunluğu Denklem 2.21 ve Denklem 2.22 ile ifade edilir.

$$J_x = J_n = q \left[n(x) \mu E(x) + D_n \frac{\partial n}{\partial x} \right] \quad (2.21)$$

$$J_x = J_n = q D_n \left[\left(-\frac{qn(x)}{kT} \right) \left(\frac{\partial V(x)}{\partial x} \right) + \frac{\partial n}{\partial x} \right] \quad (2.22)$$

Burada $n(x)$ elektron yoğunluğu, μ elektronun mobilitesi, D_n elektron difüzyon sabiti ve $E(x)$ Schottky bölgesindeki elektrik alandır. Difüzyon kuramı için akım yoğunluğu ifadesi Denklem 2.23 gibi ifade edilir.

$$J_x = J_n = J_{SD} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.23)$$

$$J_{SD} = \left(\frac{q^2 N_c D_n}{kT} \right) \left[\frac{q(V_d - V) 2 N_D}{\epsilon_s} \right]^{1/2} \exp\left(-q \frac{\Phi_B}{kT}\right) \quad (2.24)$$

Burada N_c iletkenlik bandındaki etkin taşıyıcı yoğunluğu, V_d , difüzyon voltajı, N_D verici yoğunluğu, ϵ_s yarıiletkenin dielektrik geçirgenliğidir. Difüzyon kuramında doyum

akım yoğunluğu J_{SD} , uygulanan gerilimle termiyonik emisyon teoremine göre daha hızlı değişmekle birlikte sıcaklığa bağıllığı daha düşük düzeydedir.

2.4.3 Engel boyunca tünelleme

Metal yarıiletken kontaklarda elektronlar kuantum mekaniksel tünelleme ile potansiyel bariyerini aşabilirler. Tünelleme, verici taşıyıcı yoğunluğunun 10^{18} 'i aştığı çok yüksek oranda katkılanmış yarıiletkenlerde gözlenmesinin yanı sıra düşük katkılanma durumlarında da gözlemlenir. Ancak bu iki farklı katkılama durumlarında tünellemenin gözlemlendiği gerilimin kutuplanma şekli farklılık arz eder. Düşük katkılama durumunda tünelleme ters kutuplamada gözlenirken, yüksek katkılama durumunda düz kutuplama durumunda gözlenir. Çok yüksek oranda katkılanmış yarıiletkenlerde tüketim bölgesi ince bir yapıdadır. Bu nedenle düşük sıcaklıklarda Fermi enerji seviyesi civarındaki elektronlar yarıiletkendeki metale doğru tünelleme yoluyla geçerler. Yüksek sıcaklıklarda ise tünelleme olasılığı daha da yükselir.

Tünelleme akımı, taşıyıcı yükünün, hızının ve yoğunluğunun çarpımından elde edilir. Hız, ortalama olarak taşıyıcıların bariyere yaklaştığı hız olan Richardson hızına eşittir. Taşıyıcı yoğunluğu, mevcut elektronların yoğunluğu n 'e eşittir, Q tünel açma olasılığı ile çarpımıdır;

$$J_n = qV_R n \Theta \quad (2.25)$$

Burada tünelleme olasılığı Θ Denklem 2.26 ile ifade edilir.

$$\Theta = \exp\left(-\frac{4}{3} \frac{\sqrt{2qm^*}}{\hbar} \frac{\phi_B^{3/2}}{\epsilon}\right) \quad (2.26)$$

Buradaki elektrik alan $\epsilon = \phi_B / L$ olarak tanımlanır.

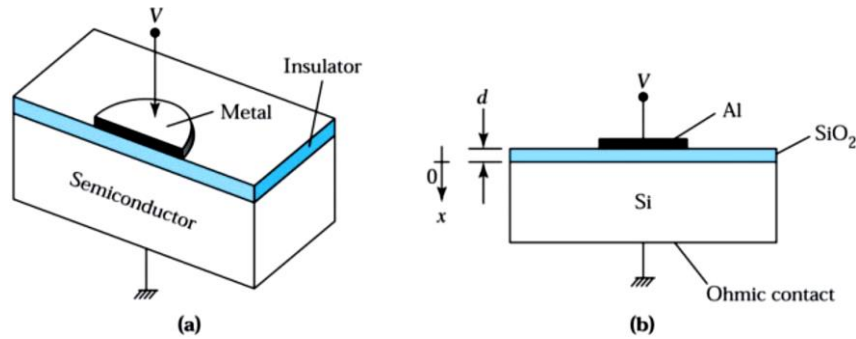
Bu nedenle tünelleme akımı üstel olarak bariyer yüksekliği ϕ_B 'nin $3/2$ 'inci kuvvetine bağlıdır.

2.5 Metal Oksit Yarıiletken (MOS) Yapılar

Metal oksit yarıiletken kapasitör (MOS) , yarıiletken cihaz fiziğinde büyük öneme sahiptir. Bu cihazlar yarıiletken yüzey çalışmalarında sıklıkla kullanılır. Entegre devrelerde bu cihaz depolama kapasitörü olarak kullanılır ve yük-çifti cihazlarda (CCD) temel bileşeni oluştururlar. Metal oksit yarı iletken alan etkili transistor (MOSFET) , bir MOS kapasitör ve iki p-n eklemine bileşiminden oluşurlar. 1960 yılında ilk kez gösterimi yapıldıktan sonra MOSFET hızlı bir şekilde gelişmiş ve mikro işlemciler ve yarı iletken hafızaların en önemli unsurlarından biri olmuştur. Bunun başlıca nedeni MOSFET'in düşük güç tüketimi ve yüksek üretim verimliliğine gibi birçok eşsiz ve benzersiz özelliğe sahip olmasıdır.

2.5.1 İdeal MOS kapasitör

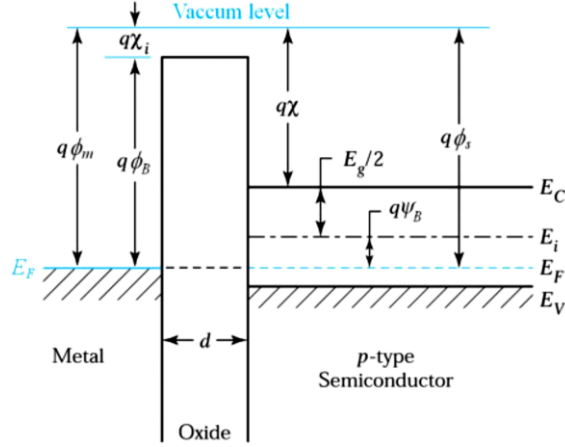
Bir MOS kapasitörün görünümü Şekil 2.8'de verilmiştir. Burada d oksit tabakasının kalınlığı, V metal katmana uygulanan gerilimi göstermektedir.



Şekil 2.8 MOS kapasitörün görünümü

İdeal p-tipi yarı iletken MOS'a ait $V=0$ 'daki enerji bant diyagramının Şekil 2.9'de gösterilmiştir (Brews, 1982).

İş fonksiyonu Fermi düzeyi ile vakum düzeyi arasındaki enerji farkıdır (metal için $q\phi_m$ ve yarıiletken için $q\phi_s$). $q\chi$, yarı iletkenin iletim bandı sınırı ile vakum düzeyi arasındaki enerji farkını gösterene elektron ilgisini (afinite) göstermektedir. $q\chi_i$, oksit elektron ilgisi, $q\phi_B$, metal ile oksit arasındaki enerji bariyeri ve $q\psi_B$, Fermi düzeyi E_F ile öz Fermi enerji düzeyi E_i arasındaki enerji farkıdır.



Şekil 2.9 İdeal MOS kapasitörün $V=0$ 'daki enerji bant diyagramı.

İdeal MOS, sıfır bias geriliminde metal iş fonksiyonu ile yarı iletken iş fonksiyonu arasındaki farkın sıfır olduğu yapı olarak tanımlanır.

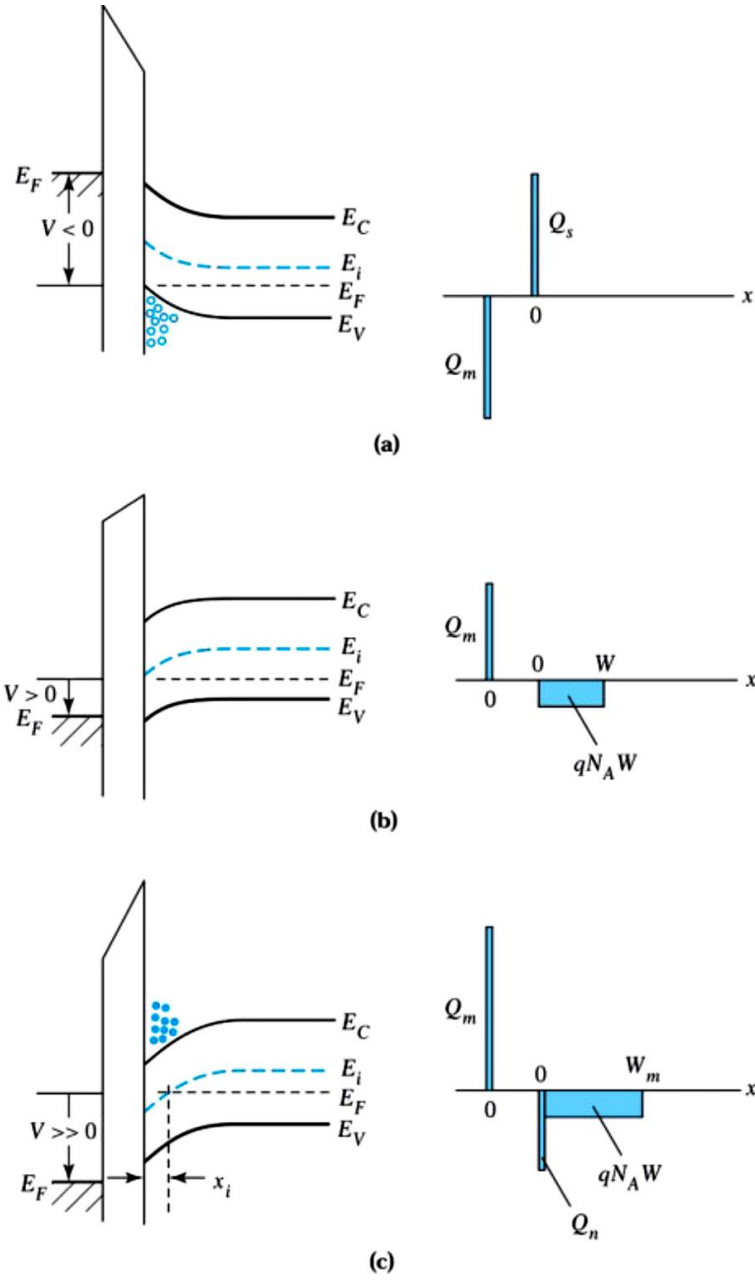
$$q\phi_{ms} = (q\phi_m - q\phi_s) = q\phi_m - \left(q\chi + \frac{E_g}{2} + q\psi_b \right) = 0 \quad (2.27)$$

Başka bir ifadeyle ideal MOS için enerji bandı sıfır voltajda düz yapıdadır. Kapasitörde herhangi bir bias durumunda var olan yükler sadece yarıiletken ve oksit yüzey yakınlarında metal yüzeydeki eşit büyüklükteki zıt yüklerdir. DC akım bias şartlarında oksit tabakadan geçen herhangi bir yük transferi yoktur. Oksit tabakanın elektriksel direnci sonsuz kabul edilir. İdeal MOS teorisi, gerçek MOS cihazların anlaşılmasını kolaylaştıran bir yapıdır.

İdeal MOS kapasitöre pozitif veya negatif bias uygulandığında, yarıiletken yüzeyinde üç farklı durum gerçekleşir. P-tipi yarı iletken, metal tabakaya negatif voltaj uygulandığında pozitif yük taşıyıcılar (holler) $\text{SiO}_2\text{-Si}$ ara yüzeyinde birikir. Bu durumda yarıiletken yüzeyi civarındaki bantlar Şekil 2.10a'daki gibi üst düzeye yönelir. İdeal MOS'larda uygulanan voltaj ne olursa olsun cihazdan akım geçmez. Bu nedenle yarıiletkendeki Fermi düzeyi sabit kalır. Bir yarıiletkendeki taşıyıcı yoğunluğu;

$$P_p = n_i e^{(E_i - E_f)/kT} \quad (2.28)$$

Şeklinde verilir. Enerji bandının üst düzeye yönelmesi E_i-E_f farkının artmasına neden olur. Bu durum oksit-yarıiletken ara kesitinde hollerin konsantrasyonun artması anlamına gelir. Bu duruma toplanma durumu (accumulation case) denir. yarıiletkenin birim alanındaki pozitif yük yoğunluğu ve Q_m ise metaldaki yük yoğunluğu olacak şekilde bu durum Şekil 2.10a'da gösterilmektedir. MOS yapıya küçük bir pozitif voltaj uygulandığında ise enerji bandı aşağı doğru yönelir ve çoğunluk taşıyıcıları (holler) azalır. Buna azalma durumu (depletion case) denir. Birim alandaki uzay yükü Q_{sc} , - qN_AW 'ya eşittir. Burada yüzey boşalım bölgesidir. Bu durum Şekil 2.10b'de gösterilmektedir.



Şekil 2.10 İdeal MOS Kapasitörün enerji bant diyagramı ve yük dağılımı a) toplanma, b) boşalma, c) terslenme

MOS kapasitöre büyük bir pozitif voltaj uygulandığında enerji bandı aşağı yönde iyice eğilim gösterir ve bu durumda E_i öz enerji seviyesi, Şekil 2.10c'deki gibi E_F enerjisi ile çakışır. Bu durumda pozitif kapı voltajı negatif yük taşıyıcılarını (elektronlar) $\text{SiO}_2 - \text{Si}$ ara yüzeyine doğru biriktirir. Yarı iletkendeki elektron konsantrasyonu;

$$n_p = n_i e^{(E_i - E_F)/kT} \quad (2.29)$$

Şeklinde verilir. Şekil 2.10c'deki $(E_F - E_i) > 0$ olduğu ara yüzeyde elektron yoğunluğu n_p , n_i 'den daha büyük olur ve hol konsantrasyonu n_i 'den küçük olur. Bu nedenle yüzey ters dönmüştür. Bu duruma ters dönme durumu (inversion case) denir. Başlangıçta elektron konsantrasyonu düşük olduğundan yüzey zayıf bir tersinirlik durumundadır. Bant eğildikçe iletim bandı Fermi düzeyine doğru yaklaşır. SiO_2 -Si arakesitindeki elektron konsantrasyonu tabanın katkılanma seviyesinde olduğunda güçlü tersinirlik gerçekleşir. Bu aşamadan sonra yarıiletkendeki Q_n negatif yüklerin birçoğu $0 \leq x \leq x_i$ olacak şekilde çok dar bir n-tipi tersinirlik katmanında bulunurlar. Burada x_i tersinirlik bölgesinin genişliğidir. Tipik olarak x_i 1 ile 10 nm arasında değişir ve yüzey boşalım bölgesinin genişliğinden çok daha dardır.

Güçlü tersinirlik oluştuğunda yüzey boşalım bölgesi maksimum genişliğe ulaşır. Bunun nedeni güçlü tersinirliğin oluşması için bandın aşağıya doğru iyice bükülmesidir. Bu durumda bant eğilimindeki küçük bir artış boşalım bölgesinde çok küçük bir artışa neden olur ve tersinirlik katmanındaki Q_n yükünde büyük bir artışa ortaya çıkar. Güçlü tersinirlik durumunda yarıiletkendeki birim alandaki Q_s yükü, tersinirlik katmanındaki Q_n yükü ile boşalım bölgesindeki Q_{sc} yükünün toplamına eşittir.

$$Q_s = Q_n + Q_{sc} = Q_n - qN_A W_m \quad (2.30)$$

Burada W_m yüzey boşalım bölgesinin maksimum genişliğidir.

Şekil 2.10, p tipi yarıiletkenin yüzeydeki daha detaylı bant diyagramını göstermektedir. ψ elektrostatik potansiyeli yarıiletkenin içinde sıfır olarak tanımlanır. Yarıiletkenin yüzeyinde $\psi = \psi_s$ 'tir. ψ_s yüzey potansiyeli olarak adlandırılır. Elektron ve hol konsantrasyonu ψ 'nin fonksiyonu olarak şöyle yazılabilir.

$$n_p = n_i e^{q(\psi_s - \psi_B)/kT} \quad (2.31)$$

$$p_s = n_i e^{q(\psi_B - \psi_s)/kT} \quad (2.32)$$

Bu denkleme göre yüzey potansiyeli için şu yorumlar yapılabilir.

$\psi_s < 0$ Hollerin toplanması (bant yukarı eğilir)

$$\psi_S = \frac{qN_A W^2}{2\epsilon_S} \quad (2.35)$$

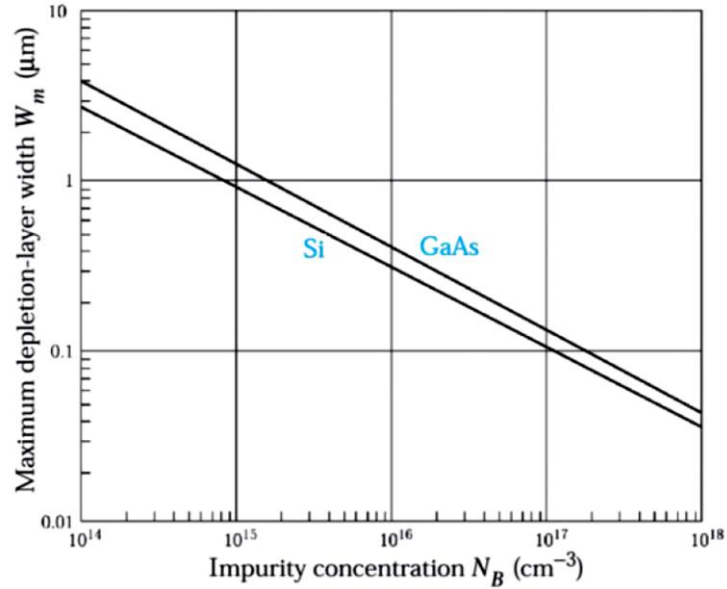
ψ_S, ψ_B 'den büyük iken yüzey tersine dönmüştür. Yüzeyin tersine dönmesi için şartlardan en temeli yüzeydeki elektron konsantrasyonunun tabanın safsızlık konsantrasyonuna eşit olmasıdır, $n_S = N_A$. $N_A = n_i e^{q\psi_B/kT}$ olduğundan.

$$\psi_S(inv) \cong 2\psi_B = \frac{2kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \quad (2.36)$$

elde edilir. Bu denklem yüzeyde enerji bandını öz şartlardaki duruma ($E_F = E_i$) eğmek için ψ_B potansiyelinin gerektiğini gösterir. Güçlü tersinirlik eğilimi için bandın ayrı bir $q\psi_B$ enerjisine yüzeyde ihtiyacı vardır.

Yüzey boşalım katmanı yüzey güçlü tersinirlikte olduğunda maksimuma ulaşmaktaydı. Yüzey boşalım bölgesinin maksimum genişliği W_m Denklem 2.35'de $\psi_S = \psi_S(inv)$ durumu ile verilir.

$$W_m = \sqrt{\frac{2\epsilon_S \psi_S(inv)}{qN_A}} \cong \sqrt{\frac{2\epsilon_S \psi_B}{qN_A}} \quad (2.37)$$



Şekil 2.12 Güçlü tersinirlik şartlarında Si ve GaAs'e ait maksimum boşalım katmanı genişliğinin safsızlık konsantrasyonu ile değişimi.

$$W_m = 2 \sqrt{\frac{\epsilon_S k T \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)}{q^2 N_A}} \quad (2.38)$$

$$Q_{SC} = q N_A W_m \cong \sqrt{q q \epsilon_S N_A (2\psi_B)} \quad (2.39)$$

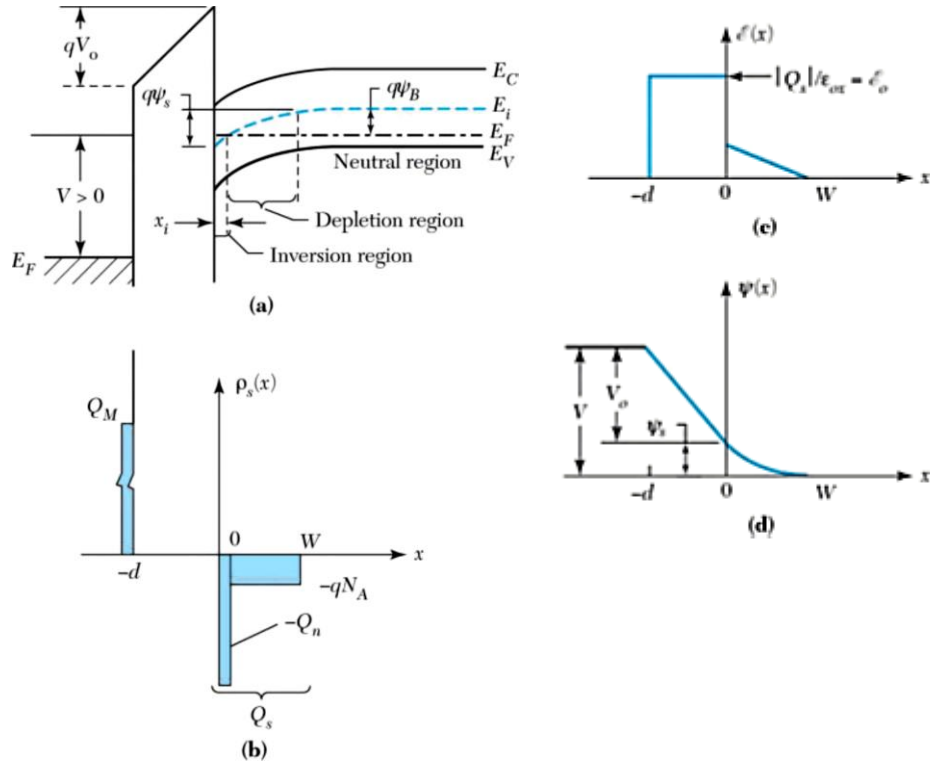
Şekil 2.13a ideal MOS kapasitörün enerji bant diyagramını göstermektedir. Şekil 2.13b yük dağılımı gösterilmektedir. İş fonksiyonu sıfır olduğunda uygulanan gerilimin bir kısmı oksit tabakada bir kısmı ise yarıiletkende görülür. Bu nedenle;

$$V = V_0 + \psi_s \quad (2.40)$$

Yazılabilir. Burada V_0 oksit tabakadaki potansiyeldir ve (Şekil 2.13c) aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$V_0 = E_0 d = \frac{|Q_s|d}{\epsilon_{OX}} = \frac{Q_s}{C_0} \quad (2.41)$$

Burada E_0 oksitteki alandır. Q_s yarıiletkendeki birim alandaki yüküdür ve $C_0(=\epsilon_{OX}/d)$ birim alandaki oksit kapasitansıdır. Bununla ilişkili olan elektrostatik potansiyel dağılımı Şekil 2.13d’de gösterilmiştir.



Şekil 2.13 a) İdeal MOS kapasitörün bant diyagramı. b) tersinirlik şartlarında yük dağılımı. c) elektrik alan dağılımı. d) potansiyel dağılımı

MOS kapasitörün toplam kapasitansı C , oksit kapasitans C_0 ve boşalım katmanı kapasitansı C_j 'nin seri bileşimidir (Şekil 2.14a).

$$C = \frac{C_0 C_j}{(C_0 + C_j)} F/cm^2 \quad (2.42)$$

Burada $C_j = \epsilon_s/W$ şeklinde verilir ve süreksiz p-n eklemi ile aynıdır.

Denklem 2.35, 2.40, 2.41, 2.42'den kapasitans için aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2\epsilon_0^2 x V}{q N_A \epsilon_s d^2}}} \quad (2.43)$$

Bu eşitlik yüzey boşaltımda iken metal tabaka voltajı arttığında kapasitansın düşeceğini göstermektedir. Uygulanan voltaj negatif olduğunda boşaltım bölgesi oluşmaz ve yarıiletken yüzeyinde hollerin toplandığını görürüz. Sonuç olarak toplam kapasitans oksit kapasitansa yakın olur. $\epsilon_0 x/d$ güçlü tersinirlik gerçekleştiğinde, boşaltım bölgesi

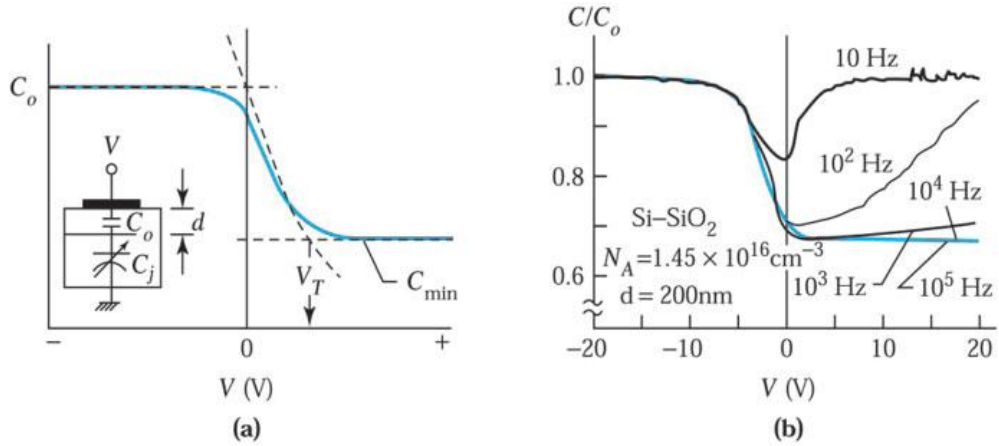
uygulanan voltajın arttırılması ile daha fazla artmaz. Bu durumda metal tabaka voltajı, yüzey potansiyeli ψ_s , $\psi_s(inv)$ 'a eşit olmasına neden olduğunda gerçekleşir. Bu durum Denklem 2.36'da gösterilmiştir. $\psi_s(inv)$ 'ı Denklem 2.40'da kullanarak ve birim alandaki yükün $qN_A W_m$ olmasının güçlü tersinirliğe neden olacağı dikkate alınır aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$V_T = \frac{qN_A W_m}{C_o} + \psi_s(inv) \cong \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A (2\psi_B)}}{C_o} + 2\psi_B \quad (2.44)$$

Bu voltaja eşik voltajı denir. Güçlü tersinirlik gerçekleştiğinde toplam kapasitans Denklem 2.41 ile verilen minimum değerde kalır. $C_j = \epsilon_s / W_m$,

$$C_{min} = \frac{\epsilon_{ox}}{d + (\epsilon_{ox}/\epsilon_s)W_m} \quad (2.45)$$

İdeal MOS kapasitörün hem boşaltım yaklaşımı hem de tam hesaplama dayalı (katı eğri) kapasitans-voltaj eğrisi Şekil 2.14a'da gösterilmiştir. Boşaltım yaklaşımı ile tam hesaplama arasında yakın ilişki görülmektedir.



Şekil 2.14 a) yaklaşık segmentlerin (kesikli çizgiler) gösterildiği yüksek frekans MOS C-V eğrisi. İç resim kapasitörlerin seri bağlantısını göstermektedir. b) frekansın C-V eğrisine etkisi (Deal, 1980).

p tipi taban için bu ifadeler geçerli iken n tipi tabanda da aynı durum söz konusudur. Sadece işaretler ve sembollerde değişiklikler olur. Kapasitans-voltaj

karakteristikleri aynı şekilde olmakla beraber simetriği olarak karşımıza çıkar. n tipi tabanla elde edilen MOS kapasitör için eşik voltajı negatif olacaktır.

Şekil 2.14a'da metal tabakadaki voltaj değiştiğinde tüm yük artışının boşalım bölgesi sınırında olacağı kabul edilmiştir. Gerçekte bu durum yüksek frekanslarda gerçekleşir. Eğer frekans yeterince düşük ise yüzey boşaltım bölgesindeki jenerasyon-rekombinasyon oranları voltaj değişimlerine eşit veya daha büyük olur. Elektron konsantrasyonu (azınlık taşıyıcılar) alternatif akım sinyalinin (AC) izler ve ölçüm sinyalinin değişimi ile tersinir katmanında yük değişimi gerçekleşir. Sonuç olarak güçlü tersinirlikte kapasitans sadece oksit tabakanın kapasitansı C_0 olur. Şekil 2.14b farklı frekanslarda ölçülen MOS C-V eğrileri gösterilmektedir (Deal, 1980). Düşük frekanstaki eğim $f \leq 100$ Hz'de gerçekleşmektedir.

2.5.2 SiO₂ – Si MOS kapasitörler

Tüm MOS kondansatörlerinden metal-SiO₂-Si, en kapsamlı çalışılanıdır. SiO₂-Si sisteminin elektriksel özellikleri ideal MOS kapasitörün özelliklerine yaklaşmaktadır. Bununla birlikte, yaygın olarak kullanılan metal elektrotlar için, iş fonksiyonu farkı $q\phi_{ms}$ genellikle sıfır değildir ve oksit içinde veya SiO₂-Si ara yüzünde, ideal MOS özelliklerini etkileyecek çeşitli yükler vardır.

Vakum seviyesi ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı olan bir yarı iletken $q\phi_s$ 'nin çalışma fonksiyonu (Şekil 2.9), katkılama konsantrasyonuna göre değişir.

Sabit iş fonksiyonuna $q\phi_m$ sahip belirli bir metal için beklediğimiz işm fonksiyonu farkı $q\phi_{ms} \equiv (q\phi_m - q\phi_s)$, yarı iletken dopingine bağlı olarak değişir. En yaygın metal elektrotlardan biri alüminyumdur, $q\phi_m = 4.1$ eV.

Yaygın olarak kullanılan bir başka malzeme de ağır katkılı polikristal silikondur (polisilik olarak da adlandırılır). n^+ ve p^+ polisilik için iş fonksiyonu sırasıyla 4.05 ve 5.05 eV'dir. Şekil 2.14, doping değiştiği için silikondaki alüminyum, n^+ ve p^+ polisilikon için iş fonksiyonlarındaki farklılıkları göstermektedir. Elektrot malzemelerine ve silikon

katkılı konsantrasyonuna bağılı olarak ϕ_{ms} 'nin 2 V aralığında değişebileceğini belirtmek ilginçtir.

Bir MOS kapasitörünün enerji bandı şemasını oluşturmak için, izole edilmiş bir metal ve aralarında bir oksit tabakalı izole edilmiş bir yarı iletken ile başlanır(Şekil 2.15a). Bu izole durumda, tüm bantlar düzdür; bu düz bant durumudur. Termal dengede, Fermi seviyesi sabit olmalı ve vakum seviyesi sürekli olmalıdır. İş fonksiyonu farkını dengelemek için, yarı iletken bantlar, Şekil 2.15b'de gösterildiği gibi aşağı doğru bükülür. Böylece metal pozitif olarak yüklenir ve yarı iletken yüzeyi termal dengede negatif olarak yüklenir. Şekil 2.9'deki ideal düz bant durumunu elde etmek için, iş fonksiyonu farkı $q\phi_{ms}$ 'ye eşit bir voltaj uygulamak gerekir. Bu tam olarak, metale düz bant voltajı ($V_{FB} = \phi_{ms}$) adı verilen negatif voltaj V_{FB} 'yi uygulamamız gereken Şekil 2.15a'da gösterilen durumdur.

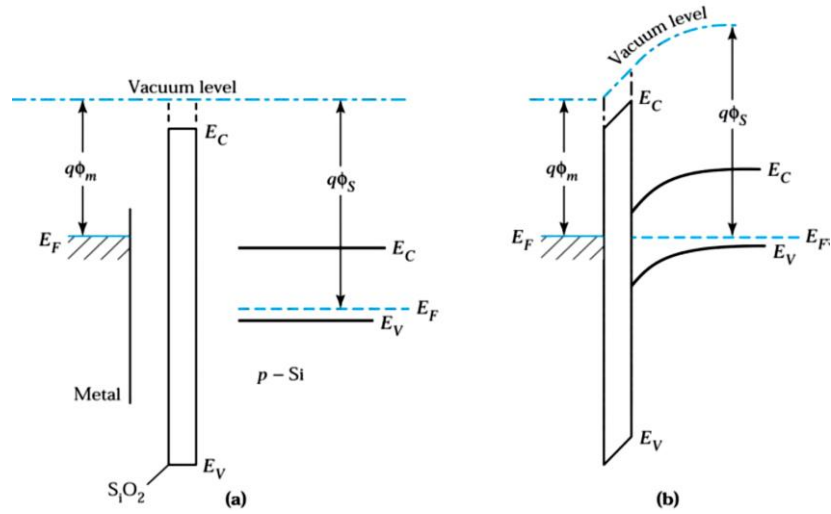
İş fonksiyonu farkına ek olarak, MOS kapasitör oksit ve SiO_2 -Si ara yüzündeki tuzaklardaki yüklerden etkilenir. Bu tuzakların ve yüklerin temel sınıflandırması, Şekil 2.16'da gösterilmektedir. Bunlar, ara yüzey arası yüklenen yük, sabit oksit yükü, oksit tuzak yükü ve mobil iyonik yüküdür.

Arabirimde yakalanan yükler Q_{it} , SiO_2 -Si arabirimindeki periyodik örgü yapısının kesilmesi nedeniyle arabirim tuzaklarındaki (arabirim durumları, hızlı durumlar veya yüzey durumları olarak adlandırılırlar) yüklerdir ve ara yüzün kimyasal bileşimine bağlıdır. Tuzaklar, SiO_2 -Si ara yüzünde, silikon yasak bant boşluğundaki enerji durumları ile yer almaktadır. Ara yüz tuzağı yoğunluğu, başka bir ifadeyle birim alan başına ve eV başına olan ara yüz tuzağı sayısı yönelime bağlıdır. $\langle 100 \rangle$ oryantasyonda, ara yüz tuzağı yoğunluğu, $\langle 111 \rangle$ oryantasyonundan birkaç mertebe daha küçüktür. Günümüzde termal olarak silikon üzerine büyütülmüş silikon dioksit MOS kapasitörlerin ara yüz tuzak yükleri çoğunlukla düşük sıcaklık (450 °C) hidrojen tavlama pasifize edilmiştir.

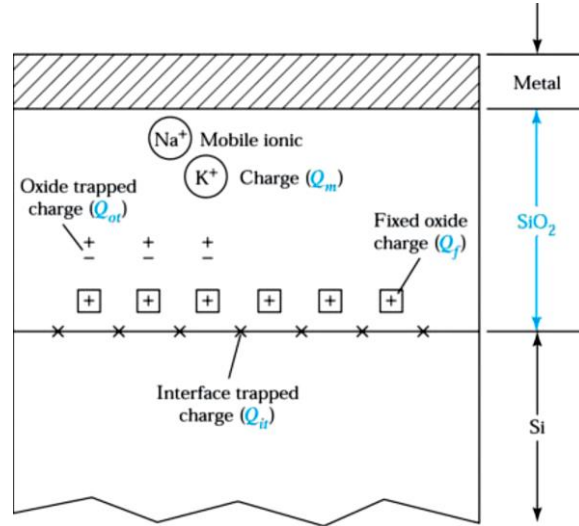
$\langle 100 \rangle$ oryantasyonlu silikon için Q_{it} / q değeri, 10^{10} cm^{-2} kadar düşük olabilir; bu, 10^5 yüzey atomu başına yaklaşık bir ara yüz tuzak yükü anlamına gelir. $\langle 111 \rangle$ oryantasyonlu silikon için, Q_{it} / q yaklaşık 10^{11} cm^{-2} 'dir.

Hacimsel safsızlıklara benzer şekilde, bir ara yüz tuzağının nötr olması durumunda donör olarak kabul edilir ve bir elektron bağışlayarak (vazgeçerek) pozitif olarak yüklenebilir. Bu nedenle, donör durumu genellikle Şekil 2.17'de gösterildiği gibi bant aralığının alt yarısında bulunur. Negatif bir voltaj uygulandığından, Fermi seviyesi, ara yüz tuzağı seviyelerine göre aşağı doğru hareket eder ve ara yüz tuzakları pozitif olarak yüklenir. Bir alıcı ara yüz tuzağı nötrdür ve bir elektron kabul edilerek negatif olarak yüklenir. Dolayısıyla, alıcı durumu genellikle Şekil 2.17'de gösterilen bant aralığının üst yarısında bulunur.

Şekil 2.17, hem alıcı durumlardan hem de verici durumlardan oluşan bir ara yüz tuzağı sistemini göstermektedir; buradaki nötr seviyenin üzerinde bir seviye (E_0) olan durumlar alıcı türünde ve E_0 'un altındakiler donör türündedir. Tuzaklara yakalanmış yükü hesaplamak için oda sıcaklığında ve E_F altında ve üstünde doluluk oranının 0 ve 1 değerlerini aldığı varsayılır. Bu varsayımlarla, ara yüz kapana takılmış yükler Q_{it} aşağıdaki gibi kolayca hesaplanabilir:



Şekil 2.15 (a) İzole edilmiş bir metal ile aralarında oksit tabakalı izole edilmiş yarı iletkenin enerji bandı diyagramı. (b) Bir MOS kapasitörünün termal denge içindeki enerji bandı diyagramı.



Şekil 2.16 Termal olarak oksitlenmiş silikon ile bağlantılı yükler için şema.

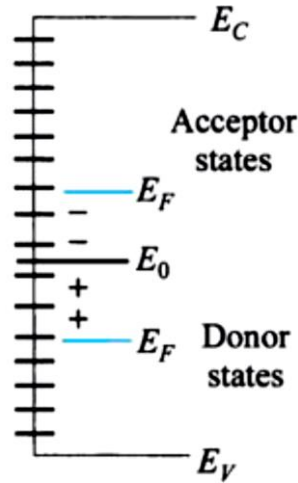
$$\begin{aligned}
 Q_{it} &= -q \int_{E_o}^{E_F} D_{it} dE \quad E_f, E_o' \text{ın üstünde,} \\
 &= +q \int_{E_o}^{E_F} D_{it} dE \quad E_f, E_o' \text{ın altında,} \quad (2.46)
 \end{aligned}$$

burada D_{it} , ara yüz tuzağı yoğunluğu ve Q_{it} ise birim alandaki efektif net yüklerdir (C / cm^2). Ara yüz tuzağı seviyeleri, enerji bant aralığı boyunca dağılmıştır ve ara yüz tuzağı yoğunluğu aşağıdaki gibi verilir:

$$D_{it} = \frac{1}{q} \frac{dQ_{it}}{dE} \quad \text{Tuzak sayısı / } cm^2 - eV \quad (2.47)$$

Bu, D_{it} 'i deneysel olarak E_F 'nin veya yüzey potansiyelinin değişmesine bağlı olarak Q_{it} 'in değişmesinden tespit etmek için kullanılan yöntemdir. Öte yandan, Denklem 2.47, ara yüz tuzaklarının verici tipinde mi yoksa alıcı tipinde mi olduğunu ayırt edemez, sadece D_{it} 'in büyüklüğünü belirler.

Bir voltaj uygulandığında, Fermi seviyesi, ara yüz tuzağı seviyelerine göre yukarı veya aşağı hareket eder ve ara yüz tuzaklarında bir yük değişimi meydana gelir. Bu yük değişikliği MOS kapasitansını etkiler ve ideal MOS eğrisini değiştirir.



Şekil 2.17 Hem alıcı durumlarından hem de verici durumlarından oluşan herhangi bir ara-tuzak sistemi

Hem alıcı durumlarından hem de verici durumlarından oluşan herhangi bir ara-tuzak sistemi; üst düzeydekilerin alıcı, alt düzeydekilerin verici durumda olduğu eşdeğer dağılımdaki nötr E_0 düzeyi ile yorumlanabilir. E_F , E_0 'nin üstünde iken net yük negatif aksi durumda pozitif olur.

Sabit yük Q_f , SiO_2 -Si ara yüzünün yaklaşık 3 nm'si içinde bulunur. Bu şarj sabittir ve yüzey potansiyeli ψ_s 'deki geniş bir değişiklik ile yüklenemez veya deşarj edilemez. Genel olarak, Q_f pozitifdir ve oksidasyon, tavlama koşullarına ve silikon oryantasyonuna bağlıdır. Oksidasyon durduğunda, bazı iyonik silikonlar ara yüzey civarında kalır. Bu iyonlar, yüzeydeki tamamlanmamış silikon bağları boyunca (örneğin, Si-Si veya Si-O bağları), pozitif ara yüz yükü Q_f ile sonuçlanabilir. Q_f , SiO_2 -Si ara yüzünde yer alan bir yük tabakası olarak kabul edilebilir. Dikkatlice işlem görmüş bir SiO_2 -Si ara yüz sistemi için tipik sabit oksit şarj yoğunlukları, $\langle 100 \rangle$ yüzeyi için yaklaşık 10^{10} cm^{-2} ve $\langle 111 \rangle$ yüzey için yaklaşık $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 'dir. Q_{it} ve Q_f 'nin düşük değerlerinden dolayı, $\langle 100 \rangle$ yönelimli silikon MOSFET'ler için tercih edilir.

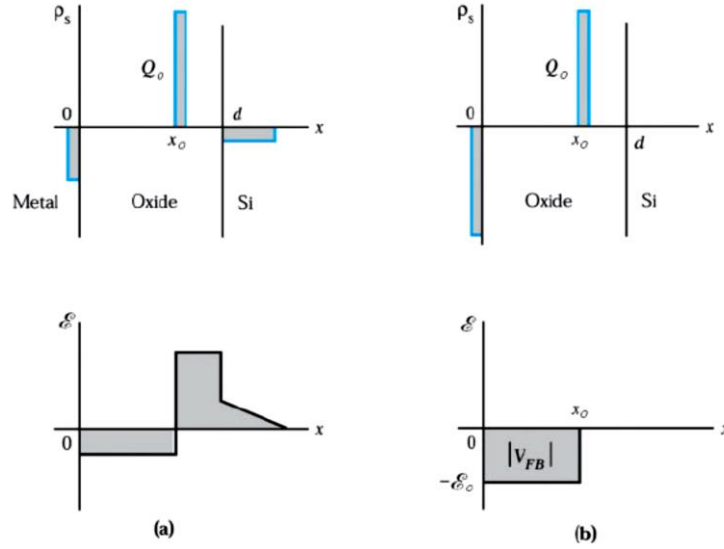
Oksitte tutulan yükler Q_{ot} , silikon dioksitteki kusurlarla ilişkilidir. Bu yükler, örneğin, X-ışını radyasyonu veya yüksek enerjili elektron bombardımanı ile oluşturulabilir. Tuzaklar oksit tabakasının içine dağılmıştır. Üretim süreci ile ilişkili Q_{ot} 'ların çoğu düşük sıcaklıkta tavlama yoluyla çıkarılabilir.

Sodyum veya diğer alkali iyonlar gibi hareketli iyonik Q_m yükleri, yüksek sıcaklık ($> 100^\circ \text{C}$) ve yüksek elektrik alanı durumlarında oksit içerisinde hareket eder. Alkali metal iyonları kaynaklı iz kirliliği, yüksek besleme ve yüksek sıcaklık koşulları altında çalışan yarı iletken cihazlarda stabilite sorunlarına neden olabilir. Bu şartlar altında, hareketli iyonik yükler oksit tabakası içinde ileri ve geri hareket edebilir ve voltaj ekseninde boyunca C-V eğrilerinin kaymasına neden olabilir. Bu nedenle cihaz imalatında hareketli iyonları ortadan kaldırmak için özel dikkat gösterilmelidir.

Yükler, birim alan başına C / cm^2 cinsinden net yüklerdir. Bu yüklerin düzlem bant voltajı üzerindeki etkisini değerlendirirsek; Şekil 2.18'de gösterildiği gibi, oksit içindeki birim alan Q_0 başına pozitif bir tabaka yükü düşünün. Bu pozitif tabaka yükü, Şekil 2.18a'nın üst kısmında gösterildiği gibi kısmen metalde ve kısmen yarı iletkeninde negatif yükleri indükleyecektir. Poisson denkleminin bir kez entegrasyonu ile elde edilen alan dağılımı, Şekil 2.18a'nın alt kısmında gösterilmektedir. Burada iş fonksiyonu farkının olmadığı veya $q\phi_{ms} = 0$ olduğu varsayılmıştır.

Düz bant durumuna ulaşmak için (yarı iletkeninde indüklenmiş yük yok), Şekil 12b'de gösterildiği gibi metale negatif voltaj uygulamalıyız. Negatif voltaj arttıkça, metal üzerine daha fazla negatif yük yüklenir ve böylece yarı iletken yüzeyindeki elektrik alanı sıfır olana kadar elektrik alanı dağılımı aşağı doğru kayar. Bu durumda, elektrik alanı dağılımı altında bulunan alan, V_{FB} düzlem bant gerilimine karşılık gelir:

$$V_{FB} = \varepsilon_0 x_0 = \frac{Q_0}{\varepsilon_0} x_0 = \frac{Q_0}{C_0} \frac{x_0}{d} \quad (2.48)$$



Şekil 2.18 Oksit içerisinde tabaka yükünün etkisi. (a) $V_G=0$ durumu (b) Düz bant koşulu.

Düz bant voltajı bu nedenle, hem tabaka yükü Q_o 'nun yoğunluğuna hem de oksit içindeki konumunu x_o 'a bağlıdır. Tabaka yükü metale çok yakın yerleştirildiğinde, $x_o = 0$ ise silikonda hiçbir yüklenmeye neden olmaz ve bu nedenle düz bant voltajı üzerinde bir etkisi olmaz. Öte yandan Q_o , sabit-oksit yükü Q_f gibi yarı iletken $x_o = d$ olacak şekilde çok yakın yerleştirildiğinde, maksimum etki yapacak ve düz bant voltajında yükselmeye neden olacaktır.

$$V_{FB} = -\frac{Q_o}{C_o} \frac{d}{d} = -\frac{Q_o}{C_o} \quad (2.49)$$

Daha genel bir ifade ile oksit içindeki keyfi bir uzay yükü dağılımının, düz-bant gerilimi aşağıdaki gibi verilir.

$$V_{FB} = \frac{-1}{C_o} \left[\frac{1}{d} \int_0^d x \rho(x) dx \right] \quad (2.50)$$

Buradaki $\rho(x)$, oksit içindeki hacim yükü yoğunluğudur. $\rho_{ot}(x)$, oksit hapsedilmiş şarjlar için hacim şarj yoğunluğunu ve $\rho_m(x)$, mobil iyonik şarjlar için hacim şarj yoğunluğunu bilindirse, Q_{ot} ve Q_m ve bunların düzlem bant voltajına karşılık gelen katkılarını elde edebiliriz:

$$Q_{ot} = \frac{1}{d} \int_0^d x \rho_{ot}(x) dx \quad (2.51)$$

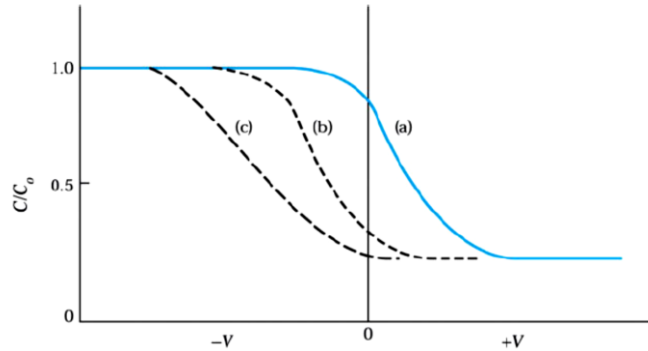
$$Q_m = \frac{1}{d} \int_0^d x \rho_m(x) dx \quad (2.52)$$

İş fonksiyonu farkı $q\phi_{ms}$ 'nin değeri sıfır değilse ve arabirim tuzağa yakalanmış yüklerin değeri önemsiz ise, deneysel kapasitans-gerilim eğrisi ideal teorik eğriden aşağıdaki denklemden hesaplanan miktarda değiştirilecektir.

$$V_{FB} = \phi_{ms} - \frac{(Q_f + Q_m + Q_{ot})}{C_o} \quad (2.53)$$

Şekil 2.19a'daki eğri, ideal bir MOS kapasitörünün C-V özelliklerini göstermektedir. Sıfır olmayan ϕ_{ms} , Q_f , Q_m veya Q_{ot} nedeniyle, C-V eğrisi Denklem 2.53 tarafından verilen bir miktarda sapma gösterir. C-V eğrisinin paralel kayması, Şekil 2.19b'de gösterilmektedir. Ayrıca, büyük miktarda arabirim hapsolmuş yük varsa, arabirim tuzaklarındaki yükler

Yüzey potansiyeline göre değişir. C-V eğrisi, yüzey potansiyeli ile değişen miktarda yer değiştirecektir. Bu nedenle, Şekil 2.19c, ara yüzde tuzaklanan yükler nedeniyle bozulma ve kayma göstermektedir.



Şekil 2.19 İdeal bir MOS kapasitörünün C-V özellikleri. (b) Pozitif sabit oksit yüklerinden dolayı voltaj eksenini boyunca paralel kayma. (c) Arayüz tuzakları nedeniyle gerilim eksenini boyunca paralel olmayan kayma.

2.6 Metal Oksit Yapılarda Elektriksel Özellikler

Metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapı, yalıtkan oksit tabakasının dielektrik özelliğinden dolayı paralel levhalı bir kondansatöre benzemektedir. MOS yapısının özellikleri oksit ve oksit-yarıiletken ara yüzey özelliklerine bağlıdır. Bu ara yüzey yalıtkan oksit tabaka, metal ile yarıiletkeni birbirinden izole eder ve akımı belirler.

Metal oksit yapılarda kapasitans-gerilim ve akım-gerilim ölçümleri büyük önem arz etmektedir. Birçok nicelik bu ölçümler sonucu elde edilen grafikler yardımıyla hesaplanabilir.

2.6.1 Metal-yarıiletken kontaklarda kapasitans gerilim ölçümleri

Metal/yarıiletken (MY) kontaklarda kapasitans-gerilim (C-V) ölçümlerinden birçok niceliğin hesaplanabilmesi mümkündür. Bu niceliklerden biri olan engel yüksekliği şu şekilde belirlenir. Ters beslem durumunda C-V ölçümleri yapılır. Çok düşük bir alternatif gerilim (~50 mV) MY kontağa uygulandığı durumdaki kapasitans Denklem 2.54 ile hesaplanır.

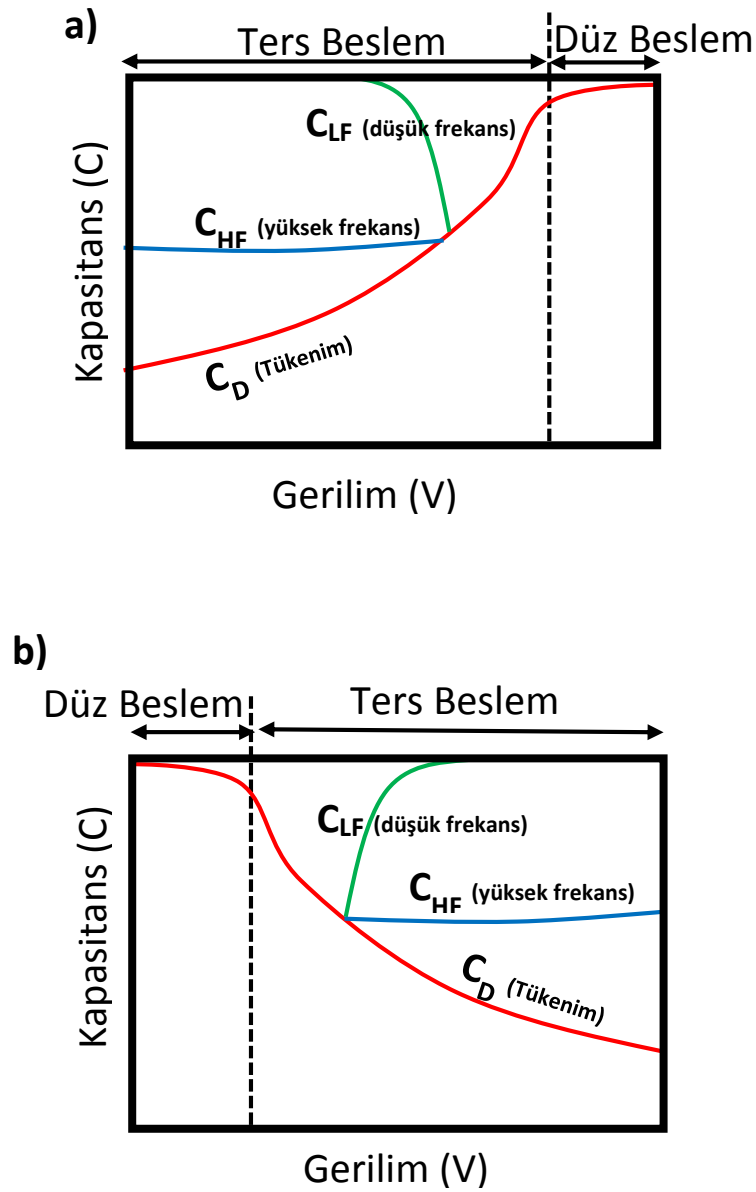
$$C = A \left[\frac{\epsilon_s q N_D}{2(V_i + V_R - \frac{kT}{q})} \right]^{1/2} \quad (2.54)$$

Burada A yapının kesit alanı/doğrultucu kontak alanı, ϵ_s yarıiletkenin geçirgenlik kat sayısı, V_R uygulanan ters beslem voltajı, N_D katkı atomlarının yoğunluğudur. Burada donör taşıyıcıların yoğunluğunun düzgün dağılımda olduğu varsayılmıştır.

$1/C^2$ - V_R grafiğinin lineer bölgedeki eğimi $2/A^2 \epsilon_s q N_D$ değerini verirken gerilim eksenini kestiği nokta $V_i = V_d - kT/q$ ile ifade edilen değere karşılık gelir. Burada V_d difüzyon potansiyelini ifade eder. Metal/yarıiletken arakesitinde oluşan engelin yüksekliği Denklem 2.55 ile ifade edilir.

$$\Phi_B(C - V) = (qV_i + kT/q) + (kT/q) \ln(N_c/N_D) = V_d + E_F \quad (2.55)$$

Bu denklemde sanal kuvvet etkisi ile gerçekleşen engel düşüşü ihmal edilmiştir. Ters beslem C-V ölçümleri ile elde edilen engel yüksekliği, doğru beslem I-V ölçümleri ile elde edilen engel yüksekliğinden Fermi enerjisi kadar düşüktür.



Şekil 2.20 İdeal MOS kapasitörünün, (a) n-Si, (b) p-Si MOS C-V_a eğrileri

Metal olarak alüminyumun, yarı iletken olarak n tipi silisyumun kullanıldığı bir metal-oksit-yarıiletken yapıyı ele alalım. Büyük pozitif beslem durumunda yüksek miktarda elektron n-Si bölgesinden alüminyuma daha yakın yarıiletken bölgeye hareket

eder. Bu bölgede yüksek elektron yoğunluğunun olması bölgeye metalik özellik kazandırır. n-tipi MOS yapıda negatif beslem ters beslem olarak adlandırılırken, p-tipi MOS yapıda pozitif beslem ters beslem olarak adlandırılır.

Yüksek frekans kapasitans-gerilim ve düşük frekans kapasite-gerilim eğrileri doğru akım sıfır olduğunda gerçekleşir.

Gerçek MOS yapılarda oksit içindeki yüklerin durumuna göre C-Vg eğrisinde sapmalar gerçekleşir. Oksit/Yarıiletken ara yüzündeki veya yarıiletken yüzeyindeki tuzaklar ara yüzey tuzakları olarak adlandırılır. Farklı frekanslarda yapılan ölçümler ile ara yüzey tuzakları ile oksit tuzakları birbirinden ayırt edilebilir.

2.6.2 Metal-yarıiletken kontaklarda akım gerilim ölçümleri

Yüksek mobiliteli yarıiletkenli metal/yarıiletken kontaklarda akım termiyonik emisyon vasıtasıyla gerçekleşir ve Denklem 2.56 ile ifade edilir.

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.56)$$

Denklemdaki I_0 ters beslem doyum akımıdır ve Denklem 2.57 ile ifade edilir. n diyotun idealite faktörü, A^* kullanılan yarıiletkenine ait efektif Richardson sabitidir.

$$I_s = I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_B}{kT}\right) \quad (2.57)$$

$V \geq 3kT/q$ durumunda $\ln I-V$ grafiği lineerdir ve grafiğin yatay eksenini kestiği noktadaki akım değeri I_0 'ı verir. Sanal kuvvet engel alçalmasının etkisini göz önüne alarak sıfır beslem engel yüksekliği Denklem 2.58 ile bulunur.

$$\Phi_B(I - V) = \Phi_{B0} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (2.58)$$

Burada A diyot alanıdır. $\ln(I_0/T^2)-q/kT$ grafiğinden birçok nicelik hesaplanabilir. Grafiğin eğiminden aktivasyon enerjisi (E_a), lineer kısmın düşey eksenini kestiği noktadan

Denklem 2.59’de kullanılarak A^* değeri hesaplanabileceği gibi, engel yüksekliğini de hesaplamak bu grafik yardımıyla mümkündür.

$$\ln(I_0/T^2) = \ln(AA^*) - \left(\frac{q}{kT}\right) \cdot E_a \quad (2.59)$$

Metal yarıiletken kontaklarda gerilim yüksek değilken akım termiyonik emisyon ile gerçekleşir ve $V \geq 3kT/q$ için akım Denklem 2.60 ile ifade edilir.

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{k_B T}\right) - 1 \right] \quad (2.60)$$

Burada R_s kontağın seri direnci ve I_0 ters beslem doyum akımıdır. I_0 değeri Denklem 2.61 ile hesaplanır.

$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{B0}}{k_B T}\right) \quad (2.61)$$

Burada, A doğrultucu kontağın alanı, A^* etkin Richardson sabiti, R_s diyodun seri direnci, k Boltzmann sabiti, q elektronik yük, ϕ_{B0} sıfır-beslem engel yüksekliği ve T ise Kelvin cinsinden sıcaklıktır. Diyot üzerine düşen voltaj $V_d = V - IR_s$ ’dir. Burada V uygulanan gerilim, R_s seri dirençtir. İdeal durumda idealite faktörü $n=1$ olarak kabul edilir. Gerçekte $n>1$ değerleri alır ve sıcaklık düştükçe artar. Bu durum metal/yarıiletken ara yüzeyinde ara yüzey durumlarının varlığına, ara yüzeydeki engelin düzgün dağılımda olmayışından, elektronların engel boyunca tünellemesinden, tüketim bölgesindeki taşıyıcı rekombinasyonundan ve yalıtkan ara yüzey tabakasından kaynaklanır. İdeal olmayan koşullarda metal/yarıiletken kontak için akım Denklem 2.62 ile ifade edilir.

$$I = I_0 \exp\left[\frac{q(V-IR_s)}{nk_B T}\right] \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{q(V-IR_s)}{k_B T}\right] \right\} \quad (2.62)$$

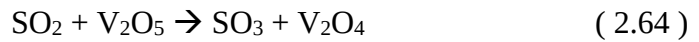
İdealite faktörü n ’in sıcaklığa bağıllığı Denklem 2.63 ile ifade edilir.

$$n = n_0 + \frac{T_0}{T} \quad (2.63)$$

2.7 Vanadyum Oksitler ve Özellikleri

Vanadyum, sembolü V olan 23 atom numaralı kimyasal elementtir. Sert, gümüşü gri renkli bir geçiş metalidir. Andrés Manuel del Rio tarafından 1801 yılında vanadinit mineralinin ($Pb_5(VO_4)3Cl$) analizi sırasında keşfedildi ve erythronium adı verildi. Ancak bir süre sonra erythronium ile kromun aslında aynı element oldukları fikri kabul gördü. 1831 yılında Nils Gabriel Sefström, vanadyumun keşfedilmemiş bir element olduğunu ispatladı ve Vanadis adını verdi. Element doğada 65 farklı mineralde bileşik halinde bulunur. Çin'de ve Rusya'da çelik üretiminde ortaya çıkan cürufun işlenmesi ile diğer ülkelerde ise ağır yağ baca tozunun geri dönüşümü ya da uranyum madenciliğinin bir yan ürünü olarak üretir. Özellikle yüksek hız çeliği benzeri yüksek alaşımlı çeliklerin üretiminde kullanılır. Vanadyum pentoksit (V_2O_5) bileşiği sülfürik asit üretimi için bir katalizördür. Çoğu canlıda bulunan Vanadyum, bazı enzimlerin etkin bölgesi olarak kullanılır.

Sülfürik asit eldesi prosesinde, sülfür dioksitin sülfür triokside dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu ara basamakta sülfür dioksit oksijen ile vanadyum(V) oksit katalizörü eşliğinde reaksiyona girerek sülfür trioksit elde edilir. Sülfür dioksit vanadyum(V) oksit tarafından sülfür triokside yükseltgenirken aynı zamanda kendisi de vanadyum (IV) oksit formuna indirgenir.



Daha sonrada ortamdaki oksijen ile tekrar vanadyum(V) oksit formuna yükseltgenir. Bir katalizör reaksiyon süresince geçici olarak değişikliğe uğrayabilir. Fakat reaksiyonun sonunda başladığı yapıda olmak zorundadır.



V_2O_5 vanadyumun en yaygın oksit yapısıdır. V_2O_5 Li,Na gibi küçük metal katyonların girebileceği boşluklara sahip bir yapı gösterir. V_2O_5 2.2 eV bant genişliğine ve 2.1 değerinde kırılma indisine sahiptir. Vanadyum elementi hava ortamında 660 °C üzerindeki sıcaklıkta farklı renkleri ile anlaşılabilen vanadyum oksitlere dönüşür.

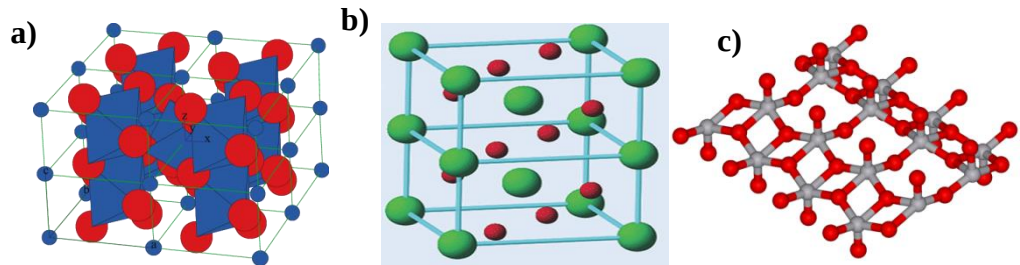
Vanadyum monoksit VO gri renkte iken, vanadyum dioksit VO₂ mavi-siyah, vanadyum trioksit V₂O₃ siyah, vanadyum pentoksit V₂O₅ turuncu renktedir.



Şekil 2.21 Vanadyum oksit çözeltilerin farklı renklerde görünümü.

Vanadyum oksitler metal-yarıiletken fazlar arasında belirli sıcaklıklarda geçiş özelliğine sahiptirler. Vanadyum oksitlerin bu özelliği 1959 yılında ilk olarak F. Morin tarafından bulunmuştur. Vanadyum oksitler farklı faz geçiş sıcaklıklarına sahiptirler. Örneğin VO -147 °C, V₅O₉ -138 °C, V₆O₁₃ -123 °C, V₂O₃ -105 °C, VO₂ 67 °C, V₂O₅ ise 375 °C faz geçiş sıcaklığı sergiler.

Kararlı yapıdaki vanadyum ve vanadyum oksitler 2 ile 5 arasında değerlik alırlar. Vanadyumun, VO, V₂O₃, VO₂, V₂O₅, V₃O₅, V₄O₇, V₅O₉, V₆O₁₁, V₇O₁₃, V₂O₄ ve V₆O₁₃ gibi birçok farklı yapıda oksidi oluşabilir. Kısaca VO_x şeklinde gösterilebileceğimiz vanadyum oksitler iki gruba ayrılır. Bunlar V_nO_{2n-1} şeklindeki Magneli fazları ve V_{2n}O_{5n-2} şeklindeki Wadsley fazlarıdır. Vanadyum oksitler tek bir fazda bulunabildikleri gibi iki faza bir arada da sahip olabilirler.



Şekil 2.22 Vanadyum oksitin farklı fazlarına ait kristal yapıları a) VO b) VO₂ c) V₂O₃

Vanadyum oksitler faz geçişi yaptıklarında bant yapılarında değişim gerekleşiş. Vanadyum oksitler elde edilirken hangi yapıda olacağı taban sıcaklığı, kısmi oksijen basıncı, tavlama işleminin uygulanış şekli faktörleri tarafından belirlenir. Örneğin Meng tarafından magnetron sıçratma tekniği ile elde edilen vanadyum oksit filmlerde XRD ölçümleri sonucunda farklı taban sıcaklığının farklı vanadyum oksit yapılarına neden olduğu görülmüştür (Meng ve ark., 2006).

Vanadyum oksit filmlerde faz geçişi sırasında elektriksel özelliklerde belli başlı değişimler meydana gelir. Metal faz $10^{-8} - 10^{-2} \Omega.cm$ aralığında özdirenç gözlenirken, yarıiletken fazda $10^{-2}-10^9 \Omega.cm$, yalıtkan fazda ise $10^9-10^{20} \Omega.cm$ aralığında özdirenç gözlenir. Vanadyum oksit filmlerde faz geçişi sırasında ele alınması gereken diğer önemli bir parametre ise yüksek yüzey direnci (ROS) ve aktivasyon enerjisi ΔE 'dir. Örneğin Gan çalışmasında reaktif magnetron sıçratma tekniği ile elde ettiği VO_2 filmlerin özdirencini dört nokta iğne tekniği ile belirlemiş ve 68 üstü sıcaklıklarda VO_2 filmlerin MIT geçişi gerçekleştirerek özdirençlerinin 10 ohm-cm değerlerinden 10^{-3} ohm-cm değerlerine kadar düştüğünü gözlemlemiştir (Gan ve Laou, 2004). Luo çalışmasında reaktif magnetron sıçratma tekniği ile farklı tavalama sürelerinde vanadyum oksit filmler elde etmiş ve dört nokta iğne tekniği ile filmlerin ROS değerlerini ölçmüştür. Sonuçlar tavlama süresinin ROS değerlerini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir (Luo ve ark., 2011).

Vanadyum oksitler faz geçişi gerçekleştirdiklerinde geçirgenlik gibi optik özelliklerinde de önemli değişimler gözlenir. Vanadyum oksit filmler birçok farklı yöntemle elde edilebilirler. Reaktif sıçratma (reactive sputtering), Darbeli lazer biriktirme (pulsed laser deposition), İyon Demeti ile Sıçratma (ion beam deposition), Isısal buhar biriktirme (thermal evaporation), Kimyasal buhar biriktirme (chemical vapor deposition), Sol-gel bunlardan bazılarıdır.

Vanadyum oksitlerin karakterizasyonunda da birçok farklı teknik kullanılır. Vanadyum oksitin kristal yapı karakterizasyonunda XRD, Nötron Kırınımı, Elektron Kırınımı gibi teknikler kullanılır. Elektriksel özelliklerinin karakterizasyonunda dört nokta iğne tekniği, iki nokta iğne tekniği gibi teknikler kullanılır. Optiksel özelliklerinin karakterizasyonu kırmızı altı lazer spektroskopisi (Infrared Laser Spectroscopy), UV-VIS-NIR spektroskopisi gibi teknikler kullanılır.

Vanadyum oksitlerin teknolojide birçok alanda kullanım potansiyeli vardır. Literatürde elektrokromik cihazlarda, termokromik cihazlarda,soğutmasız bolometrik dedektörlerde, Lazer korunumunda,güneş pillerinin pencerelerinde,Yüksek kapasiteli lityum pillerinin elektrotlarında,elektrik ve optik anahtarlama cihazlarında,ışık modülatörlerinde kullanımına dair çalışmalar mevcuttur.

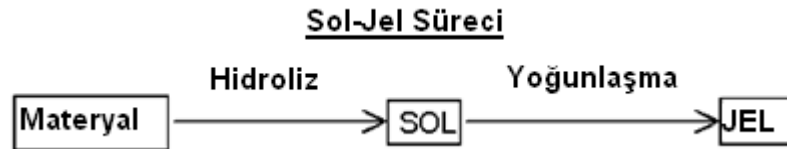
Sonuç olarak vanadyum oksitlerin tümü metal-yalıtkan geçiş sıcaklığına (MIT) ve histeris döngü kalınlığına sahiptir. MIT sıcaklığı, histeris kalınlığı, öz dirençteki değişim ve faz geçişinin keskinliği filmlerin kalitesini belirler. Amorf olan filmler çeşitli yöntemlerle kristal yapıya dönüştürülebilir. Bunlardan bazıları alttaş sıcaklığı arttırma, ısı döngü işleminden geçirme, kısmi oksijen basıncını düşük tutma ve tavlama işleminden geçirmedir. Vanadyum oksitlerde faz geçişi ile optiksel özelliklerin değişimine bakıldığında optik geçirgenliğin kırmızı altı bölgede yaygın olduğu görülür.

2.8 İnce Film Kaplama Yöntemleri

İnce film teknolojisi günümüz teknolojilerinin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. İnce filmler, elektronik aygıt teknolojisinin temelini oluşturmaktadır. Çok geniş bir yelpazede kullanım alanına sahip olan ince filmlerden elde edilen performans oldukça önemli bir parametredir. Üretim teknikleri ve üretim koşullarındaki farklılıklar ince filmlerde hacimli malzemelerde bulunmayan pek çok özelliği ortaya çıkarmaktadır. Bu özellikler, ince film malzemelere hacimli malzemelere göre üstün özellikler kazandırmakta ve yeni çalışmaların önünü açmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte ince filmlerin üretilmesinde birbirine alternatif olabilecek yeni üretim teknolojileri ortaya çıkmış ve geliştirilmiştir. Yüzlerce ince film üretim teknolojisi bulunmakla beraber bu teknikler katı, sıvı ve gaz fazdaki teknikler olarak sıralanabilir. Buhar fazda; Kimyasal buhar biriktirme, fiziksel buhar biriktirme. Sıvı fazda; Sol-Jel, kimyasal banyo, Elektrokimyasal yöntem, LB film tekniği. Katı fazda; mekanik aşındırma, devitrifikasyon (hızlı katılaştırma) yöntemleri ve bu yöntemlerin birçok farklı çeşidi ince film kaplama teknolojileri arasında sayılabilir. (Sönmezoğlu ve ark., 2012)

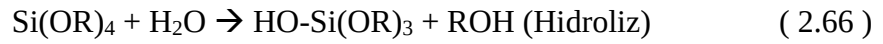
2.8.1 Sol – jel yöntemi

Sol-jel cam, jel ve seramik tozları elde etmede kullanılan bir kimyasal sentezleme yöntemidir. Bu yöntem bir solüsyonda (sol) bulunan metal alkoksitlerin zamanla polimerleşerek jel oluşturması şeklinde özetlenebilir.

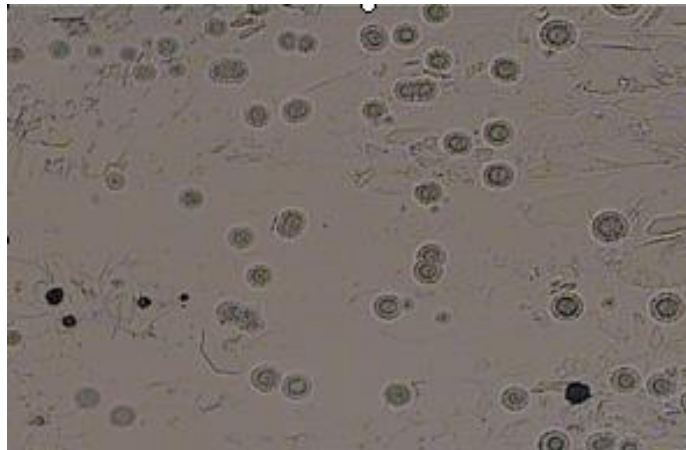
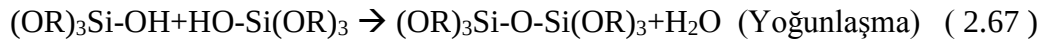


Şekil 2.23 Sol-jel sürecinin şematik gösterimi.

Sol-Jel tekniğinde öncelikle uygun alkoksitler kullanılarak kolloidal bir süspansiyon oluşturulur. Örnek olarak $\text{Si}(\text{OCH}_2\text{CH}_3)_4$ verilebilir. Elde edilen solüsyonda art arda hidroliz ve yoğunlaşma tepkimeleri gerçekleşerek atom grupları oluşur. Aşağıda örnek bir tepkime verilmiştir.



Burada R bir alkildir.



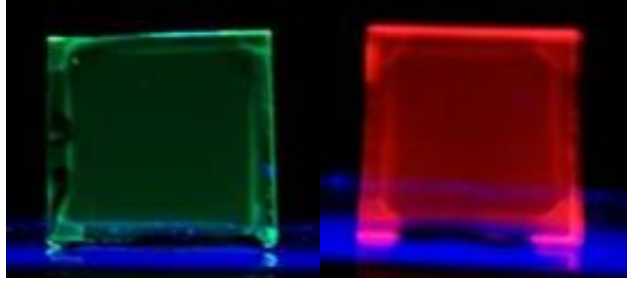
Şekil 2.24 Sol-gel yönteminde alkoksitlerin birleşerek atom grupları oluşturmasının başlaması.

Reaksiyonun devamında Si-O-Si bağları polimerleşme süreci ile birleşerek daha büyük moleküller oluşturur. Molekül makroskobik boyutlara ulaştığında jel oluşur.



Şekil 2.25 Sol-gel yönteminde atom gruplarının birleşerek daha büyük moleküller oluşturması.

Jel kurutularak düşük sıcaklıklarda ($<100\text{ }^{\circ}\text{C}$) hidroliz sonucu oluşan su ortamdan uzaklaştırılır. Son olarak yapı yüksek sıcaklıklarda ($>300\text{ }^{\circ}\text{C}$) fırınlanarak organik ve diğer atıklar buharlaştırılır. Bu son işlemten sonra arzu edilen seramik elde edilir.



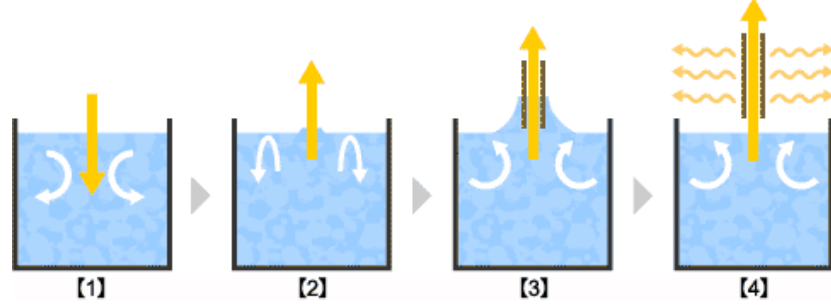
Şekil 2.26 Sol-jel yöntemiyle elde edilen camlar.

Sol-Jel kaplama yöntemleri üç tanedir. Bunlar, daldırarak kaplama (dip coating), spin-kaplama (spin-coating) ve püskürterek kaplama (spray pyrolysis) yöntemleridir.

2.8.1.1 Sol-jel daldırma metodu

Daldırma yönteminde yüzeyi kaplanacak malzeme hazırlanan çözelti içerisine sabit bir hızla daldırılıp bir süre bekletildikten sonra yine sabit bir hızla çıkarılır. Daldırma

yönteminde süreç beş aşamaya ayrılabilir. Bunlar daldırma, yukarı çekme, kaplama, süzülme ve buharlaşmadır. Bu aşamalar Şekil 2.27’de gösterilmiştir.



Şekil 2.27 Daldırma yönteminin aşamaları [1] Daldırma. [2] Yukarı çekme. [3] Süzülme ve kaplama [4] Buharlaşma.

Daldırma yönteminin başlıca avantajları şu şekilde sıralanabilir: düzgün bir kaplama elde edilir, çoklu katmanlı yapı kolaylıkla oluşturulabilir, kaplama kalınlığı daldırma hızı değiştirilerek kontrol edilebilir, tabanın şeklinden bağımsız olarak tüm yüzeyleri kaplanabilir, optik özellikler kolaylıkla değiştirilebilir. Daldırma yönteminin en büyük dezavantajı ise tabanın sadece bir yüzeyi kaplanacak olduğunda karşılaşılan güçlülüdür. Daldırma sürecinde taban sabit hızla sıvı içerisine daldırıldığında taban ile sıvı arasında bir ara bölge oluşur. Daldırma yönteminde tabanın kaplanması taban sıvıdan çıkarılırken gerçekleşir. Taban dışarı çekilirken ara bölge iç tabaka ve dış tabaka olarak ayrılır. İç tabaka taban üzerine tutunarak film oluşum sürecini başlatırken, dış tabaka sıvı içerisine geri dökülür.

İnorganik türler buharlaşırken sırasıyla yığışım (aggregation), jelleşme (gelation) ve son kuruma aşamalarından geçerek kuru jel veya kserojel tabakası oluşturur. Daldırma-kaplama sırasındaki kalınlık gelişimini modellemek için farklı unsurlar göz önünde bulundurulur. Elde edilen filmin kalınlığı (h_0) yukarı ve aşağı hareket eden katmanları ayıran tabakalarla ilişkindir. Prensip, film biriktirme bölgesindeki çeşitli kuvvetler arasındaki rekabet film kalınlığını ve akış çizgisinin konumunu belirler.

Sıvı viskozite η ve çekme hızı U_0 , yerçekimin neden olduğu bükülmeyi azaltacak kadar yüksek olduğunda, elde edilen film kalınlığı h_0 , viskoz direncini ve yerçekimi kuvvetini Denklem 2.68'in ifade ettiği şekilde dengeler.

$$h_0 = c_1 \left(\frac{\eta U_0}{\rho g} \right)^{1/2} \quad (2.68)$$

Burada ρ sıvı yoğunluğu, g yerçekimi ivmesidir ve c_1 sabiti Newton sıvıları için yaklaşık 0.8'dir. Denklem 2.68'e göre daldırma yönteminde oluşan filmin kalınlığı sıvı viskozitesi ve çekme hızı ile artarken. Sıvının yoğunluğu ve yerçekimi kuvveti ile azalmaktadır. Dolayısıyla daha kalın film elde edebilmek için sıvı yoğunluğunu mümkün olduğunca düşük tutarken sıvı viskozitesini mümkün olduğunca arttırmalı ve tabanı hızlı geri çekmek gerekir.

Denklem 2.68 Newton sıvıları için kurgulanmış bir bağıntıdır ve hangi parametreleri nasıl değiştireceğimiz hakkında bize bilgi verir. Gerçekte elde edilen film kalınlığı formülde elde edilenden daha büyük olur. Bunun nedenleri buharlaşma etkisi, sıvının Newton sıvısı olmayışı, pH etkisi, viskozitenin değişken oluşu şeklinde sıralanabilir. Daldırma yönteminde buharlaşma oranı sıvı kalınlığına bağlı değilken sıvının yüzey alanı ile orantılıdır.

2.8.1.2 Sol-jel döndürme metodu

Spin-kaplamada birkaç damla solüsyon taban üzerine damlatılır. Taban 3000–4000 rpm'e varan hızlarda döndürülür. Taban dönerken solüsyon tabakaya yayılır ve solvent buharlaşmaya başlar. Solventin büyük bir kısmı buharlaştıktan sonra ince film elde edilir.

Film tabanda kalan solventi buharlaştırmak için düşük sıcaklıklarda (~100–200 °C) ısıtılır. Bu işlem birkaç kez tekrar edilir. Elde edilen film kalan organikleri buharlaştırmak için yüksek sıcaklıklarda (~300–600 °C) fırınlanır.

2.8.1.3 Sol-jel uygulamaları

Sol jel yönteminin kullanıldığı bazı uygulamalar aşağıdaki tablodaki gibi verilebilir.

Çizelge 2.2 Sol-jel yönteminin kullanıldığı bazı uygulamalar.

Mikro devre üretiminde – foto-dirençleri kaplamada.
Manyetik disk kaplamalarında.
Düz ekran gösterge kaplamalarında- Anti-yansıma kaplamalarında.
Kopmak Disklerde-DVD, CD ROM, vb.
Televizyon tüpü fosforu kaplamada.
Kimyasal veya termal koruyucu katmanlarda.
Optik amaçlı filtre kaplamalarında.
Sol-Jel cam elde etmede.
İnce seramik tozları elde etmede.

Sol jel yönteminin üstünlükleri ve sınırlılıkları aşağıdaki Çizelge 2.3’deki gibi özetlenebilir.

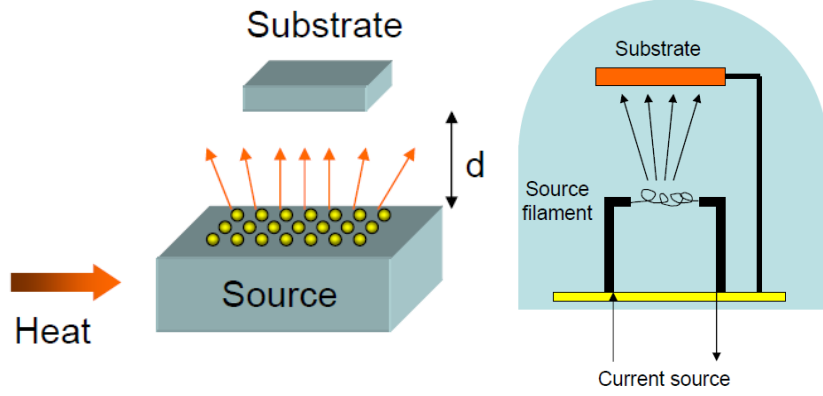
Çizelge 2.3 Sol-jel yönteminin üstünlük ve sınırlılıkları.

Üstünlükleri	Sınırlılıkları
Maliyeti düşüktür.	Film kalınlığını kontrol altında tutmak daha zordur.
Kimyasal kompozisyonu kontrol etmek daha kolaydır.	Yüksek kalitede ince film kristali elde etmede diğer yöntemlere göre daha az idealdir.
Vakum pompası, vakum çemberi vb. araçlara gerek duymaz.	Solüsyonun yüzeye yapışabilir olması gerekir.
Uygulanması diğer yöntemlere göre daha kolaydır.	

2.8.2 Buharlaştırma yöntemi

Buharlaştırma tekniğinde amaç filmi büyötmek için aralarında mesafe bulunan tabana ısıtılmış bir kaynaktan (sıvı veya katı) atomları kontrol edilebilir şekilde transfer etmektir. Kaynak, verimli bir şekilde süblimleşme yaptığı veya buharlaştığı noktaya ulaşılan kadar doğrudan veya dolaylı olarak ısıtılır. Bu yöntem analiz edilirken,

buharlaştırma oranlarından ve buhar basıncından faydalanılır. Buharlaştırma yönteminde basınç ve sıcaklık dışında, ısıtıcının, kaynak ve alt tabakanın yerleştirilme konumları da önemli faktörlerdir.



Şekil 2.28 Buharlaştırma yöntemi modeli

Buharlaştırma işleminin basamakları şu şekilde özetlenebilir. Isıtıcı vakum odasının içine uygun bir malzeme (kaynak) yerleştirilir. Hazne kapatılır ve vakumlanır. Kaynak ısıtılır. Sıcaklık buharlaşma sıcaklığına ulaştığında, atomlar veya moleküller kaynağın yüzeyinden ayrılmaya başlar ve başka bir yüzeye ulaşana kadar neredeyse doğrusal bir yolda ilerlerler. Kaplanacak yüzey çok daha düşük sıcaklıkta olduğundan, moleküller enerjilerini tabana aktararak sıcaklıklarını düşürür ve yoğunlaşır. Yeni sıcaklıktaki buhar basıncı çok daha yüksek olduğundan tekrar buharlaşmaz ve alt tabakaya geri yapışmaz. Kaplama kalınlığı, buharlaşma oranının, kaynağın ve alt tabakanın geometrisinin ve buharlaşma zamanının bir fonksiyonudur.

Buhar basıncı, buhar fazının, belirli bir sıcaklıkta katı veya sıvı faz ile dengede olduğu basınçtır. Bu basıncın altında, yüzey buharlaşması yoğuşmadan daha hızlı, üzerinde ise daha yavaştır. Teorik olarak, buhar basıncı Clausius-Clapyeron denklemi ile bulunabilir.

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H(T)}{T\Delta V} \quad (2.69)$$

Burada ΔH entalpi değişimi ve ΔV katı (veya sıvı) ve buhar fazları arasındaki hacim değişikliğidir. Küçük bir sıcaklık aralığında, denklem aşağıdaki gibi basitleştirilebilir:

$$P = P_0 \exp\left(\frac{\Delta H_e}{RT}\right) \quad (2.70)$$

Burada ΔH_e buharlaşma molar ısıdır. Gerçekte, ampirik formüller ve deneysel veriler, bir elementin buhar basıncını bulmak için daha kullanışlıdır. Örneğin, sıvı Al'ın buhar basıncı şu şekilde verilir:

$$\log P(\text{torr}) = \underbrace{-\frac{15993}{T} + 12.409}_{\text{Ana Terimler}} \underbrace{-0.999 \log T - 3.52 \cdot 10^{-6} T}_{\text{Küçük Terimler}} \quad (2.71)$$

Buharlaşma akısı için temel denklem şöyle verilir:

$$\Phi_e = \frac{\alpha_e N_A (P_v - P_h)}{\sqrt{2\pi MRT}} \quad (2.72)$$

Burada Φ_e buharlaşma akımı, α_e buharlaşma katsayısı ($0 < \alpha_e < 1$), P_v , buhar basıncı ve P_h , ortam basıncıdır. $\alpha_e = 1$ ve $P_h = 0$ olduğunda maksimum akı elde edilir.

$$\Phi_e = \frac{3.513 \times 10^{22} P_v}{\sqrt{MT}} \text{ molekül/cm}^2 \text{ s} \quad (2.73)$$

Bu denklem, atomik kütle ile akı çarpılarak kütle birimlerinde de yazılabilir:

$$\Gamma_e = 5.84 \times 10^{-2} \sqrt{\frac{M}{T}} P_v \text{ gr/cm}^2 \text{ s} \quad (2.74)$$

Örneğin Al için, $M = 27$ gr'dır. Buhar basıncı diyagramından veya Denklem 2.71'den $P_v = 10^{-4}$ Torr elde etmek için Al atomlarını 980°C 'ye ısıtmamız gerekir. Bu sıcaklıkta, kütle buharlaşma oranı:

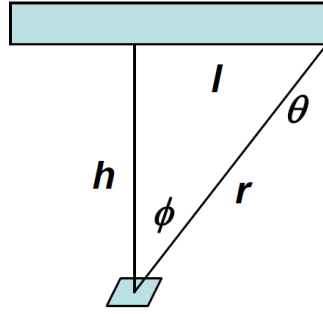
$$\Gamma_e = 5.84 \times 10^{-2} \sqrt{\frac{27}{980}} 10^{-4} = 9.694 \times 10^{-4} \text{ gr/cm}^2 \text{ s} \quad (2.75)$$

bulunur. Buharlaştırma tekniğinde en çok işimize yarayan nicelik biriktirme oranıdır. Bu sadece buharlaşma oranıyla değil, aynı zamanda kaynak ve taban arasındaki açı ve mesafe

ile de ilgilidir. Balistik rejimde olduğumuzu ve buharlaşan atomların kaynağından alt tabakaya doğru düz bir çizgide hareket ettiği varsayalım. Kaynak tarafından kaybedilen kütle Denklem 2.76'deki gibi olur.

$$M_e = \int_0^t \int \Gamma_e dA_e dt \quad (2.76)$$

Burada A_e kaynağın yüzey alanıdır. Vakum Odasındaki kütle genişlemesi, kaynağın bir nokta mı yoksa bir yüzey kaynağı mı olduğuna bağlıdır. Bu kütlenin bir kısmı hedef tabana çarpar. Hedefin oryantasyonu, biriktirilen gerçek kütleyi belirleyecektir. Kaynak materyalin noktasal veya levha şeklinde oluşu hedef materyalin kaplanma miktarını etkiler. Noktasal bir kaynak materyal için oluşturulan film kalınlığı Denklem 2.77 ile verilirken yüzey bir kaynak materyal için Denklem 2.78 ile verilir.



Şekil 2.29 Kaynak materyal ile hedef materyalin düzeni.

$$d = \frac{M_e h}{4\pi(h^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}} \rho_{\text{yoğunluk}} \quad (2.77)$$

$$d = \frac{M_e h^2}{\pi(h^2 + l^2)^2} \rho_{\text{yoğunluk}} \quad (2.78)$$

Burada h kaynağın hedefe dik uzaklığı, l kaynağın hedefin uç noktasına yatay uzaklığı, M_e kaynağın kütlesi, ρ film yoğunluğunu gösterir. $l=0$ için maksimum film kalınlığı elde edilir. Eğer film kalınlığını maksimum kalınlık d_0 'a oranlarsak Denklem 2.79 ve Denklem 2.80 elde edilir.

$$\frac{d}{d_0} = \frac{1}{(1+(1/h)^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2.79)$$

$$\frac{d}{d_0} = \frac{1}{(1+(1/h)^2)^2} \quad (2.80)$$

Kaynak ve hedef materyaller Bir kürenin yüzeyine denk gelecek şekilde yerleştirilirse. Tüm hedef materyaller aynı anda homojen olarak kaplanırlar. Buharlaştırma yönteminde çeşitli nedenlerle filmde kirlilik oluşabilir. Başlıca kirlilik nedenleri kaynak malzemenin kirli oluşu, ısıtıcı kaynaklı kirlenme, haznede gaz kalması olarak sayılabilir. Bu kirlilik nedenlerini bertaraf etmek için bazı noktalara dikkat etmek gerekir. Örneğin kaynak materyalinden kaynaklanan kirliliği önlemek için yüksek saflıkta (% 99.99999) malzeme kullanılmalıdır. Isıtıcı kaynaklı kirliliği önlemek için düşük difüzyonu malzemeler kullanılabilir. Haznede kalan gazdan kaynaklı kirliliği önlemek için daha iyi vakum ortamı sağlanmalı ve daha yüksek birikme oranı için çalışılmalıdır.

Buharlaştırma yöntemi buharlaşma şekline göre iki şekilde yapılabilir. Bunlardan ilki olan fiziksel buharlaştırmada bir filament elektrik akımı ile ısıtılır. Kaynak materyal bu filamentin içine veya yakınına yerleştirilir. Isınan kaynak buharlaşarak hedef materyali kaplar.

İkinci yöntem ise elektron demeti ile buharlaştırmadır. Isıtılan bir filament elektron yayar. Bu elektronlar kaynağa çarparak ısınmasına ve buharlaşmasına neden olurlar.

Buharlaştırma yönteminde çalışmanın durumuna göre farklı filamentler kullanılır. Çizelge 2.4’de başlıca filament çeşitleri ve açıklamaları verilmiştir. Bunların dışında ihtiyaca göre daha birçok filament çeşidi bulunur.

Çizelge 2.4 Buharlaştırma yönteminde başlıca filament çeşitleri ve kullanım durumları.

	Filament Türü	Açıklama
	V-oluklu	Materyali buharlaştırmak için ısıma ve iletim yoluyla ısıtma sağlar. Tek kullanımlıktır. 1500 A'dan ince filmleri kaplamak için uygundur. Noktasal kaynak materyal için iyi bir seçimdir(küresel yüzeylerde düzgün kaplama sağlar)
	Spiral	Ağır kaplamalar için daha elverişlidir. Homojen kaplama için en iyi pozisyon denenerek bulunmalıdır.
	Tel Sepeti	Daha esnek bir kullanıma sahiptir. Eriyen kaynak materyallerde daha iyi sonuç verir.
	Çukur tekne	Mo, Ta, Tu elementlerinden yapılmış çeşitleri vardır. Maliyeti daha yüksektir. Daha kalın katmanlar biriktirmeye elverişlidir. Buharlaştırma sadece yukarı yönde gerçekleşir. Daha yüksek elektriksel güç gerektirir.

Sonuç olarak vakumlu buharlaştırma yöntemi metalik ince filmlerin biriktirilmesi için en uygun yöntemlerden biridir. Bileşikler ve alaşımlar bu yöntemle iyi kaplanmaz, çünkü çalışma sıcaklığında ayrışma eğilimindedirler. Maskeleri kullanarak desenlendirme rutin olarak yapılırken, buharın balistik olarak akması nedeniyle kademeli kaplama çok iyi elde edilemez (gölgelenme oluşur).

2.9 İnce Film Optiği (UV-VIS)

Elektromanyetik spektrum radyo dalgaları, mikro dalgalar, kızılötesi, görünür, mor ötesi, x-ışınları, gama ışınları şeklinde düşük frekanstan yüksek frekansa doğru sıralanır. Mor ötesi bölgeye kısaca UV, görünür bölgeye ise kısaca VIS denir. Görünür bölgeyi de kapsayacak şekilde mor ötesi ile kızıl ötesi bölgeyi kapsayan ve ışığın soğrulma miktarını ölçen yöntem UV-VIS spektrofotometresi denir. İncelenen malzemenin soğurma katsayısının ışığın dalga boyu ile değişimine bakılarak malzemenin enerji bant aralığı hesaplanır. Malzemeler üzerlerine gelen ışığın enerjisi bant aralıklarından büyük olduğunda soğurlar, küçük olduğu durumda ise geçirirler. Malzemedan geçen ışığın şiddeti Denklem 2.81 ile verilir.

$$I_t = I_0 \exp(-\alpha \delta) \quad (2.81)$$

Burada I_0 gelen ışığın şiddeti, I_t geçen ışın şiddeti, α malzemenin soğurma katsayısı, δ malzemenin kalınlığıdır.

Denklem 2.81 kullanılarak soğurma katsayısı Denklem 2.82'deki gibi bulunur.

$$\alpha = \frac{1}{\delta} \ln(I_0/I_t) \quad (2.82)$$

Denklem 2.82'den anlaşılaçağı üzere malzemenin soğurma katsayısı, gelen ışığın dalga boyuna ve malzemenin cinsine göre değışiklik gösterir. Malzemenin yansıtma değeri Denklem 2.83 ile hesaplanır.

$$R = \left[\frac{1-T}{1+T} \right] \quad (2.83)$$

Burada R yansıtma değeri, T ise geçirgenliğı ifade eder. Ölçülen geçirgenlik değeri ve hesaplanan yansıtma değeri kullanarak malzemenin soğurma katsayısı Denklem 2.84 ile hesaplanabilir.

$$\alpha = -\frac{1}{\delta} \ln \left[\frac{\sqrt{(1-R^4)+4T^2R^2}-(1-R)^2}{2TR^2} \right] \quad (2.84)$$

Soğurma katsayısı geçirgenliğe bağlı olarak Denklem 2.85 ile ifade edilir.

$$\alpha = \frac{\ln T^{-1}}{\delta} \quad (2.85)$$

Burada δ kalınlık, T ise geçirgenliği ifade eder.

Soğurma katsayısı değerleri hesaplandıktan sonra $(\alpha\nu)^2 - h\nu$ grafiği çizilir, grafik çizgisinin enerji eksenini kestiği nokta malzememizin enerji-bant aralığını verir.

2.10 İnce Film Analiz Yöntemleri

Elde edilen filmlerin kristal yapıları, yüzey özellikleri, yapısal özellikleri gibi birçok özelliğinin anlaşılması için çeşitli teknikler kullanılır. Bu tekniklerden bazıları XRD, SEM, AFM ve EDX olarak sıralanabilir.

2.10.1 X-ışını kırınımı (XRD)

X-ray saçılması teknikleri kristalik yapı, kimyasal kompozisyon, fiziksel özellikler hakkında bilgi sağlayan ve yapıya zarar vermeyen analitik teknikler ailesidir. Bu teknikler bir numuneye gönderilen x-ışını demetinin saçılmadan sonraki şiddetinin, ışının gelme ve saçılma açısı, polarizasyon, dalga boyu, enerji gibi faktörlerin fonksiyonu olarak incelenmesine dayanır (Warren B. , 1969).

Dalgalar tekrarlanan uzaklığı dalga boyuna yakın olan düzenli bir yapı ile etkileşime girdiğinde kırınım gerçekleşir. Örneğin ışık, birkaç bin angstrom aralıkları bulunan bir ızgarada kırınıma uğrar.

X-ışını, kristal yapısına sahip bir katıdaki atomlar arası uzaklığa yakın birkaç angstrom civarında bir dalga boyuna sahiptir. Bu durum X-ışınının, düzenli bir yapıya sahip kristal yapısındaki minerallerde kırınıma uğrayabileceğini gösterir. Bu şartlar

sağlandığında X-ışını kırınımına uğrar ve yapıcı girişim oluştur. 1912’de W.L. Bragg makul faktörlere bağlı bir bağıntı geliştirmiştir. Bu faktörler şunlardır;

1. Benzer atomik düzlemler arası uzaklık (d).
 2. Kırınım açısı teta. Kırınım ölçer bu açığı iki kez ölçer. Bu nedenle ölçülen açığa 2-teta denir.
 3. Gelen X-ışının dalga boyu (lamda).
- Bu faktörlere bağlı olarak Bragg yasası aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$n. \lambda = 2.d.\sin\theta \quad (2.86)$$

Burada n, bir tam sayıdır.

λ , Angstrom olarak dalga boyu.

d, angstrom olarak atomlar arası uzaklık.

θ , derece olarak kırınım açısıdır.

Difraktometre herhangi bir kristal yapısındaki katının kırınım desenini elde etmek için kullanılır. Kırınım deseni ile bilinmeyen bir katının yapısı incelenebilir veya bilinen bir katının atomik boyutta yapısı karakterize edilebilir. Binlerce mineralin X-ışını kırınım bilgisi standartlaştırılmıştır. Bunların çoğu “JCPDS-International Centre for Diffraction Data” tarafından yayınlanmıştır. Standart bir difraktometre aşağıdaki parçalardan oluşur.

Çizelge 2.5 Standart bir difraktometrede bulunan parçalar ve bunların işlevleri.

Difraktometre Parçaları ve İşlevleri
Chiller, X-ışını tüpünü soğutmak için temiz su sağlar.
Difraktometre ve yan birimleri için akımı düzenleyen regülatör.
Difraktometreye komut gönderen ve difraktometreden gelen verileri kaydeden bilgisayar.
Şeritli kayıt aygıtı.
X-ışını kaynağı olarak kullanılan tüp. Bu tüpten elde edilen X-ışınları grafit kristalden geçirilerek tek bir demet şekline sokulur.
Teta dengeleyici yarık. Bu X-ışınlarının örneğe ulaşmadan önce tamamen paralel olmasını sağlar.
Numune odası. Numunemizi tutmak için kullanılır.
Pırıltı sayacı. X-ışınının şiddetini ölçer.
Açıölçer.

X-ışını kırınımı teknikleri x-ışınlarının kristal yapısına sahip katılardan elastik saçılmasına dayanır.

Tek kristal X-ışını kırınımı: Bu teknik en basit inorganik katılardan, kompleks makro molekülere kadar bir çok kristal materyalin yapısının incelemede kullanılmıştır. Toz Kırınımı: Bu teknik polikristal veya toz halindeki katı numunelerin kristalik yapı, kristalleşme büyüklüğü (grain büyüklüğü) ve tercih edilen oryantasyon gibi özellikleri incelemede kullanılır. Bu teknik ile bilinmeyen numunelerin yapısı, “International Centre for Diffraction Data” tarafından sağlanan veri tabanı ile kıyaslama yapılarak incelemede sıklıkla kullanılır. Bu yöntem kristal yapıların gerinimini ölçmede de sıklıkla kullanılır. Yüksek Çözünürlük X-ışını Kırınımı: Bu teknik ince epitaksiyal filmlerde kalınlık, kristalik yapı, gerinim gibi özellikleri incelemede kullanılır. X-ışını kutup şeması analizleri: Bu teknik ile ince film örneklerindeki kristal oryantasyonu ve dağılım gibi özellikleri belirlemede kullanılır (Warren B. E., 1990).

2.10.2 Taramalı elektron mikroskopu (SEM)

SEM (Scanning Electron Microscope) materyalleri görüntülemek için ışık yerine elektronları kullanan bir mikroskoptur.

SEM yüksek çözünürlükte resimler elde etmemizi sağlar. Bu şekilde materyallerin birçok özelliği yüksek büyütme oranı ile analiz edilebilir. İncelenecek örneklerin SEM ile görüntülenmesi görece kolaydır. Çünkü SEM’de incelenecek örneğin iletken olmasını gerektirir. Yüksek büyütme oranı, derinlemesine odaklanma, yüksek çözünürlük ve örneğin kolay gözlemlenebilir olması SEM’i birçok araştırma dalında sıkça kullanılan bir araç yapar.

Elektron demeti farklı maddelerin kullanılabildiği bir flaman ile elde edilir. Bu filamanlardan en sık olarak kullanılanı tungsten tabancasıdır. Bu flaman bir tungsten halkasıdır ve katot olarak kullanılır. Bu halka uygulanan voltaj ile ısınır. Flamana göre daha pozitif olan anot elektronlara çekici bir kuvvet uygular. Bu kuvvetin etkisiyle elektronlar anoda doğru ivmelenir. Lantan Hekzaborit (LaB₆) flamanlar ve alan yayıcı tabancalar diğer flaman çeşitlerindendir.

Manyetik lensler bakır tel sargıların demir kutup parçalarının üzerine sarılması ile elde edilir. Sargılardaki akım bir manyetik alan oluşturur. Dairesel olarak simetrik olan manyetik alan homojen değildir ve merkezde zayıf, kenarlarda ise daha güçlüdür. Merkeze yakın bölgelerden geçen elektronlar merkez ekseninden uzak bölgelerden geçen elektronlara göre daha az sapmaya uğrayarak geçerler. Bu şekilde paralel bir elektron demeti bir noktaya doğru odaklanır.

Bir manyetik alanda elektronlar Lorentz kuvveti F ’nin etkisinde kalır.

$$F = -e(E + V \times B) \quad (2.87)$$

$$|F| = eVB \sin(V, B) \quad (2.88)$$

Burada E elektrik alanı, B manyetik alanı, e elektronun yükünü, V elektronun hızını göstermektedir. Böylece manyetik lensin odaklama etkisi B manyetik alanı ile artar. F kuvveti V ile B 'ye diktir. Bu elektronların spiral bir yörünge izlemelerine neden olur. Bunun sonucunda elde edilen görüntü örneğe göre terstir.

Elektron tabancasından elde edilen elektronlar manyetik lensler ile odaklandıktan sonra örneğe çarpar. Örneğe çarpan bu elektronlar ikincil elektronların oluşmasını sağlar. İkincil elektronlar metallerde genellikle iletim bandı elektronları iken yarı iletken ve yalıtkanlarda valans bandı elektronlarıdır. Örnekten saçılan bu elektronlar ile gelen elektronlar arasında oldukça büyük bir enerji farkı vardır. İkincil elektronlar bir ikincil detektör (secondary dedector) ile algılanır. Birçok SEM'de ikincil detektör olarak Everhart-Thornley detektörü kullanılır.

Örneğe gönderilen elektronların bir kısmı saçılmaya uğrar. Burada elastik ve inelastik olmak üzere iki çeşit saçılmadan bahsedilebilir. Elastik saçılma sonucunda bazı elektronlar örnekten geri saçılır ve neredeyse enerji değişimi göstermezler. Bu elektronlar da bir geri saçılma detektörü (backscatter dedector) yardımıyla toplanarak ayrı bir görüntüleme elde edilebilir.

Gerek ikincil detektör gerekse geri saçılma detektörü ile toplanan elektronlar voltaja çevrilir ve bu voltaj yükseltilir. Yükseltile voltaj bir CRT ekranına uygulanarak ekranda saçılmaya göre değişen şiddette bir nokta elde edilir. Örneğin taranması ile bu şekilde elde edilen binlerce farklı şiddetteki nokta bize örneğin topografyası hakkında bilgi verir.

SEM'de gönderilen elektron demetinin örneğe çarpmasının ardından birçok foton ve elektron salınımı gerçekleşir. Bunlar Çizelge 2.6 gibi sıralanabilir.

Çizelge 2.6 SEM ile materyalden elde edilen salınımlar ve sağladıkları bilgi

Salınım	Sağladığı Bilgi
X-Işınları	Örneğin bütün hacmindeki atomik kompozisyon hakkında bilgi sağlar.
Auger Elektronlar	Yüzeydeki atomik kompozisyon hakkında bilgi sağlar
Birincil Geri Saçılan Elektronlar	Atom numarası ve topolojik bilgi sağlar.
Katot Işıması	Elektriksel bilgi sağlar.
İkincil Elektronlar	Topolojik bilgi sağlar.
Örnek akımı	Elektriksel bilgi sağlar.

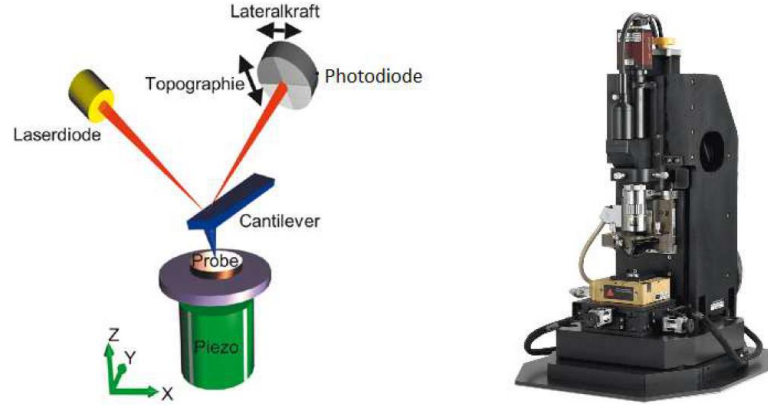
SEM ile bütün bu sinyaller elde edilebilmekle beraber genellikle X-ışınları, birincil geri saçılan elektronlar ve ikincil elektronlar ile elde edilen bilgiler kullanılır.

SEM’de çalışmalar vakum ortamında yapılmalıdır. Bunun için birçok neden bulunmaktadır. Eğer ortam vakum edilmez ise elektron demetinin yüksek kararsızlığından ötürü elektron demeti üretilemez veya kalıcı olması sağlanamaz. Ortamda bulunan gazlar elektron kaynağı ile etkileşime girerek yanmasına neden olabilir veya elektron demeti bu gazların iyonlaşmasına neden olarak rasgele yüklerin oluşmasına neden olabilirler. Elektron demetinin örneğe ulaşması güçleşir. Ortamdaki gaz veya mikroskobun kendinden kaynaklanabilecek moleküller örnek ile bileşikler oluşturarak örneğin safsızlığını etkileyebilirler. Bu ışık şiddetinin azalmasına veya görüntüde belirsizliklerin oluşmasına neden olacaktır (J.Klesel, 2005).

2.10.3 Atomik kuvvet mikroskobu (AFM)

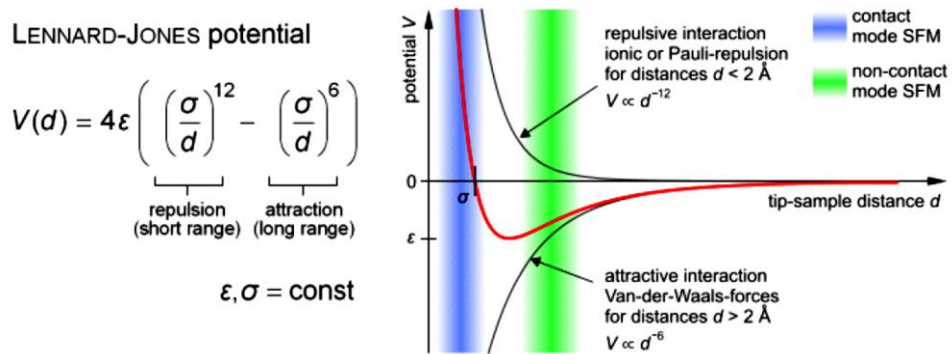
Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), bir tarama probu mikroskobu türüdür ve 1986 yılında Binning, Quate ve Gerber tarafından geliştirilmiştir. AFM’de (Şekil 2.30), numune konsol yayına monte edilmiş keskin bir uç (tipik yarıçap 10nm) ile taranır. Numune üzerinden tarama yapılırken, uç ile numune arasındaki kuvvet, konsolun tepesine odaklanmış bir lazerin sapmasının izlenmesiyle ölçülür (Şekil 2.30). Lazer noktasının sapması Pozisyona duyarlı foton detektörü (PSPD) ile ölçülür. Yatay yönde

hareket, numunenin altında bulunan esnek tip piezoelektrik tarayıcı ile yapılır. Dikey hareket, konsolun da içinde durduğu AFM kafasındaki bir tarayıcı tarafından gerçekleştirilir. PSPD sinyali, tarama işlemi sırasında numune yüzeyi boyunca dikey hareketini kontrol eden bir geri besleme döngüsü oluşturmak için kullanılır.



Şekil 2.30 AFM'in Şematik çizimi ve gerçek AFM'nin (AFM XE-100) fotoğrafı.

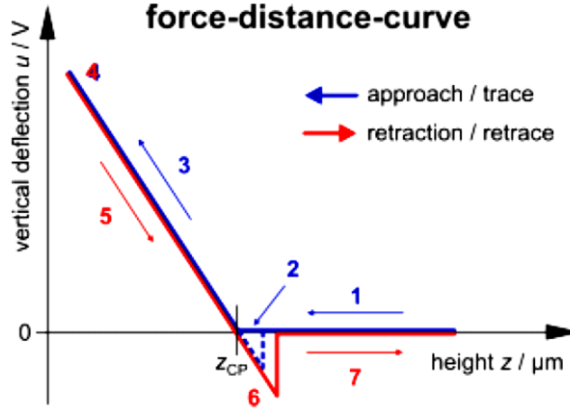
Görüntü kontrastı, uç ile numune arasındaki kuvvet, uç numune aralığının bir fonksiyonu olduğu için ortaya çıkar. Büyük mesafelerde çekici Van der Waals kuvvetleri meydana gelirken kısa mesafelerde uç ve numunenin elektron orbitallerinin üst üste binmesi nedeniyle ortaya çıkan itici kuvvetler kendini gösterir (Pauli itme). Bu kuvvetler Lennard-Jones potansiyeli ile tahmin edilebilir (Şekil 2.31).



Şekil 2.31 Mesafeye bağlı olarak uç ve numune arasındaki kuvvetler.

AFM birçok modu ile topografi hakkında bilgi sağladığı gibi birkaç çeşit spektroskopi ve manyetik özellikler hakkında da bilgi verir. Bu spektroskopilerden biri konsolun, temas edinceye kadar numuneye doğru hareket ettirildiği ve daha sonra tekrar

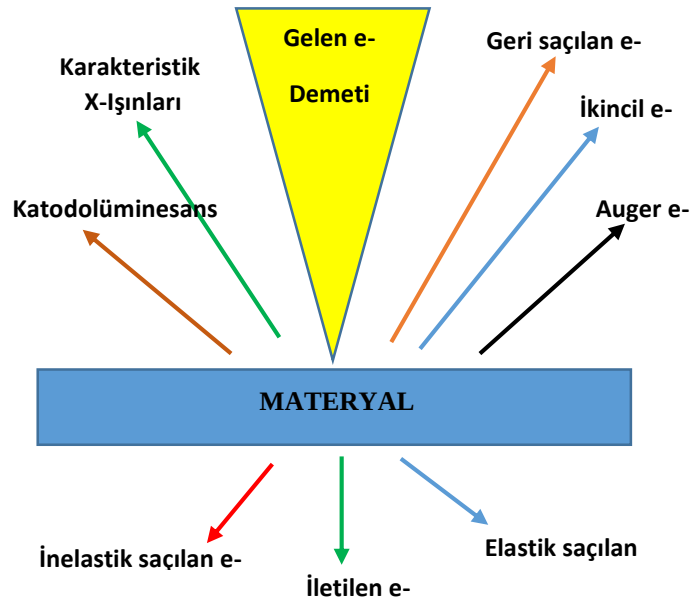
geri çekildiği, bu esnada da uç ile numune arasındaki etkileşimin ölçüldüğü "kuvvet spektroskopisidir" (Şekil 2.32). Bu kuvvet-mesafe eğrileri, uç-yüzey etkileşiminin bir haritasını oluşturmak için farklı yerlerde ölçülebilir. Kuvvet-mesafe eğrilerinin histerezisinden adezyon kuvveti ve fiziksel iş hakkında bilgi edinilebilir.



Şekil 2.32 Kuvvet-mesafe eğrisinin şematik gösterimi.

2.10.4 Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX)

Elektron demeti-madde etkileşimi, numune hakkında farklı bilgiler taşıyan çeşitli sinyaller üretir (Şekil 2.33). Örneğin, geri saçılmış elektronlar, atom numaraları farkı hakkında bilgi taşıyan görüntüler üretir; ikincil elektronlar topografik bilgi verir; katodoluminesans, elektronik yapı ve malzemelerin kimyasal bileşimi hakkında bilgi verebilir; İletilen elektronlar, numunenin içyapısını ve kristalografisini tanımlayabilir. SEM'lerde yaygın olarak kullanılan bir başka sinyal tipi X ışınlarıdır.



Şekil 2.33 Elektron-madde etkileşiminin farklı ürünleri.

EDX, bir numunenin elementel analizi veya kimyasal karakterizasyonu için kullanılan analitik bir tekniktir. X-ışını uyarma kaynakları ile numunenin etkileşimlerine dayanır. Karakterizasyon yetenekleri büyük ölçüde her bir elementin elektromanyetik yayma spektrumunda farklı pik seti sağlayan benzersiz bir atomik yapıya sahip olması temel prensibinden kaynaklanmaktadır. Numuneden karakteristik X-ışınlarının salınımını sağlamak için, elektronlar, protonlar gibi yüksek enerjili yüklü parçacıklar veya X-ışını incelenen numuneye gönderilir. Denge durumunda numune içindeki bir atom ayırık enerji seviyelerinde elektronlar veya çekirdeğe bağlı elektron kabukları içerir. Gelen ışın, iç kabuğun içindeki bir elektronu uyararak, kabuğundan çıkarır ve bir elektron deliği (hol) oluşturur. Daha sonra daha yüksek enerjili bir kabuktan gelen bir elektron bu değişimi doldurur ve daha yüksek enerjili kabuk ile daha düşük enerji kabuğu arasındaki enerji farkı kadar enerjiye sahip bir X ışını yayılır. Bir numuneden yayılan X ışınlarının sayısı ve enerjisi, bir enerji dağılımlı spektrometre ile ölçülebilir. X ışınlarının enerjileri, iki kabuk arasındaki enerji farkına ve elementin atomik yapısına bağlı olduğundan, EDX, numunenin elementer kompozisyonunun ölçülmesine izin verir. Bu açıdan X ışınları her bir elementin “parmak izidir” ve bir numunede bulunan elementlerin tipini tanımlamak için kullanılabilir.

EDX sisteminin dört ana bileşeni uyarma kaynağı (elektron ışını veya x-ışını), X-ışını detektörü, darbe işlemcisi ve analizördür. Elektron ışını uyarımı, elektron mikroskoplarında, taramalı elektron mikroskoplarında (SEM) ve taramalı transmisyon elektron mikroskoplarında (STEM) kullanılır. X-ışını uyarma, X-ışını floresan (XRF) spektrometrelerinde kullanılır. X ışını enerjisini voltaj sinyallerine dönüştürmek için bir detektör kullanılır, bu bilgi sinyalleri ölçen ve bunları veri görüntüleme ve analiz için bir analizöre gönderen bir atım işlemcisine gönderilir. Sıvı azot ile kriyojenik sıcaklıklara soğutulmuş Si (Li) detektörü kullanılan en yaygın detektördür. Yeni sistemler genellikle peltier soğutma sistemli silikon sapma detektörleriyle (SDD) donatılmıştır. EDX analizi ile üretilen veriler, numunede bulunan tüm farklı elementlere karşılık gelen piklere sahip spektrumlardan oluşur. Ayrıca, EDX nitel (element türünü gösteren) ve nicel (numunenin her elementinin konsantrasyonunun yüzdesi) analizi için kullanılabilir. Çoğu SEM'de, özel yazılım piklerin otomatik olarak tanımlanmasına ve tespit edilen her bir elementin atom yüzdesinin hesaplanmasına olanak tanır. EDX tekniğinin bir diğer avantajı, çok az veya hiç numune hazırlama gerektirmeyen, tahribatsız bir karakterizasyon tekniği olmasıdır.

3. MATERİYAL VE YÖNTEM

Çalışmamızda mikroskop camları üzerinde sol-jel daldırma yöntemiyle çok sayıda VOx ince filmleri büyütülmüştür. Bu filmler değişik sıcaklıklarda ısısal olarak tavlannmıştır. Tavlannmış olan VOx ince filmlerin optiksel geçirgenlikleri ve soğurma katsayıları; UV ve VIS yöntemleriyle belirlenmiştir. Elektriksel iletkenlikleri ise sıcaklığa bağlı akım-gerilim yöntemiyle ölçülmüştür. AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) ölçümleriyle ince filmlerin yüzey yapıları incelenmiş ve XRD (X-Işını Kırınımı) ölçümleriyle de elde edilen filmlerin polikristal yönlenmeleri belirlenmiştir. Bu ölçümler sonucunda kaliteli ve en uygun VOx filminin elde edildiği koşullar belirlenmiştir.

Belirlenmiş olan en kaliteli ve en uygun VOx filminin elde edildiği koşullar p-Si yüzeyleri üzerine uygulanmıştır. Bu VOx/p-Si numuneler özel tutuculara yerleştirilerek 10^{-7} Torr Vakumda "Vacuum coating" cihazında VO_x ve p-Si yüzeyleri Al kaplanmış ve yarıiletken diyot özelliği gösteren Al/VOx/p-Si/Al MOS yapıları elde edilmiştir.

Elde edilen bu yapıların akım-gerilim (I-V) belirtkenleri değişik sıcaklıklarda ölçülmüş ve bu belirtkenlerden doğrulma faktörü, ideallik faktörü ve ara yüzeydeki durum yoğunluğu tayin edilmiştir. Bu yapıların kapasite-gerilim-frekans (C-V-f) belirtkenleri de değişik sıcaklıklarda ölçülmüş ve bu belirtken eğrilerden difüzyon engel yüksekliği ve ara yüzey durum yoğunlukları tayin edilmiştir. Bulunan bu sonuçlar VOx filminin hazırlama koşulları, AFM'den alınan yüzey görüntüleri ve x-ışınları kırınım deseninden gözlenen yönlenmeler yardımıyla yorumlanmıştır.

3.1. p-Si ve Cam Tabanların Temizlenmesi

İnce film oluşturulurken kaplama yapılacak tabanların temizliği son derece önemlidir. Çalışmamızda cam tabanların temizliği için öncelikle taban deiyonize su ile yıkanmış daha sonra sırasıyla 10 dakika deiyonize suda ultrasonik temizleme, 10 dakika aseton içerisinde ultrasonik temizleme, 10 dakika deiyonize suda ikinci ultrasonik temizleme, azot ile kurutma, 5 dakika 400 derecelik fırında bekletme ve azot ile temizleme işlemleri yapılmıştır.

Diğer taraftan 300 µm kalınlığındaki silisyum tek kristal dilimi (p-Si)(Wafer) 3x4 mm² boyutlarında parçalara kesilmiştir. Bu p-Si parçaların yüzeyleri RCA yöntemle temizlenmiştir. Bu yöntem organik, oksit ve iyonik temizleme olmak üzere üç aşamadan

oluşur. Organik temizleme aşamasında NH_4OH , H_2O_2 ve deiyonize suyun 1:1:5 oranında karıştırılması ile elde edilen çözücüde Si taban 10 dakika bekletilir. Bekletme süresince çözücü sıcaklığı ortalama $65\text{ }^\circ\text{C}$ 'de tutulur. Sonrasında taban deiyonize su ile durulanır. Oksit temizleme aşamasında HF ve deiyonize su 1:10 oranında karıştırılarak elde edilen çözücüde Si taban 30 saniye bekletilir. Sonrasında taban deiyonize su ile durulanır. İyonik temizlemede ise HCl, H_2O_2 ve deiyonize su 1:1:6 oranında karıştırılarak elde edilen çözücüde Si taban 10 dakika bekletilir. Bekletme süresince çözücü $65\text{ }^\circ\text{C}$ ortalama sıcaklıkta tutulur. Sonrasında taban deiyonize su ile durulanır. Son olarak taban azot ortamında kurutulur.

3.2. VO_x Çözeltisinin Hazırlanması

Çalışmamızda ideal film oluşumunun tespit edilebilmesi için p-Si taban ve cam üzerine 41 farklı film oluşturulmuştur. Bu filmlerden seçilen 6 tanesinin (Çizelge 3.1) x-ışını kırınımı ölçümleri yapılmıştır. Filmler oluşturulurken 10 farklı çözelti bileşimi denenmiştir. Çözeltiler oluşturulurken HNO_3 , H_2O_2 , HCl, distile su çözücü olarak kullanılmış ve bu çözeltiler farklı çözünme sıcaklığı ve farklı oranlarda elde edilmiştir. Çalışmamızda ön madde olarak Sigma-Aldrich firmasının ürettiği 1314-62-1 CAS numaralı toz halindeki V_2O_5 ürünü kullanılmıştır. Bu ürünün başlıca özellikleri şunlardır:

Formül ağırlığı: 181,88 g/mol

Renk: Koyu turuncu

Safılık: %99

Erime noktası: $690\text{ }^\circ\text{C}$

Yoğunluk: 3,35 g/mL ($25\text{ }^\circ\text{C}$ 'de)

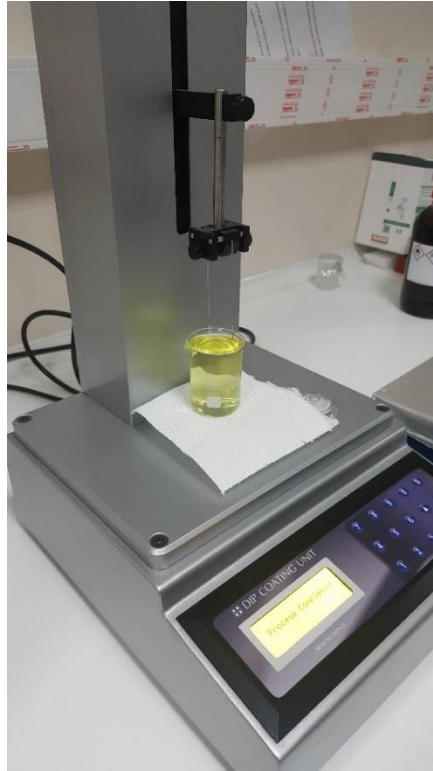
Çözeltiler $70\text{ }^\circ\text{C}$ derecede Çizelge 3.1'de gösterilen oranlarda behere konulan maddelerin manyetik karıştırıcı ile 1 saat karıştırılması ile hazırlanmıştır. Ancak H_2O_2 eklenirken sıcaklık $30\text{ }^\circ\text{C}$ derecelere kadar düşürülmüştür. Çözeltilerin karıştırılma hızı ise 300-350 rpm olarak uygulanmıştır. XRD ölçümleri alınan filmlerde izlenen prosedür aşağıdaki Çizelge 3.1'deki gibidir.

Çizelge 3.1: Filmlerin eldesinde kullanılan çözeltilerin özellikleri ve son tavlama sıcaklıkları.

Film No	Alt Tabaka	V ₂ O ₅ (g)	HNO ₃ (mL)	H ₂ O ₂ (mL)	HCl (mL)	Etilen Glikol (mL)	H ₂ O (mL)	Tavlama Sıcaklığı (°C)
VOC1	Cam	0,8	0	0	10	0	60	300
VOC2	Cam	0,8	0	0	10	0	60	400
VOC3	Cam	0,8	0	0	10	0	60	500
VOC4	Cam	1,82	25	1	0	36	10	400
VOC5	Cam	1,82	25	1	0	0	10	500
VOS1	p-Si	1,82	25	1	0	0	10	500

3.3. İnce Filmlerin Kaplanması

Filmlerin eldesinde daldırma yöntemi uygulanmıştır. Daldırma işlemi için Holmarc marka H0-TH-01 model daldırma ünitesi kullanılmıştır. Daldırma ve çıkarma hızı 600 µm/s olarak ayarlanmıştır. Daldırma süresi 10 saniye, kurutma süresi ise 5 saniye olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.1 Daldırma Ünitesi

Tüm tabanlar daldırma işleminden önce ultrasonik temizleyici yardımı ile distile su ve asetonla temizlenmiş ve azot gazı ile kurutulduktan, 300 derecedeki fırında 5 dakika bekletilerek temizlenmiştir.

Tabanlar hazırlanan çözeltilere 10 kez daldırılmış ve her daldırma işleminden sonra 300 derecede 5 dakika bekletilmiştir. Isıtma ve tavlama işlemleri için Protherm marka fırın kullanılmıştır. Filmler son olarak tabloda belirtilen sıcaklıklarda 1 saatlik son tavlama işlemine tabi tutulmuşlardır.



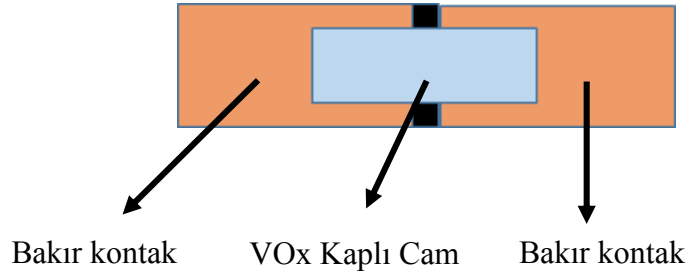
Şekil 3.2 Tavlama işlemi için kullanılan Protherm marka fırın

Çalışmamızda cam taban olarak mikroskop lamı kullanılmıştır. p-Si taban olarak ise wafer-works firmasına ait 1-1-1 yönelimine sahip 602-645 μm kalınlığında, 5-11 $\Omega\text{-cm}$ öz dirençli, bor katkılı p tipi silisyum tabaka kullanılmıştır.

Çalışmamızda filmlerin XRD, SEM, AFM, UV Spektroskopi, EDX, C-V ölçümleri yapılmıştır. XRD ölçümleri Rikagu-RadB ile $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$, $10 < 2\theta < 90^\circ$ aralığında 3° min^{-1} hızında 0.02° basamak büyüklüğünde yapılmıştır. SEM ve EDX ölçümleri EVO40-LEO (Carl Zeiss, UK) bilgisayar kontrollü dijital taramalı elektron mikroskobu ile yapılmıştır. Kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri Keithley 4200 SCS (Semiconductor Characterization System) ile yapılmıştır. AFM ölçümleri NanoScope 3D controller donanımlı Veeco Multi Mode AFM ile yapılmıştır.

3.4. Elektriksel Ölçümler İçin Cam Yüzeylerin Hazırlanması

Cam yüzeye kaplanmış filmlerin iletkenliklerini iki nokta yöntemiyle ölçmek için film kaplı camlar $0.5\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ boyutlarında kesilerek Şekil 3.3’de görüldüğü gibi metal tutucu plakalara yapıştırılmıştır.



Şekil 3.3 İki nokta yöntemi ile akım-gerilim ölçmek üzere hazırlanan örnek

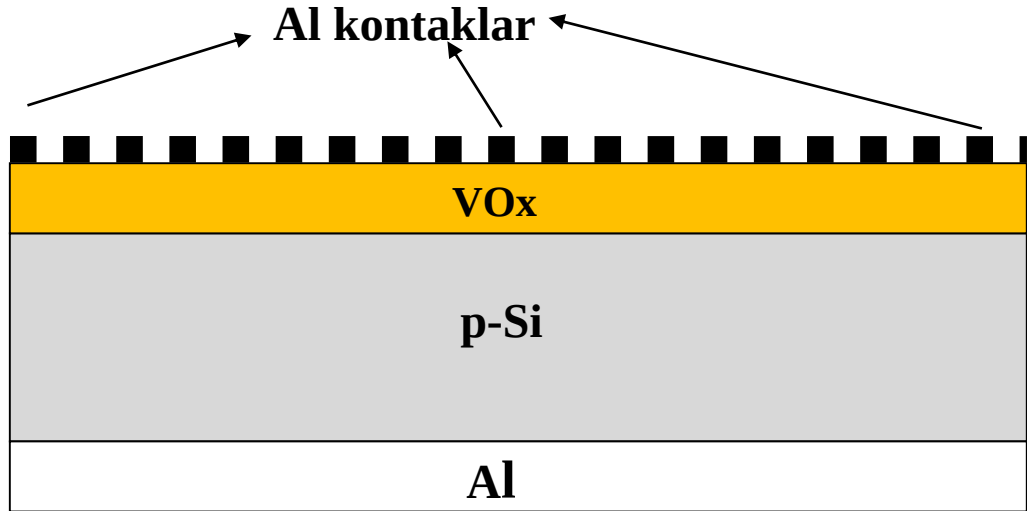
3.5. MOS Yapıların Oluşturulması

MOS yapılar elde etmek için HNO_3 ve H_2O_2 ile hazırlanan çözelti kullanılmıştır. p-Si tabanlar $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ ebadında kesilerek temizlenmiş ve daha sonra bir yüzeyine omik kontak oluşturma maksadıyla %99 saflıkta Al buharlaştırma yöntemiyle 10^{-7} torr basınçta kaplanmıştır. Bu işlem için Nanovak marka NVTH-350 model buharlaştırma sistemi kullanılmıştır. Al kaplama işleminden sonra taban 550°C derecede 4 dakika tavlansak Al atomlarının p-Si içine difüze olması sağlanmıştır.



Şekil 3.4 Nanovak NVTH-350 buharlaştırma sistemi.

Bir tarafı Al kaplanmış p-Si tabanlar daha sonra daldırma işlemi ile 10 kat VO_x kaplanmıştır. Bu esnada Al kaplı yüzeyin VO_x kaplanmaması için ısıya dayanıklı bant kullanılmıştır. 10 kat kaplanan film her katta 300 derecede tavllanmış ve son olarak 1 saat 500 derecede tavlansmıştır. Böylece elde edilen $\text{VO}_x/\text{p-Si}/\text{Al}$ yapılar doğrultucu kontak oluşturmak amacıyla film tekrar buharlaştırma cihazına konulmuş ve 1 mm çaplı delikli maske yardımıyla yüzeyi noktalı bir biçimde %99 saflıktaki Al ile kaplanmıştır. Bu işleminden sonra tavlama uygulanmamıştır. Böylece $\text{Al}/\text{VO}_x/\text{p-Si}/\text{Al}$ şeklinde MOS yapılar oluşturulmuştur.



Şekil 3.5 VO_x MOS yapısı

3.6. Optik-Yapısal ve Elektriksel Ölçümler

Elde edilen filmlerin optik, yapısal ve elektriksel özelliklerinin belirlenmesi için birçok ölçüm yapılmıştır. X-Işını kırınımı (XRD) ölçümleri ile elde edilen filmlerin yapısı, kristal yönelimleri, ortalama tanecik boyutu, kimyasal formülü tespit edilmiştir.

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ile p-Si üzerinde elde edilen filmin yapısal özellikleri belirlenmiştir. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) görüntüleri ile p-Si üzerine elde edilen filmin yüzey morfolojisi ve ortalama pürüzlülüğü gibi özellikleri belirlenmiştir. Cam taban üzerine elde edilen filmlerin mor ötesi-görünür bölgede ölçülen UV-VIS spektroskopisi ile filmin ışık geçirgenliği analiz edilmiş ve bundan yararlanılarak yansıma, soğurma, kırılma indisi, sanal kırılma indisi, Dielektrik sabiti ve sanal Dielektrik sabiti değerlerinin dalga boyuna göre değişim grafikleri elde edilmiştir. δ kalınlık ve T geçirgenlik olmak üzere soğurma katsayısı α ;

$$\alpha = \frac{\ln(T^{-1})}{\delta} \quad (3.1)$$

Şeklinde bulunur. Ölçülen dalga boyu, geçirgenlik değerlerini denklem yardımıyla hesaplanan soğurma katsayılarını kullanarak elde edilecek tabloda doğrudan

bant geçişi için $h\nu - (\alpha h\nu)^2$ grafiği çizilerek, bu grafiğin x eksenini kestiği nokta bant genişliği hesaplanmıştır.

p-Si zerine kaplanan filmler prob istasyonunda akım-gerilim (I-V) değerleri değişik sıcaklıklarda ölçülmüş ve bu değerlerden doğrulma faktörü, ideallik faktörü, engel yüksekliği ve ara yüzeydeki durum yoğunluğu belirlenmiştir. p-Si zerine kaplanmış VO_x filmlerin kapasite-gerilim-frekans(C-V-f) değerleri de değişik sıcaklıklarda ölçülmüş ve bu değerlerden elde edile grafiklerle difüzyon engel yüksekliği ve ara yüzey durum yoğunlukları belirlenmiştir.

Farklı sıcaklıklar için prob istasyonu kullanılarak p-Si taban üzerine kaplanan VO_x filmine ait akım-gerilim değerleri llmştir.

$$\sigma = \frac{I}{V} \frac{l}{\delta w} \quad (3.2)$$

Denklem 3.2 bir filme ait iletkenlik değerini verir. Bu denklemde I,V,l, δ ,w, σ sırasıyla akım, gerilim, film uzunluğu, film kalınlığı, film genişliği ve iletkenliktir.

Denklem yardımıyla her sıcaklık değeri için iletkenlik hesaplanmıştır.

$$\sigma = \sigma_0 e^{-E_a/kT} \quad (3.3)$$

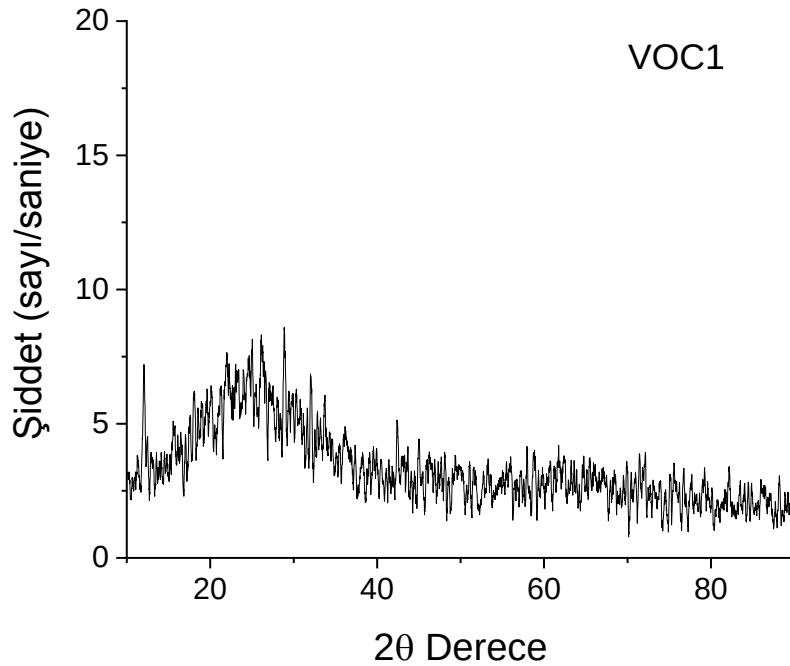
Denklem 3.3 iletkenliğin sıcaklığa bağlı olarak değişimini verir. Burada; E_a, k ve T sırasıyla aktivasyon enerjisi, Boltzmann sabiti ve mutlak sıcaklıktır. Hesaplanan iletkenlik değerleri Denklem 3.3 ile birlikte kullanılarak $\ln\sigma - 1/T$ grafiği çizildiğinde grafiğin eğimi filme ait aktivasyon enerjisini verir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Çalışmamıza ait X-Işını kırınımı (XRD), Taramalı elektron mikroskobu (SEM), Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), Mor ötesi-görünür bölge spektroskopisi (UV-VIS), Enerji ayrımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX) sonuçları ve bu sonuçlardan elde ettiğimiz çıkarımlar aşağıdaki gibidir.

4.1. X-Işını Kırınımı (XRD) Sonuçları

V_2O_5 tozu ile seyreltik HCl çözeltisinden elde edilen çözelti ile cam üzerine kaplanan VOC1 nolu numunemizin XRD pikleri Şekil 4.1’de görülmektedir.

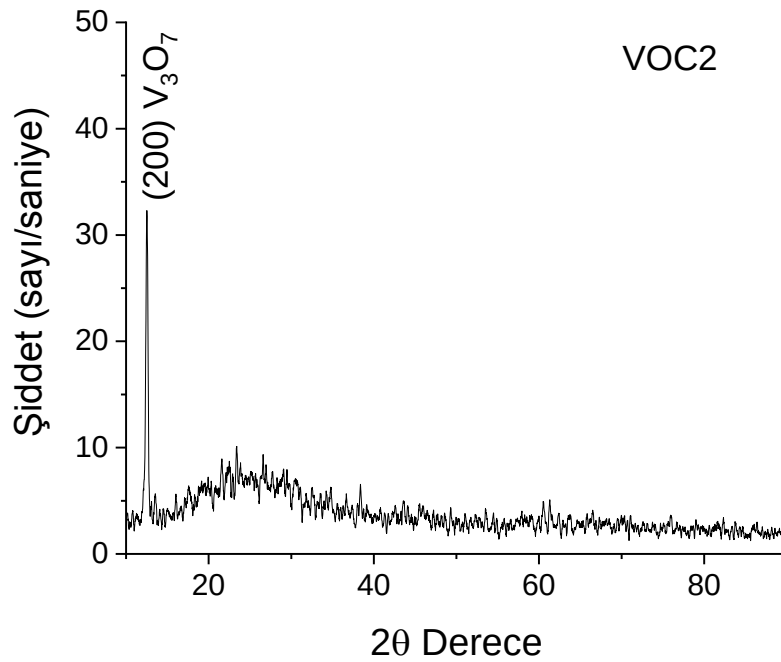


Şekil 4.1 VOC1 nolu numuneye ait XRD sonuçları.

Bu film cam üzerine 300 derece ara tavlama yapılarak 10 kat olarak hazırlanmıştır. Film 300 derecede son tavlama tabi tutulmuştur. XRD sonucundan filmin iyi derecede kristallenmediği ve amorf bir yapı gösterdiği görülmektedir. Bu durum 300 derece sıcaklığının iyi bir kristallenmenin gerçekleşeceği optimum koşulları sağlayacak enerji sağlayamadığı söylenebilir. XRD sonuçlarına baktığımızda $2\theta \approx 27^\circ$ mertebesinde bir

yükselme dikkati çekmektedir. Ancak gözle görülebilen bir pik oluşmamıştır. Bu durum yapının amorf olduğuna işarettir. Benzer bir durumlara literatürde de rastlamak mümkündür. Literatürdeki çalışmalarda vanadyum oksidin 380° sonraki sıcaklıklarda kristallendiği bulunmuştur (Özer, 1997).

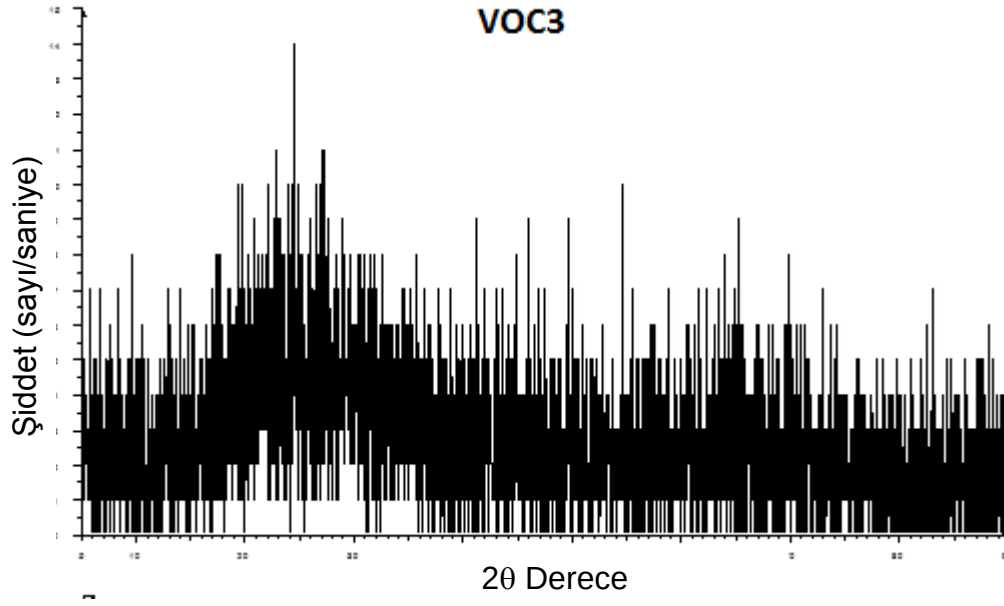
V₂O₅ tozu ile seyreltik HCl çözeltisinden elde edilen çözelti ile cam üzerine kaplanan VOC2 nolu numunemizin XRD pikleri Şekil 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.2 VOC2 nolu numuneye ait XRD sonuçları.

Bu film cam üzerine 300 derece ara tavlama yapılarak 10 kat olarak hazırlanmıştır. Film 400 derecede son tavlamaya tabi tutulmuştur. 12,5 derecede pik veren numunenin iyi derecede kristallendiği görülmektedir. Literatür araştırmalarım sonucunda bu pikin V₃O₇ yapısının 200 düzlemine karşılık geldiği görülmektedir (Yifu ve ark., 2011).

V₂O₅ tozu ile seyreltik HCl çözeltisinden elde edilen çözelti ile cam üzerine kaplanan VOC3 nolu numunemizin XRD pikleri Şekil 4.3’de görülmektedir.

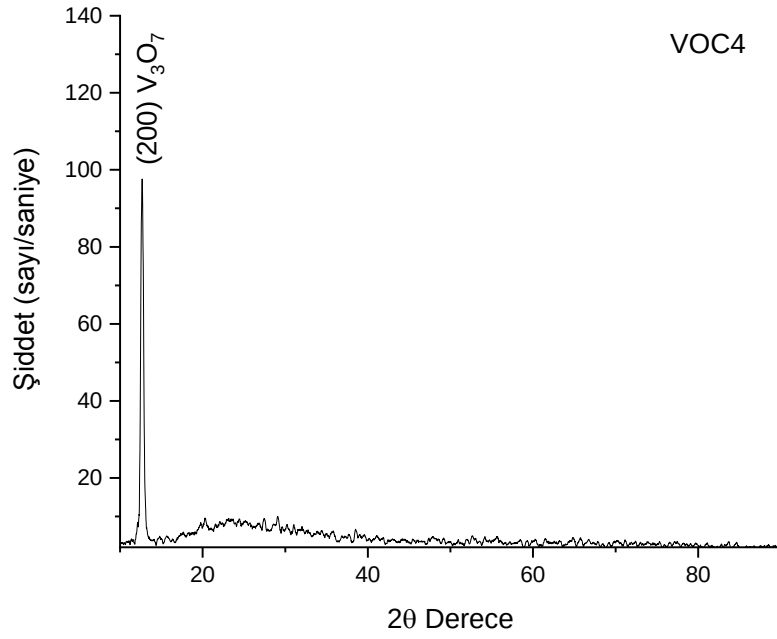


Şekil 4.3 VOC3 nolu numuneye ait XRD sonuçları

Bu film cam üzerine 300 derece ara tavlama yapılarak 10 kat olarak hazırlanmıştır. Film 500 derecede son tavlamaya tabi tutulmuştur. XRD sonucundan filmin iyi derecede kristallenmediği ve amorf bir yapı gösterdiği görülmektedir.

Seyreltik HCl çözeltisi ile elde edilen filmlerde 300 derece son tavlama sıcaklığında amorf yapı gözlenmiş, 400 derece tavlama sıcaklığında ise V_3O_7 200 düzlemine ait pik gözlenmiştir. Ancak 500 derece tavlama sıcaklığında daha iyi kristallenme beklerken kristallenmenin bozulduğu görülmüştür. Bunun neden taneciklere verilen yüksek kinetik enerjinin kristalleşmeyi engellemesi olabilir. Yüksek sıcaklıklarda cam tabandaki mineraller vanadyum oksit içine difüze olmaları da muhtemeldir.

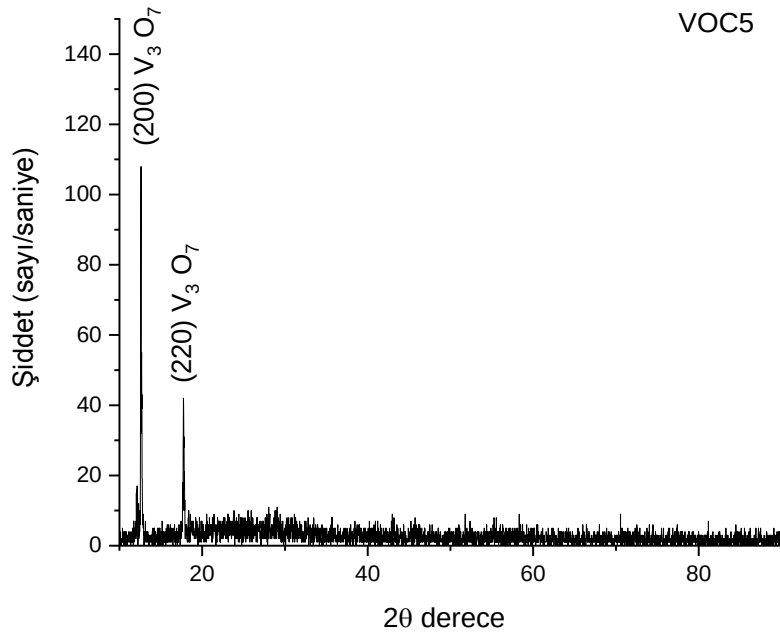
V_2O_5 tozu, seyreltik HNO_3 ve az miktarda H_2O_2 ile elde edilen çözelti ile cam üzerine kaplanan VOC4 nolu numunemizin XRD pikleri Şekil 4.4’de görülmektedir.



Şekil 4.4 VOC4 nolu numuneye ait XRD sonuçları.

Bu film cam üzerine 300 derece ara tavlama yapılarak 10 kat olarak hazırlanmıştır. Film 400 derecede son tavlamaya tabi tutulmuştur. 12,5 derecede pik veren numunenin iyi derecede kristallendiği görülmektedir. Bu pikin V_3O_7 yapısının 200 düzlemine karşılık geldiği görülmektedir (Yifu ve ark., 2011).

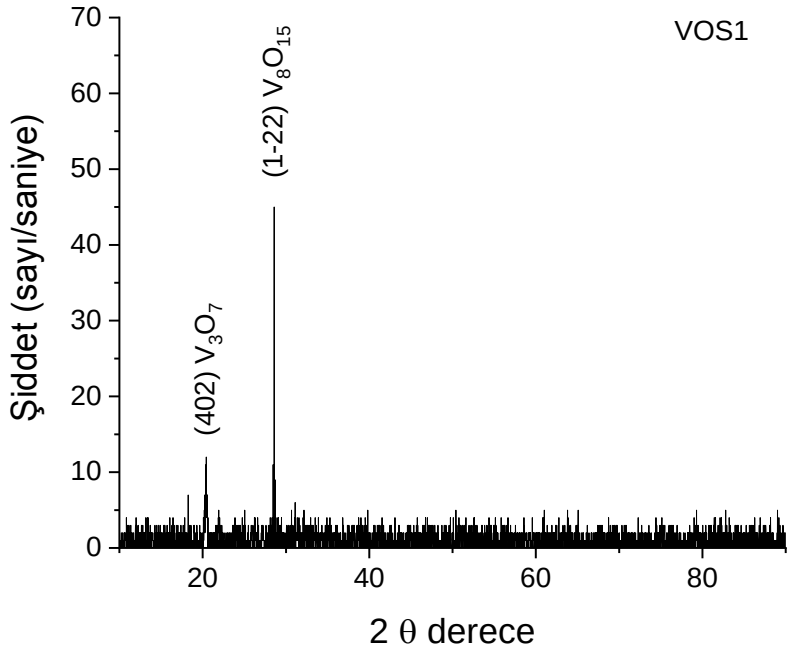
V_2O_5 tozu, seyreltik HNO_3 ve az miktarda H_2O_2 ile elde edilen çözelti ile cam üzerine kaplanan VOC5 nolu numunemizin XRD pikleri Şekil 4.5’de görülmektedir.



Şekil 4.5 VOC5 nolu numuneye ait XRD sonuçları.

Bu film cam üzerine 300 derece ara tavlama yapılarak 10 kat olarak hazırlanmıştır. Film 500 derecede son tavlama tabi tutulmuştur. 12,5 derece ve 18 derecede pik veren numunenin iyi derecede kristallendiği görülmektedir. 12,5 derecedeki pikin V_3O_7 yapısının (200) düzlemine karşılık geldiği, 18 derecedeki pikin ise V_3O_7 (220) düzlemine karşılık geldiği görülmektedir (Yifu ve ark., 2011). 18 derecedeki pikin cam altlıktan gelen sodyumların etkisiyle oluşan $Na(V_2O_5)$ yapısına ait olduğu da söylenebilir (Hanlon ve ark., 2003). Benzer bir sonuç literatürdeki çalışmalarda da görülmektedir (Yılmaz, 2017).

V_2O_5 tozu, seyreltik HNO_3 ve az miktarda H_2O_2 ile elde edilen çözelti ile p-Si üzerine kaplanan VOS1 nolu numunemizin XRD pikleri Şekil 4.6'da görülmektedir.



Şekil 4.6 VOS1 nolu numuneye ait XRD sonuçları.

Bu film p-Si üzerine 300 derece ara tavlama yapılarak 10 kat olarak hazırlanmıştır. Film 500 derecede son tavlamaya tabi tutulmuştur. Film üzerinde 28,5 derecede pik görülmektedir. Film iyi derecede kristalleşmiştir. Elde edilen en büyük pik V_8O_{15} (1-22) düzlemine aittir (Pakma ve ark., 2017). Ayrıca bu film üzerinde nispeten daha düşük pik yüksekliğinde V_3O_7 (402) düzlemine de rastlanmıştır.

p-Si üzerine yapılan filmde V_8O_{15} pikleri yüksek oranda görülürken, aynı yöntemle cam üzerine yapılan filmlerde V_3O_7 pikleri görülmektedir. Bunun nedeni cam üzerine kaplanan filmlerde fiziksel bağlanma gerçekleşirken, p-Si taban üzerine kaplanan filmlerde oksijen ile bağ kuran VOx filmlerinin kimyasal bağlanma göstermesi olabilir (Pakma ve ark., 2017). Farklı yapılar oluşmasının nedeni farklı tabanlar üzerinde büyütülen kristal yapıların tabanların farklı geometri ve yapılarından etkilenmesi de olabilir.

Seyreltilmiş HNO_3 ile cam taban üzerine hazırlanan filmlerde tavlama sıcaklığı 400 derece iken V_3O_7 (200) düzlemine ait pik gözlenirken, 500 derece tavlama sıcaklığında V_3O_7 (200) düzlemi ve V_3O_7 (220) düzlemlerine ait pikler gözlenmiştir.

Daha önce yapılan çalışmalarda V_2O_5 için 20.2, 21.5 ve 41 derecelerde sırasıyla (001), (101) ve (002) düzlemleri için (Beke ve ark., 2009) , V_6O_{13} için 15, 25.5, 27, 30,33,46, 49.5 ve 60 derecelerde sırasıyla (200), (100), (003), (-401), (310), (-601), (020) ve (-711) düzlemleri için (Huang ve ark., 2011), VO_2 için ise 24.5,37,38, 40,44 ve 83.5 derecelerde sırasıyla (011), (020), (-112),(012) ve (004) düzlemleri için kırınım pikleri gözlemlendiği rapor edilmiştir (Cui ve ark., 1998; Özdemir, 2014).

Literatürdeki bazı çalışmalarda uygun atmosfer koşullarında SiO_2 taban üzerine VO_x filmler büyütmüş ve çalışmamızdakine benzer şekilde V_3O_7 yapıları belirlemiştir. Ayrıca çalışmada film büyütülürken ortamdaki oksijen oranı arttıkça yapılan da oksijen oranının giderek arttığı V_6O_{13} , V_3O_7 , V_2O_5 yapılar belirlenmiştir (Yavru, 2015).

Kristalleşme gösteren bütün numunelerimize ait gözlenen pik açıları, referans pik açıları, I/I_0 şiddetleri, referans pdf noları ve yapılar Çizelge 4.1'deki gibidir.

Çizelge 4.1: Elde edilen filmlere ait XRD yapıları

Numune no	Altlık	Formül	(hkl)	2 θ (Gözlenen)	2 θ (PDF)	I/I ₀	PDF No	Yapı
VOC2	Cam	V_3O_7	(200)	12,571	12,627	100	1- 1591	Hücre merkezli tetragonal
VOC4	Cam	V_3O_7	(200)	12,754	12,627	100	71- 1591	Hücre merkezli tetragonal
VOC5	Cam	V_3O_7	(200)	12,590	12,627	100	71- 1591	Hücre merkezli tetragonal
		V_3O_7	(220)	17,806	17,893	39,2		
VOS1	p-Si	V_8O_{15}	(1-22)	28,678	28,871	100	18- 1448	Triclinic
		V_3O_7	(402)	20,396	19,668	27,2	20- 1378	Monoclinic

Kristallenme gösteren numunelerimiz için hesaplanan ortalama tanecik boyutları Çizelge 4.2'deki gibidir.

Çizelgeden anlaşılacağı üzere V_2O_5 tozunu çözücü madde olarak HCl kullandığımızda tanecik boyutu daha büyük olmuştur. HNO_3 ile cam üzerine yapılan

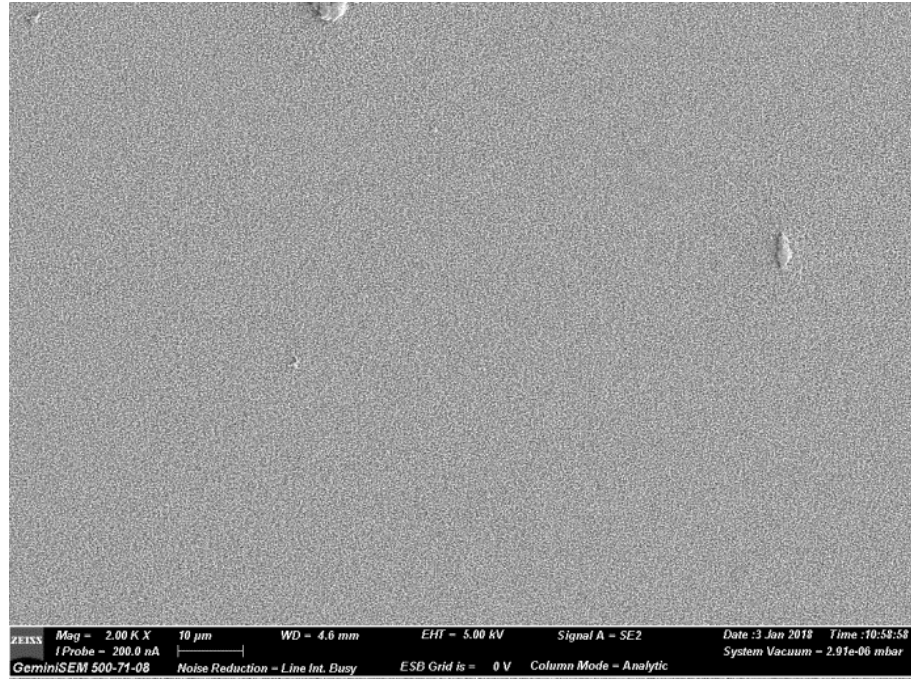
filmlerde ise tavlama sıcaklığı artırıldığında tanecik boyutunun arttığı gözlenmektedir. Aynı çözelti ile p-Si üzerine yapılan filmlerde ise diğer filmlere nazaran oldukça büyük boyutlu tanecikler belirlenmiştir.

Çizelge 4.2: Elde edilen filmlerin tanecik boyutları.

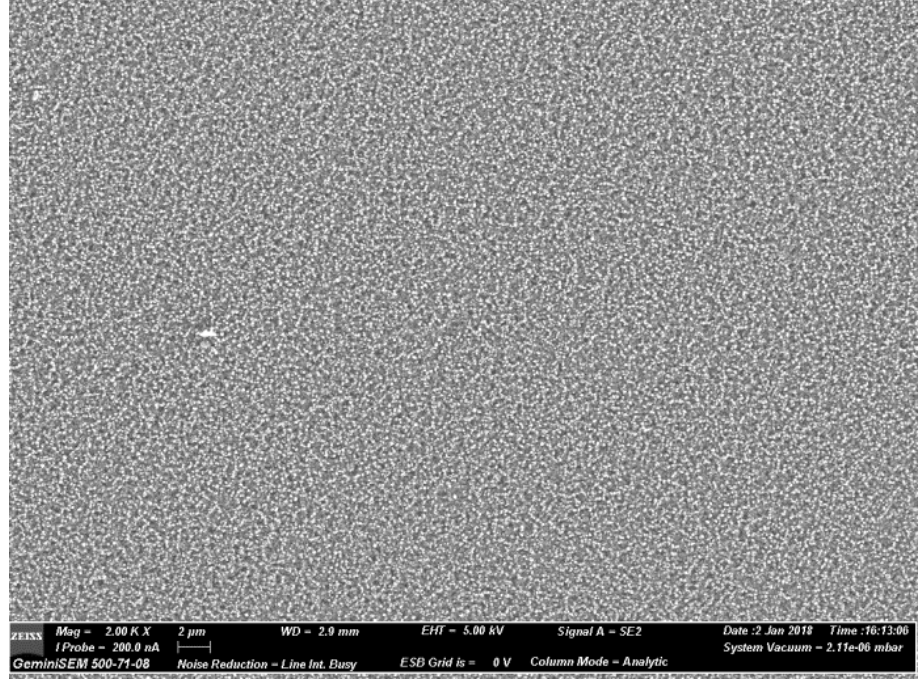
Numune No	Ana Çözücü	Taban	Son Tavlama Sıcaklığı	Yapı	D (nm)	δ (line/nm)	N (1/nm ²)
VOC2	HCl	Cam	400	V ₃ O ₇ (200)	4,44	0,506	5,00
VOC4	HNO ₃	Cam	400	V ₃ O ₇ (200)	3,45	0,838	10,67
VOC5	HNO ₃	Cam	500	V ₃ O ₇ (200)-(220)	20,88	2,30x10 ⁻²	4,83x10 ⁻²
VOS1	HNO ₃	p-Si	500	V ₈ O ₁₅ (1-22) V ₃ O ₇ (402)	280	1,21x10 ⁻⁴	1,85x10 ⁻⁵

4.2. AFM ve SEM Sonuçları

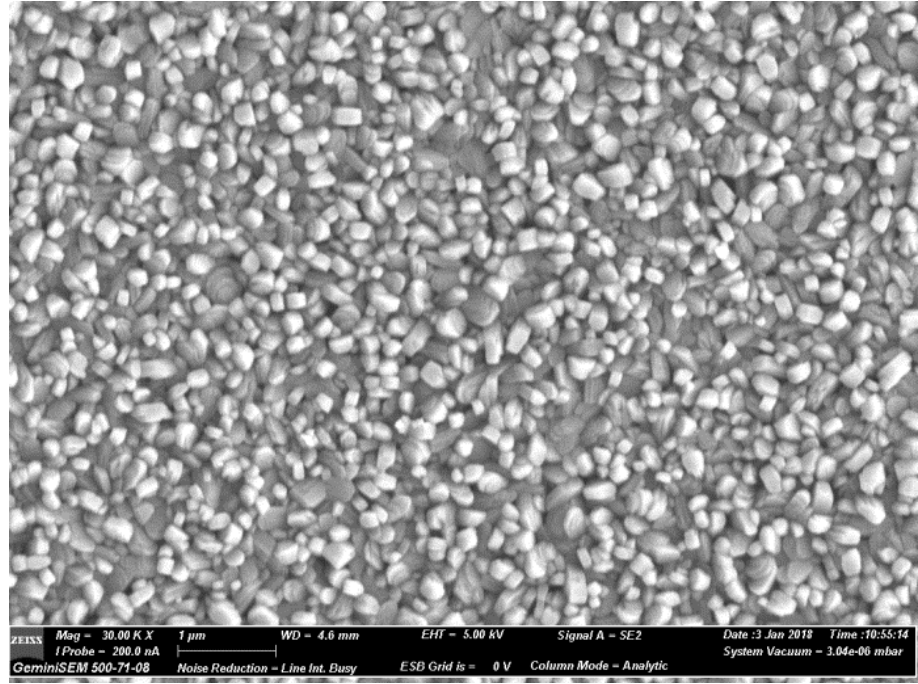
Filmlerin yüzey morfolojileri ve mikro yapılarını incelemek amacıyla SEM (Taramalı elektron mikroskobu) fotoğrafları çekilmiştir. V₂O₅ tozu, seyreltik HNO₃ ve az miktarda H₂O₂ ile elde edilen çözelti ile p-Si üzerine kaplanan VOS1 nolu numunemizin SEM sonuçları aşağıdaki gibidir.



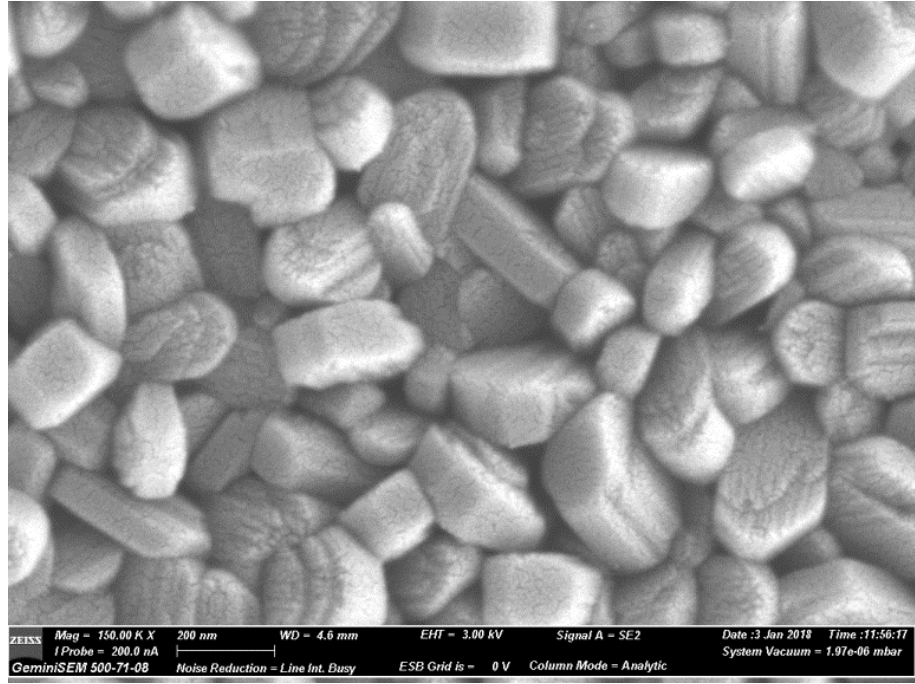
Şekil 4.7 p-Si üzerine V₈O₁₅ film 135x92 µm SEM görüntüsü.



Şekil 4.8 p-Si üzerine V_8O_{15} film 55x37 μm SEM görüntüsü.



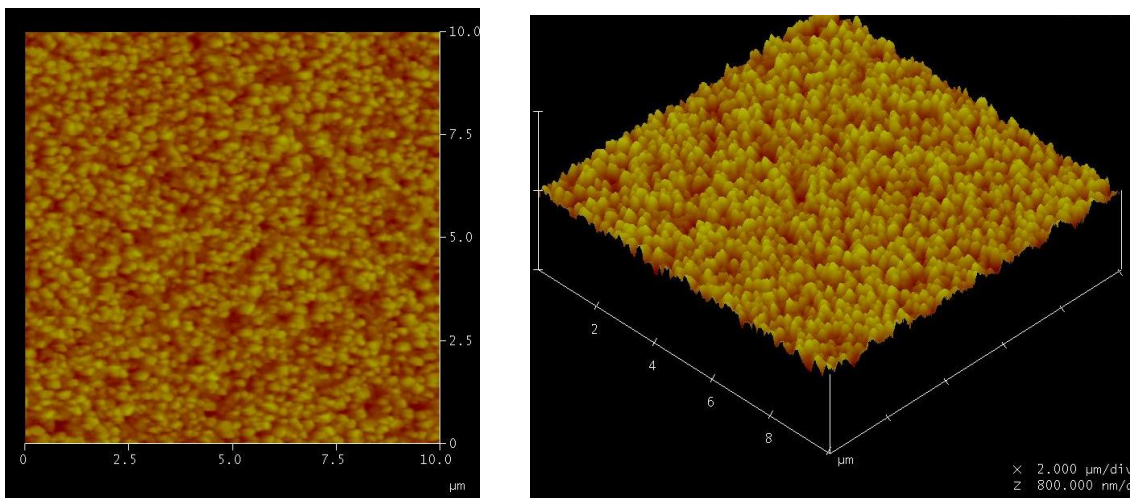
Şekil 4.9 p-Si üzerine V_8O_{15} film 9x6 μm SEM görüntüsü.



Şekil 4.10 p-Si üzerine V_8O_{15} film 1,85x1,27 μm SEM görüntüsü.

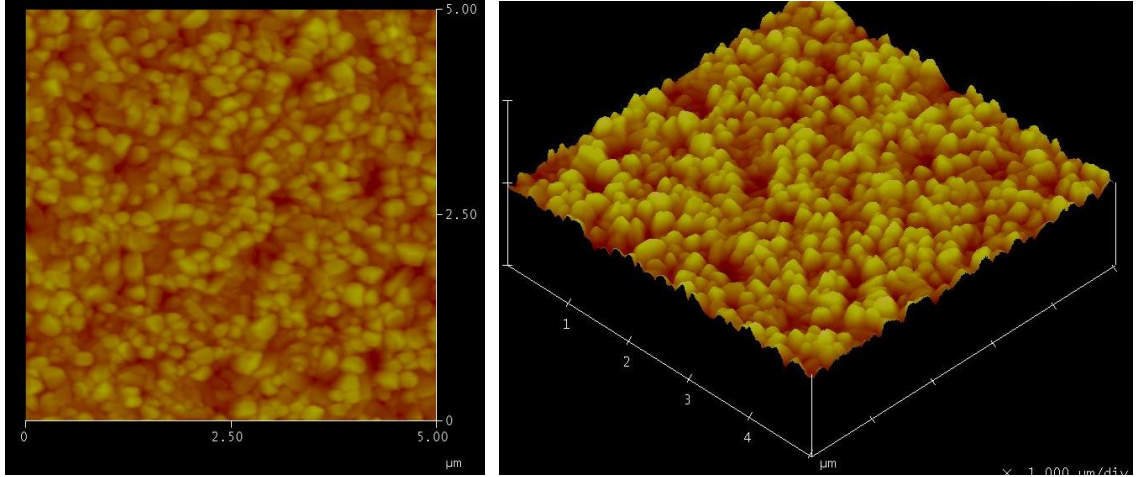
SEM fotoğrafları incelendiğinde taneciklerin yüzeye düzgün dağıldığı ve yüzeyde çatlamların olmadığı gözükmemektedir. Yüzeyde çatlamlar olmamakla birlikte, taneciklerin kendilerinde çatlaklı yapılar görülmektedir. Tanecikler arasında büyük boşluklar bulunmadığı görülmektedir.

p-Si taban üzerine V_2O_5 tozunun HNO_3 'te çözünmesi ile elde edilen çözeltiye daldırarak 10 kat kaplanan ve 500 derecede tavlanan VOS1 nolu filmin yüzey morfolojisi AFM (Atomik kuvvet mikroskobu) ile belirlenmiştir.



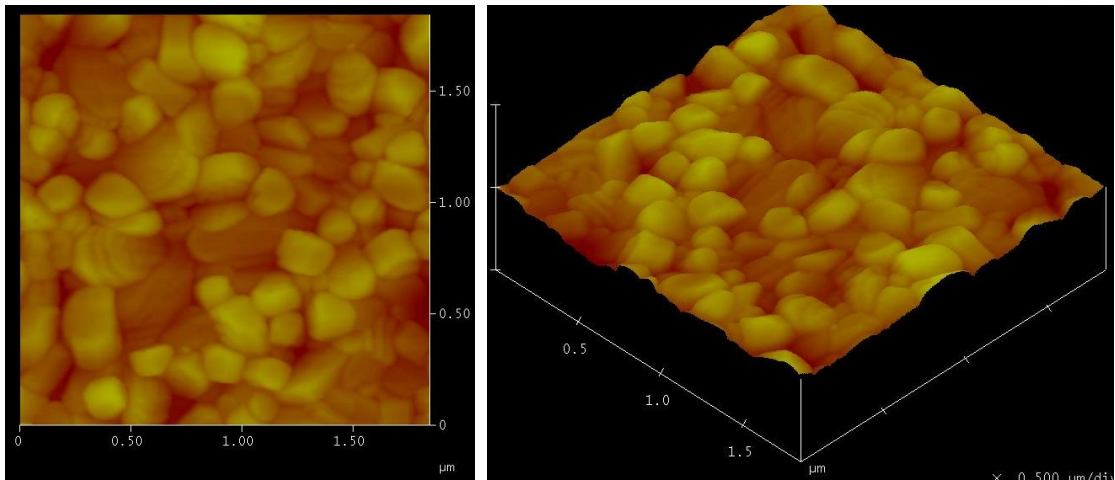
Şekil 4.11 p-Si üzerine V_8O_{15} filmin 10 μm kesitinin 2 boyutlu ve 3 boyutlu AFM görüntüleri.

Şekil 4.11'deki 10 μm kesitli AFM görüntülerinden filmin yüzey yükseklik değişiminin kök ortalama değeri $R_{\text{ms}}(R_q)=39.704 \text{ nm}$, yüzey mutlak yükseklik değişiminin aritmetik ortalama değeri $R_a=32,859 \text{ nm}$, Maksimum yükseklik R_{max} değeri ise 260.72 nm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.12 p-Si üzerine V_8O_{15} filmin 5 μm kesitinin 2 boyutlu ve 3 boyutlu AFM görüntüleri.

Şekil 4.12'deki 5 μm kesitlik AFM görüntüsünden filmin yüzey yükseklik değişiminin kök ortalama değeri $R_{\text{ms}}(R_q)=41.344 \text{ nm}$, yüzey mutlak yükseklik değişiminin aritmetik ortalama değeri $R_a=33.944 \text{ nm}$, Maksimum yükseklik R_{max} değeri ise 273,22 nm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.13 p-Si üzerine V_8O_{15} filmin 1.843 μm kesitinin 2 boyutlu ve 3 boyutlu AFM görüntüleri.

Şekil 4.13'deki yaklaşık 2 μm 'lik AFM görüntüsünden filmin yüzey yükseklik değişiminin kök ortalama değeri $R_{\text{ms}}(R_q) = 37.939 \text{ nm}$, yüzey mutlak yükseklik değişiminin aritmetik ortalama değeri $R_a = 30.988 \text{ nm}$, Maksimum yükseklik R_{max} değeri ise 241.65 nm olarak belirlenmiştir.

AFM analizi sonucu VOS1 nolu filme ait yüzey morfolojisi sonuçları Çizelge 4.3'deki gibidir.

Çizelge 4.3 VOS1 nolu filme ait yüzey morfolojisi sonuçları

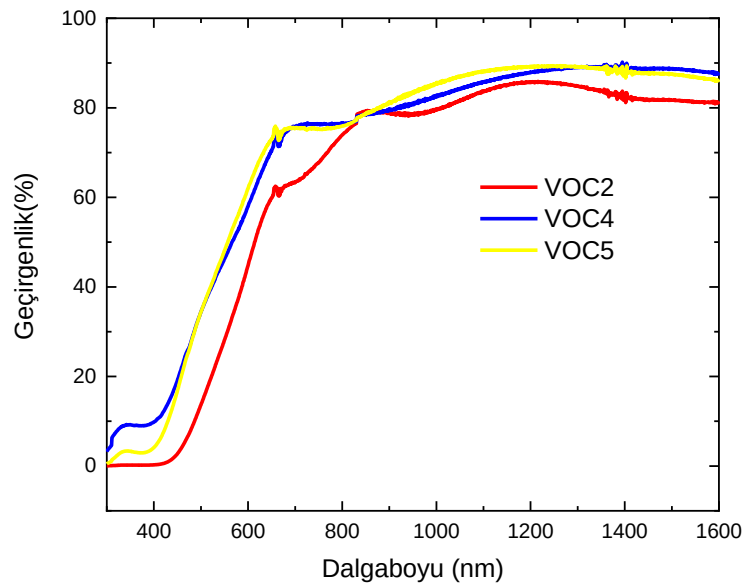
Tarama alanı μm^2	Yüzey Yükseklik Değişiminin Kök Ortalaması $R_{\text{ms}}(R_q) \text{ (nm)}$	Yüzey Mutlak Yükseklik Değişiminin Aritmetik Ortalaması $R_a \text{ (nm)}$	Maksimum yükseklik $R_{\text{max}} \text{ (nm)}$
10x10	39,704	32,859	260,72
5x5	41,344	33,944	273,22
1,85x1,85	37,939	30,988	241,65

Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13'deki AFM görüntüleri incelendiğinde taneciklerin belirgin boyutta olduğu, yüzeyin pürüzlü olduğu ve kümelenmelerin olduğu görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü 39 ile 41 nm arasında değişen değerlerde belirlenmiştir. Ortalama tanecik boyutu ile AFM görüntülerinden 175 nm - 275 nm arasında değişen büyüklüklerde olduğu hesaplanmıştır. Vanadyum oksit filmin alt kısımlarda daha büyük tanecikli yapıda olduğu, üst kısımdaki taneciklerin ise daha küçük yapıda olduğu görülmektedir. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında daldırarak yapılan vanadyum oksit filmlerin 13 nm, döndürerek kaplanan filmlerde 2 nm civarı pürüzlülük (R_q) değeri elde edilmiştir (Durmuş, 2011). Türhan yaptığı çalışmada vanadyum oksit, tantalum oksit ve vanadyum oksit katkılı tantalyum oksit filmler oluşturmuş ve yaptığı ölçümler sonucu çalışmamızdakine benzer bir şekilde elde ettiği vanadyum oksit filmlerin, tantalyum oksit filmlere göre daha büyük tanecikli yapıda kristallendiğini göstermiştir. Vanadyum oksit filmler, titanyum oksit, zirkonyum oksit, tantalum oksit filmlere göre daha büyük tanecikli yapıda kristallenmektedir ve daha pürüzlü bir yapıya sahiptirler (Türhan, 2008). Bilgiç, yaptığı çalışmada vanadyum oksit filmlerinin maksimum pürüzlülüğünün tavlama sıcaklığı ile yükseldiğini göstermiştir (Bilgiç, 2012).

Yavru, çalışmasında tavlama sıcaklığının artışı ile tanecik boyutunun arttığını, yüzey pürüzlülüğünün ise azaldığını göstermektedir (Yavru, 2015).

4.3. Morötesi-Görünür Bölge Spektroskopisi (UV-VIS)

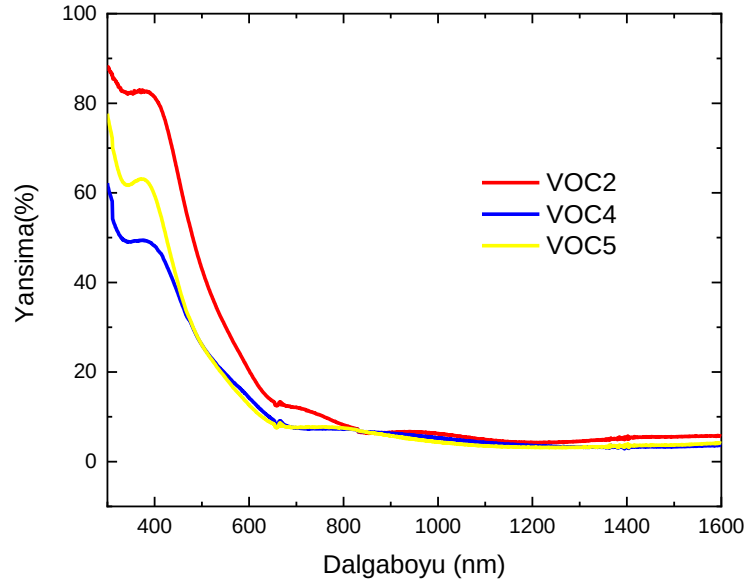
Cam taban üzerine kaplanan VOC2, VOC4, VOC5 filmlerinin 300-1600 nm dalga boyunda yapılan UV-VIS geçirgenlik ölçümleri aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.14 VO_x filmlerin geçirgenlik-dalga boyu grafiği

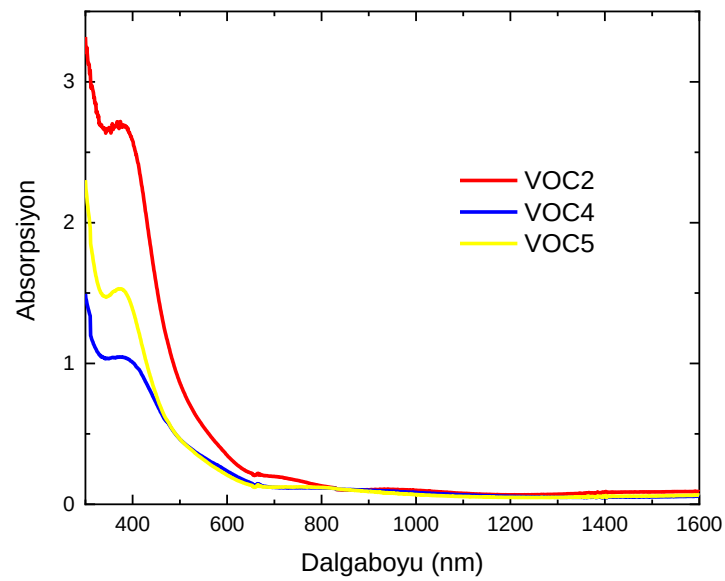
Grafikte görüldüğü gibi tüm filmler 300 ile 390 nm arasında çok düşük geçirgenlik gösterirken ortalama 390 nm'den sonra giderek artan bir geçirgenlik değeri göstermişlerdir. Bu artış 685 nm dalga boyundan sonra yerini doğrusal bir geçirgenliğe bırakmış ve 1600 nm dalga boyuna kadar tüm filmler ortalama yüzde 85 değerinde bir geçirgenlik göstermişlerdir.

Cam üzerine kaplanmış VO_x filmlerin yansıma-dalga boyu grafiği aşağıdaki gibidir.



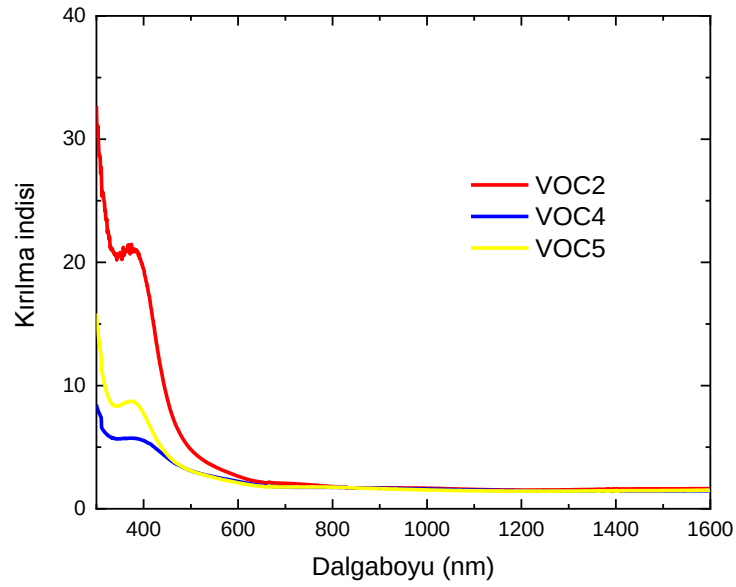
Şekil 4.15 VO_x filmlerin yansımada dalga boyu grafiği

Yansımada dalga boyu grafiğine bakıldığında filmler 300-600 nm arasında %88-60 arasından başlayan bir yansımada gösterirken daha yüksek dalga boylarında yansımada giderek azalmıştır. 600 nm üzerinde ise yansımalar yaklaşık %4'de neredeyse sabitlenmiştir. Grafiklerdeki dalgalanmalar filmde ışığın girişimlerinden kaynaklanmaktadır.

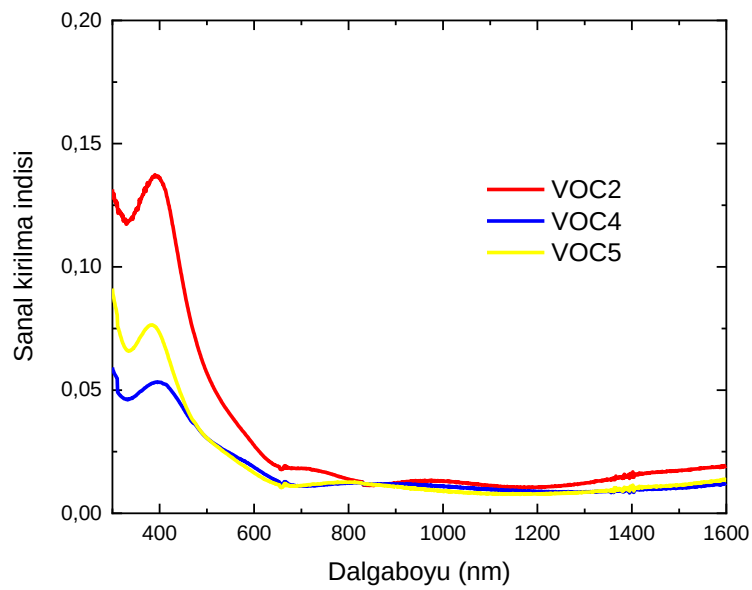


Şekil 4.16 VO_x filmlerin soğurma-dalga boyu grafiği

Filmlere ait soğurma grafiği incelendiğinde 300 nm dalga boyunda filmlerde 1,5-3,3 arası bir soğurma varken yansıma grafiğindeki gibi soğurma dalga boyu büyüdükçe giderek azalmakta ve yaklaşık 600 nm'den sonra 0,1 civarı değerlerde sabit kalmaktadır.

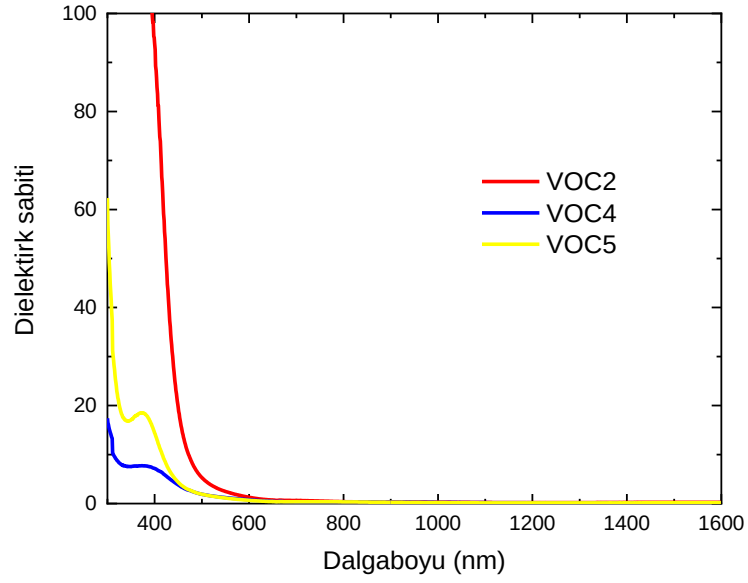


Şekil 4.17 VO_x filmlerin kırılma indisi-dalga boyu grafiği

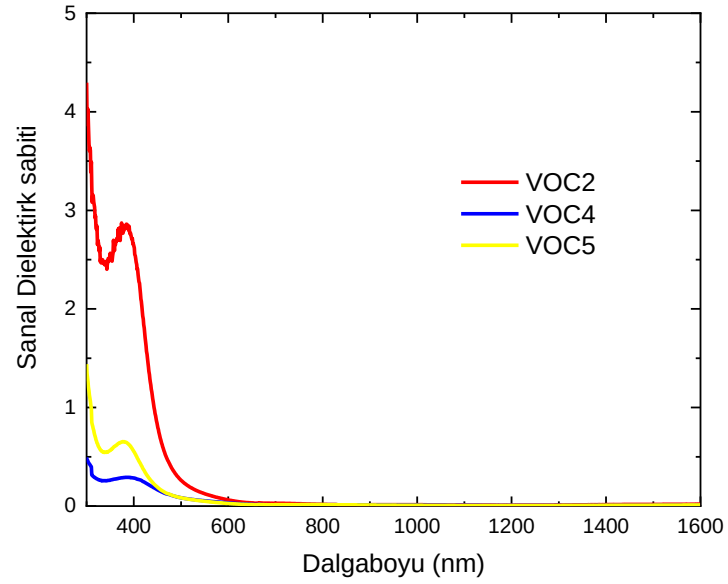


Şekil 4.18 VO_x filmlerin sanal kırılma indisi-dalga boyu grafiği

Filmlere ait kırılma indisi grafiklerine bakıldığında her iki indisin de 600 nm dalga boylarına doğru düşüş gösterdiği ve bu dalga boyundan itibaren neredeyse değişmediği görülmektedir.



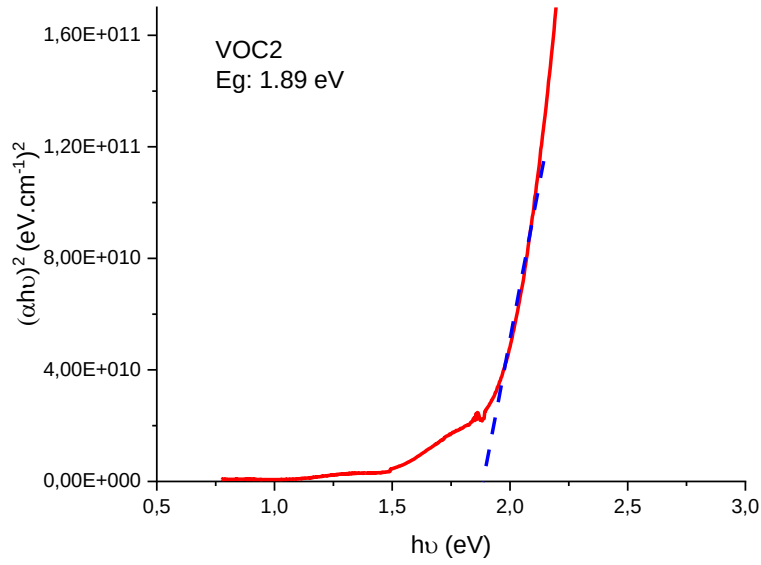
Şekil 4.19 VO_x filmlerin Dielektrik sabiti-dalga boyu grafiği



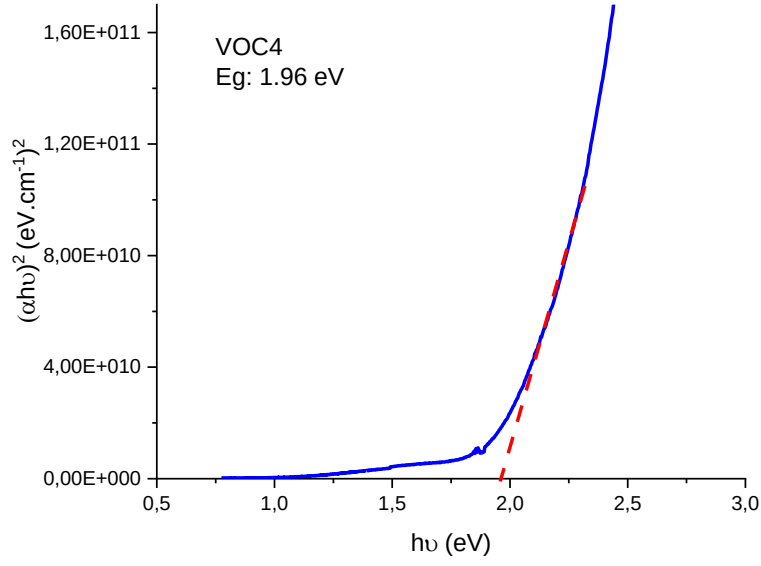
Şekil 4.20 VO_x filmlerin sanal dielektrik sabiti-dalga boyu grafiği

Filmlere ait dielektrik sabiti grafiklerine bakıldığında her iki indisin de 600 nm dalga boylarına doğru düşüş gösterdiği ve bu dalga boyundan itibaren neredeyse sıfırlandığı görülmektedir.

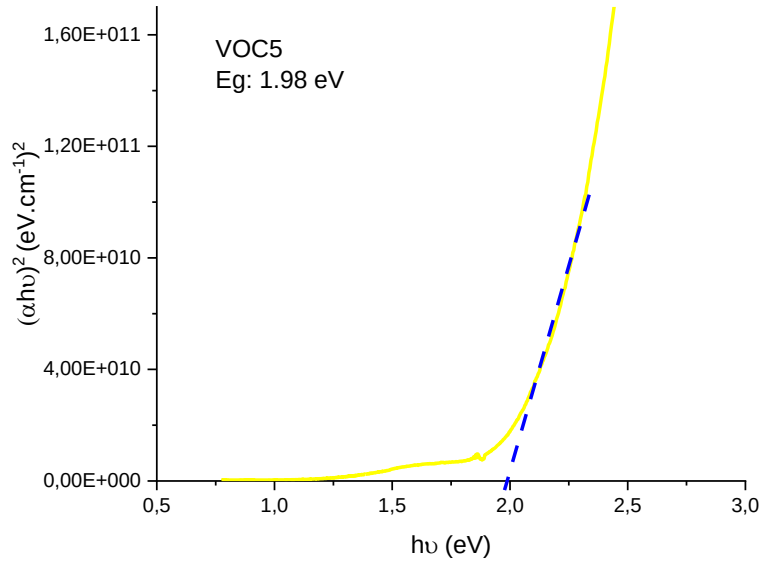
VO_x filmlerin Denklem 3.1'e göre hesaplanan soğurma katsayıları yardımıyla $h\nu - (\alpha h\nu)^2$ grafikleri çizilmiş ve bu grafiklerin yatay ekseni kestiği noktadan filmlerin optik bant genişlikleri hesaplanmıştır.



Şekil 4.21 Cam üzerine kaplanmış VOC2 filminin $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafiği ve grafikten bulunan bant genişliği (E_g) değeri



Şekil 4.22 Cam üzerine kaplanmış VOC4 filminin $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$ grafiği ve grafikten bulunan bant genişliği (E_g) değeri

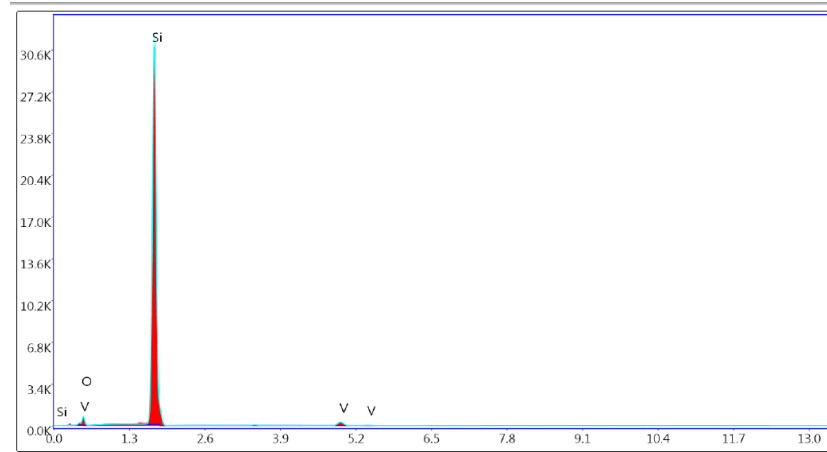


Şekil 4.23 Cam üzerine kaplanmış VOC5 filminin $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$ grafiği ve grafikten bulunan bant genişliği (E_g) değeri

Vanadyum oksit filmlerimiz için hesaplanan bant genişliği değerlerine bakıldığında bu değerlerin 1.89 ile 1.98 eV arasında değiştiği görülmektedir.

4.4. Enerji Ayrımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX) Sonuçları

p-Si üzerine kaplanan VOS1 nolu film için Enerji ayrımlı X-Ray spektroskopisi (Energy-dispersive X-ray spectroscopy EDX) ile elementel analiz yapılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.24 VOS1 nolu filme ait EDX histogramı.

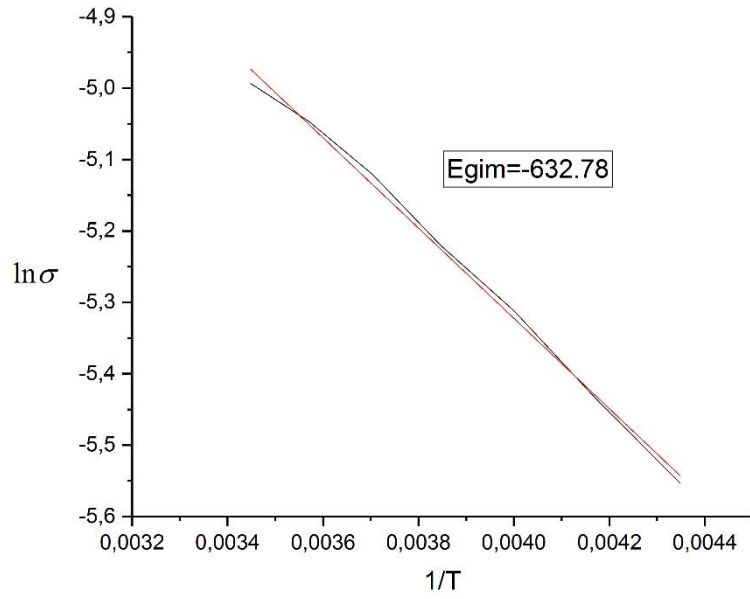
Çizelge 4.4 VOS1 nolu filme ait EDX sonuçları

Element	Wt%	Atomik%	Error%	Net. Int.	K Ratio	Z	R	A	F
O K	5,67	9,70	12,45	79,78	0,0120	1,0959	0,0000	0,1929	1,0000
Si K	90,55	88,27	1,59	8106,23	0,8668	1,0000	0,0000	0,9569	1,0003
V K	3,78	2,03	6,24	114,74	0,0304	0,8364	0,0000	0,9411	1,0221

Çizelge incelendiğinde VOS1 nolu film Si taban üzerine kaplandığından numunenin %90.55 ağırlık yüzdesi Si olarak çıkmıştır. Vanadyum % 3.78, O ise % 5.67 ağırlık oranında çıkmıştır. Sonuçlarda başka elementlerin kayda değer oranda çıkmamış olması filmimizin saflık oranlarının iyi derecede olduğunu gösterir.

4.5. Elektriksel Özellikler

Cam üzerine kaplanan VOC5 nolu film Şekil 3.3'deki gibi kontak alındıktan sonra için -43 ile 27 °C arasındaki sıcaklıklar için I-V ölçümleri alındı ve Denklem 3.2 ve 3.3 kullanılarak $\ln \sigma - 1/T$ grafiği çizildi. Grafiğin eğiminden aktivasyon enerjisi hesaplandı.

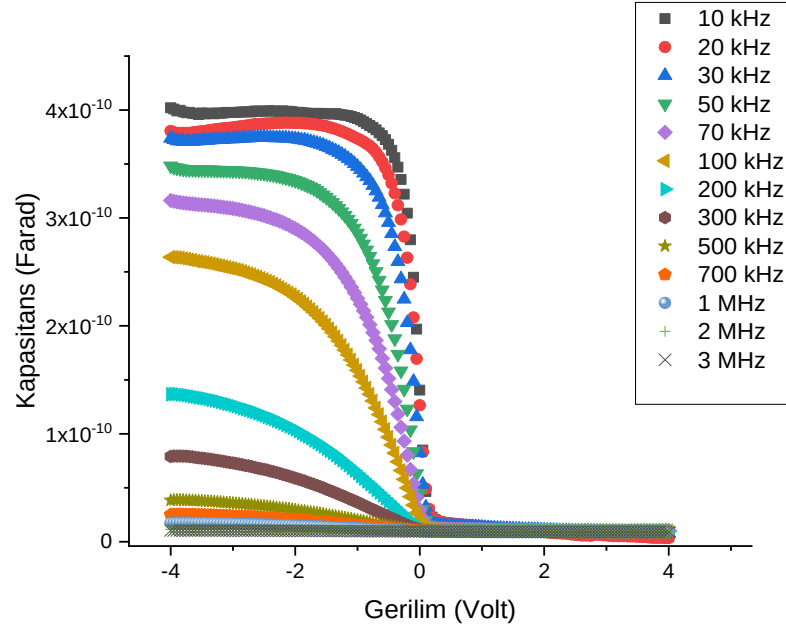


Şekil 4.25 VOC5 nolu film için $\ln \sigma - 1/T$ grafiği ve eğimi.

Grafiğin eğimi $-E_A/k$ değerini vermektedir. k Stephan-boltzman sabiti olup değeri $8.62 \cdot 10^{-5}$ 'dir. Bu değeri kullanarak E_A değeri hesaplanırsa 54,55 meV olarak bulunur.

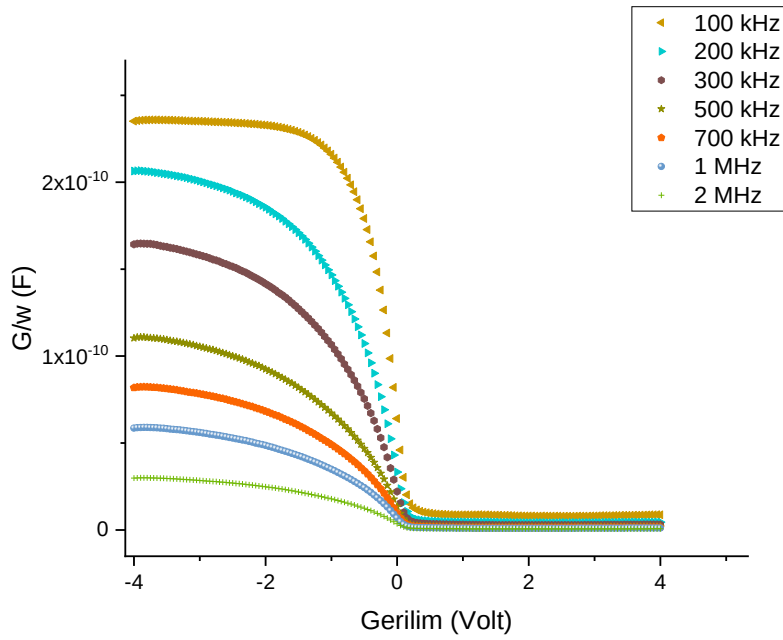
4.5.1. Kapasite – gerilim (C-V) ölçümleri

VOS1 nolu filmdeki prosedür izlenerek elde edilen filmler Şekil 3.5 gibi bir MOS yapı haline getirilmiş ve elde edilen bu yapıya MV1 ismi verilmiştir. MV1 için +4V ile -4V arasındaki gerilimlerde 10 kHz ile 3 MHz frekansları arasında oda sıcaklığında C-V ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen C-V grafiği aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.26 MV1 MOS yapısına ait farklı frekanslarda kapasitans-gerilim grafiği

Grafiklerde görüldüğü gibi yapının kapasitansı artan frekansla kuvvetli yığılma bölgesinden, kuvvetli tersinim bölgesine doğru gittikçe azalmıştır. Ayrıca yığılma ve tüketim bölgesinde de yapının kapasitansı artan frekansla azalmıştır.

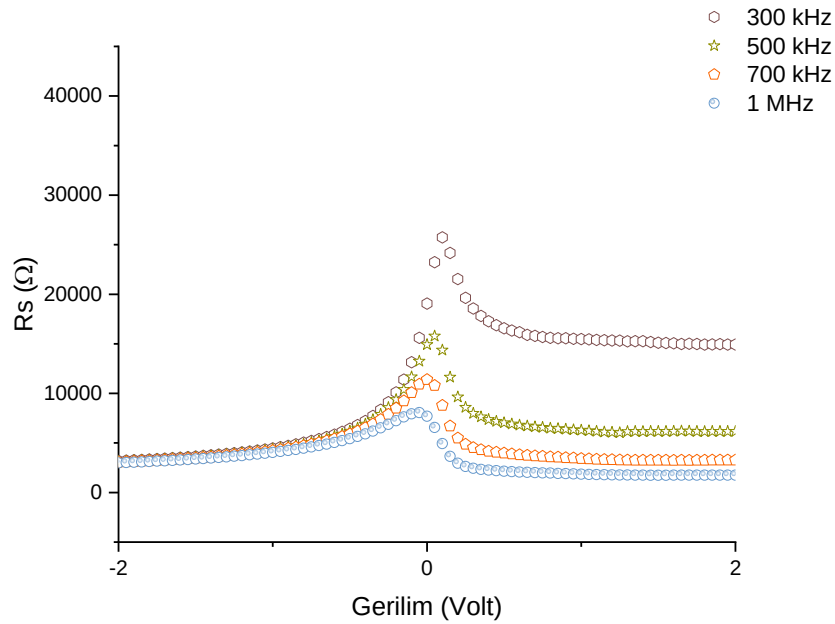


Şekil 4.27 MV1 MOS yapısına ait farklı frekanslarda iletkenlik-gerilim grafiği

C-V ölçümleri kullanılarak film kalınlığı 72,09 nm olarak bulunmuştur. C-V ve G/ω -V eğrilerinden faydalanılarak MV1 MOS yapısının frekansa bağımlı seri direnç (R_s)-gerilim eğrileri aşağıdaki eşitlik yardımıyla elde edilmiştir (Nicolian ve Brews, 1982).

$$R_s = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2} \quad (4.1)$$

Burada C_{ma} ve G_{ma} kuvvetli yığılma bölgesinde ölçülen kapasite ve iletkenlik değerleridir. Bu R_s büyük düz beslemlerde bulunan değerdir. Ters beslemlerde ise R_s 'nin sonsuza gitmesi söz konusudur (Nicolian ve Brews, 1982). MV1 yapısının 200kHz-1 MHz aralığındaki Denklem 4,1'de tüm gerilimlerde ölçülen C_{ma} ve G_{ma} değerleri kullanılarak seri direnç-gerilim (R_s -V) eğrileri aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.28 Farklı frekanslarda MV1 yapısının $R_s - V$ eğrileri

Grafik incelendiğinde tüketim bölgesinde bir tepe görülmüştür ve frekans arttıkça tepe şiddeti azalmış ve yığılma bölgesine doğru kaymıştır.

MV1 yapısının 700 kHz'de ölçülmüş olan C-V eğrilerinden, difüzyon potansiyeli (V_d), alıcı yoğunluklarını (N_a) ve tüketme bölgesinin genişliğini (W_d) hesaplayabilmek için Şekil 4.29'da verilen C^{-2} -V eğrisinden yararlanılmıştır. C^{-2} -V eğrilerinin gerilim

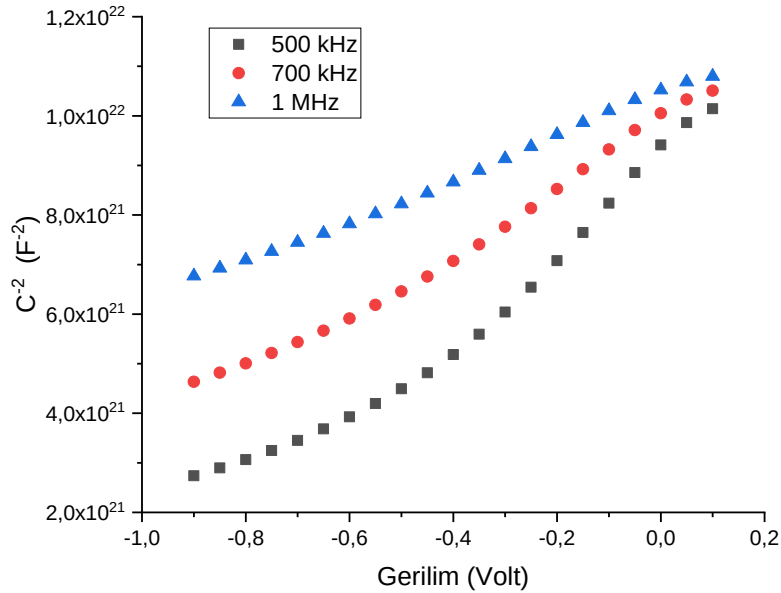
eksenine kestiği noktalarda kesme gerilimleri (V_0) ve eğimlerden de alıcı yoğunlukları (N_a) hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 4.5'te verilmiştir. Yüzey durumları bulunmadığında V_0 ile V_d arasındaki Denklem 4.2 ile verilir (Sze, 2007).

$$V_d = V_0 + \frac{kT}{q} \quad (4.2)$$

Alıcı yoğunlukları (N_a) hesaplamak için ise Denklem 4.3 kullanılır. $C^{-2} - V$ grafiğinin eğimi eşitliğin bir tarafını verir.

$$\frac{dC^{-2}}{dV} = \frac{2}{q\epsilon_i N_a A^2} \quad (4.3)$$

Eşitliğin diğer tarafındaki ϵ_i , q ve A sırasıyla oksit tabakanın dielektrik sabiti, elektronun yükü ve doğrultucu kontak alanıdır. Burada $\epsilon_i=8,53 \cdot 10^{-13}$ F/cm, $A=7,85 \cdot 10^{-3}$ cm² değerindedir. N_a değeri -1 ile 0 Volt aralığı için hesaplanmıştır.



Şekil 4.29 MV1 yapısına ait farklı frekanslarda $C^{-2} - V$ eğrilerinin lineer bölgeleri.

MV1 yapısının oda sıcaklığında Fermi enerjisi E_F ;

$$E_f = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_V}{N_A} \right) \quad (4.4)$$

bağıntısından hesaplandı burada N_V , valans bandındaki durumların yoğunluğu olup;

$$N_V = 4,82 \times 10^{15} T^{\frac{3}{2}} \left(\frac{m^*}{m_o} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (4.5)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Burada m^* deşiklerin etkin kütlesi olup değeri $m^*/m_o=0,55$ dir. (Jaros, 1989). Bu denklemden hesaplanan $N_V= 0,99 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ değeri Denklem 4.4' te yazılırsa oda sıcaklığında değişik frekanslara karşılık gelen Fermi enerjisi bulunur. Hesaplanan Fermi enerji seviyeleri Çizelge 4.5'te verilmiştir. E_M maksimum elektrik alan;

$$E_m = E(x = 0) = \sqrt{\frac{2qN_A V_d}{\epsilon_s \epsilon_o}} \quad (4.6)$$

bağıntısı ile bulunur. Burada N_A alıcı yoğunluğu ve V_d difüzyon potansiyel $C^{-2} - V$ grafiği ve denkleminiz yardımıyla bulunan değerdir. q elektronun yükü, ϵ_s p-Si için dielektrik sabiti ve ϵ_o boşluğun dielektrik sabitidir. Buradan hesaplanan maksimum elektrik alan Çizelge 4.5'te verilmiştir. Schottky engel alçalması;

$$\Delta\phi_b = \left[\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s\epsilon_o} \right]^{1/2} \quad (4.7)$$

bağıntısı ile bulunur. Burada E_m maksimum elektrik alandır. Hesaplanan Schottky engel alçalması değeri Çizelge 4.5'te verilmiştir. Engel yüksekliği;

$$\phi_{b(C-V)} = V_d + E_F - \Delta\phi_b \quad (4.8)$$

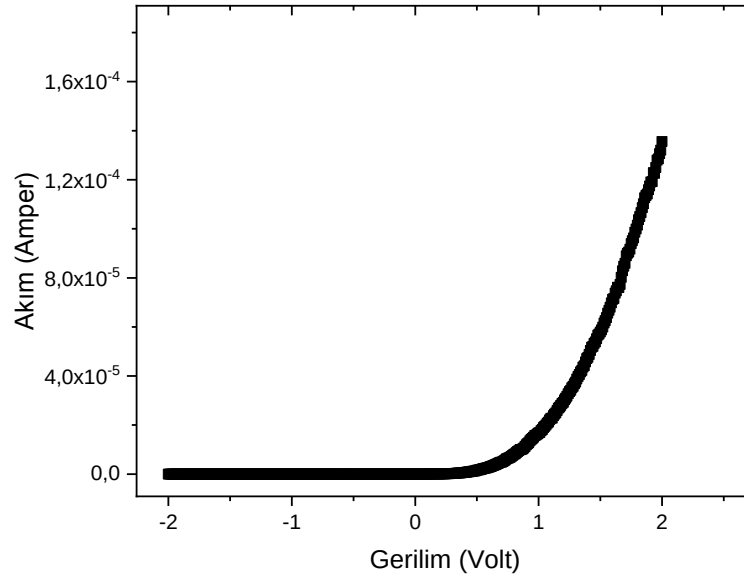
bağıntısı ile bulunur. Burada diğer denklemler ile hesaplanan V_d , E_F ve $\Delta\phi_b$ değerleri yerlerine yazılarak hesaplanan engel yüksekliği Çizelge 4.5'te verilmiştir. Tüketim tabakası genişliği;

$$W_D = \left(\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 V_d}{qN_A} \right)^{1/2} \quad (4.9)$$

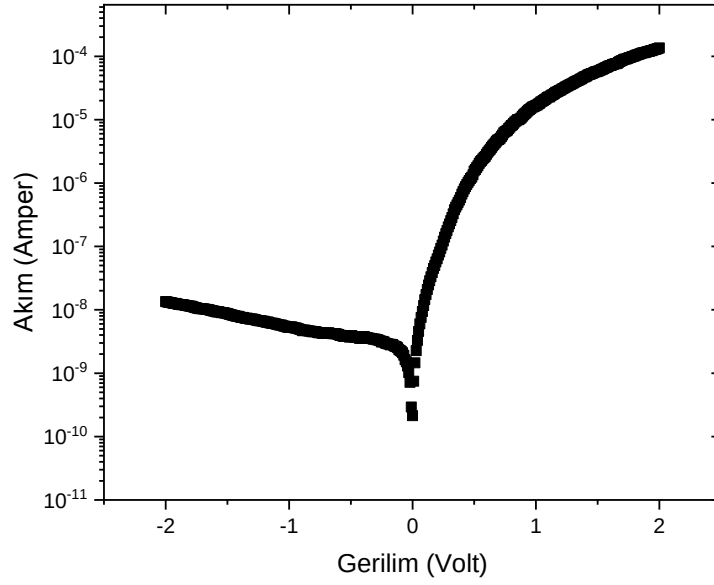
bağıntısı ile verilir. Bu eşitlik ile hesaplanan W_D tüketim tabakası genişliği Çizelge 4.5'te verilmiştir.

4.5.2. Akım – gerilim (I-V) ölçümleri

MV1 MOS yapısına ait akım-gerilim (I-V) ve akımın doğal logaritması-gerilim ($\ln I$ -V) grafikleri aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.30 MV1 yapısına ait akım – gerilim eğrisi



Şekil 4.31 MV1 yapısına ait Ln(I)-V grafiği

Ters doyum akımı (I_o) değeri lnI-V eğrisinin sıfır voltajda düşey eksenini kestiği noktadan elde edildi. Bulunan değer Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Diyot alanı ve I_o değerleri kullanılarak sıfır beslem potansiyel engel yüksekliği değerleri ϕ_{bo} ,

$$\phi_{bo} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{A \cdot A^* \cdot T^2}{I_o} \right) \quad (4.10)$$

eşitliği ile verilir. Burada ϕ_{bo} metal ile yarıiletken arasında oluşan sıfır - belsem (gerilim) potansiyel engel yüksekliği, A diyotun doğrultucu kontak alanı ve A^* etkin Richardson sabiti olup değeri p-tipi Si için $32 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ dir (Sze, 2007). Bu eşitlik kullanılarak hesaplanan ϕ_{bo} değeri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

İdealite faktörü n doğru gerilim lnI-V eğrilerinin eğiminden aşağıdaki eşitliğe göre elde edilir.

$$n = \frac{q}{kT} \left[\frac{dV}{d(\ln I)} \right] \quad (4.11)$$

Bu eşitlik kullanılarak hesaplanan n değeri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

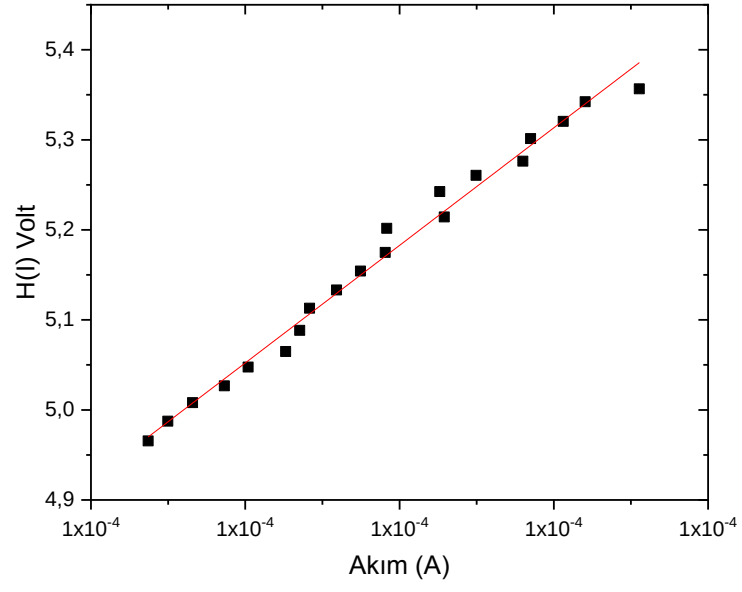
Gerilim, akım (V-I) grafiğinin ileri pozitif bölgesinin eğiminden seri direnç R_s hesaplanmıştır. Hesaplanan R_s değeri Çizelge 4.5'te verilmiştir. Daha önce Denklem 4.8 ile hesaplanan engel potansiyeli yüksekliği ayrıca I-V ölçümlerinden yararlanılarak hesaplanmıştır.

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (4.12)$$

Bağıntısına göre $H(I)$ fonksiyonu hesaplanmış ve $H - I$ grafiği çizilmiştir. Aynı fonksiyon ayrıca;

$$H(I) = n\phi_b + IR_s \quad (4.13)$$

şeklinde yazılabilir. Dolayısıyla çizilen $H - I$ grafiğinin düşey eksenini kestiği nokta $n\phi_b$ değerini verir. n (idealite faktörü) daha önce hesaplandığından. Buradan yararlanarak ϕ_b engel potansiyeli yüksekliği hesaplanabilir. Hesaplanan engel yüksekliği Çizelge 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.32 MV1 yapısına ait $H(I) - I$ grafiği

Çizelge 4.5 Al/VO_x/p-Si (MOS) Yapısının Oda Sıcaklığında Ölçülmüş I – V ve C – V ölçümlerinden elde edilmiş temel belirkenlikleri.

Belirtkenlik	Sembolü	Değeri	Birim
Alıcı yoğunlukları	Na	$5,9.10^{13}$	cm ⁻³
Fermi Enerjisi	E _f	0,31	eV
Kesme Gerilimi	V _o	1,58	V
Difüzyon Potansiyeli	V _d	1,61	V
Maksimum Elektrik Alan	E _m	$5,39.10^3$	V/cm
Schottky Engel Alçalması	$\Delta\phi_b$	0,0081	eV
Potansiyel Engel Yüksekliği	ϕ_b (C-V)	1,91	eV
Potansiyel Engel Yüksekliği	ϕ_b (H-I)	1,29	eV
Tüketme Bölgesinin Genişliğini	W _d	$5,96.10^{-4}$	cm
Doyma Akımı	I _o	$3,85.10^{-9}$	Amper
Sıfır Beslem Potansiyel Engel Yüksekliği	ϕ_{bo}	0,76	eV
İdealite Faktörü	n	2,8	
Seri Direnç	R _s	6309,9	Ohm

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada cam ve p-Si üzerine sol-gel yöntemiyle VO_x ince filmler büyütülmüş ve bu filmlerin optik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. VO_x filmlerinin elde edilmesinde optimum koşullar belirlendikten sonra Al/VO_x/p-Si/Al MOS yapılar elde edilmiş ve bu yapıların elektriksel özellikleri incelenmiştir. Çalışmada ön madde olarak V₂O₅ tozu kullanılmış ve yöntem olarak sol-jel daldırma yönteminden yararlanılmıştır. Başka çalışmalarda ön madde olarak farklı maddelerin kullanıldığı görülmüştür. Örneğin Vinichenko triethoxy-vanadyl kullanmıştır (Vinichenkoa ve ark., 2011).

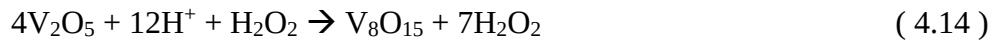
Cam üzerine elde edilen filmlerin optik özellikleri UV-VIS yöntemiyle belirlenmiştir. Geçirgenlik-dalga boyu grafiği incelendiğinde 600 nm üzerinde geçirgenliğin %85 seviyelerine ulaştığı görülmektedir. Geçirgenlik - dalgaboyu grafiğinden faydalanan optik bant genişliği hesaplanmıştır. Hesaplanan Eg bant genişliği değerleri 1.89 ile 1.98 eV arasında değişmektedir. Mousavi elde ettiği V₂O₅ filmlerinde 2.3 eV'luk optik bant genişliği belirlemiştir (Mousavi ve ark., 2017).

Cam üzerine elde edilen filmlerin yansıma-dalga boyu grafiği incelendiğinde %88'lerden başlayan yansımanın dalga boyu yükseldikçe düştüğü ve 600 nm üzerinde %4 yansıma derecesinde sabitlendiği gözlemlenmiştir. Si üzerine V₂O₅ filmi oluşturan Vinichenko kırılma indisini 2.2, 2.7 ve 2.8 olarak belirlemiştir. Elde edilen filmlerde geçirgenlik 600 nm üzeri dalga boylarda %80 üstü mertebededir (Vinichenkoa ve ark., 2011). Bu açıdan literatürdeki çalışmalara nazaran daha yüksek bir geçirgenlik elde edildiği söylenebilir. Mousavi çalışmasında V₂O₅ filmler elde etmiş ve %70 oranında geçirgenlik ölçmüştür (Mousavi ve ark., 2017). Optik özellikler genellikle vanadyumun valansındaki değişiklikler ile ilişkili olduğu kabul edilir (Chen ve ark., 2015). Acosta çalışmasında 500 nm üzerinde %50 oranında geçirgenlik elde etmiştir.

Sıcaklığa bağlı olarak cam üzerine kaplanan filmlerin elektriksel özelliklerinin ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerden faydalanan filmlere ait aktivasyon enerjisi hesaplanmıştır. Hesaplama sonucu Ea aktivasyon enerjisi değeri 54.55 meV olarak bulunmuştur.

Cam üzerine elde ettiğimiz filmlere ait XRD ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen ölçümlerden 300 derecede tavlanan filmlerde kristal yapı gözlemlenmezken 400 derecede son tavlama işlemine tabi tutulan filmlerin iyi derecede kristallendiği görülmüştür. 500 derecede son tavlama işlemine tabi tutulan filmlerde ise iyi derecede kristallenme gözlemlenmemiştir. Bunun muhtemel nedeni cam tabandaki minerallerin filme difüze olarak yapısal bozulmalara neden olmasıdır. Gerek HNO_3 gerekse HCl maddelerini çözücü olarak kullanarak aynı V_2O_5 tozundan elde edilen çözeltiye cam tabanlar daldırılarak elde edilen filmlerde kayda değer bir farklılık gözlemlenmemiştir. Zira her iki durumda da 400 derece son tavlama işlemine tabi tutulan numuneler V_3O_7 (200) düzlemine karşılık gelen pikler vermişlerdir. Ancak HNO_3 kullanılarak elde edilen filmde 500 derece tavlama sonucunda da kristal yapı net bir şekilde gözlemlenirken, HCl kullanıldığında net bir kristal yapı 500 derece son tavlama durumunda gözlemlenmemiştir.

Cam üzerine elde edilen filmlere benzer bir yöntemle p-Si üzerine VOx filmler büyütülmüştür. Bu filmlere ait XRD ölçümleri yapılmıştır. p-Si üzerine büyütülen filmlerde cam taban üzerine büyütülen filmlerdekine benzer bir şekilde V_3O_7 yapısının farklı düzlemine ait piki gözlemlenmiştir. Ancak gözlemlenen bu pik zayıf bir şiddette görülmüştür. Asıl güçlü pik ise V_8O_{15} yapısının (1-22) düzlemine karşılık gelen açıda rastlanmıştır. Pakma makalesinde V_8O_{15} oluşum sürecini aşağıdaki tepkime ile belirtmiştir.



Pakma çalışmasında cam üzerine elde edilen filmlerde V_5O_9 (-103) pikleri gözlemlenmiştir (Pakma ve ark., 2017). Vinichenko çalışmasında 180 derecede tavlanan filmlerin amorf yapı gösterdiğini, 500 derece tavlanan filmlerin ise monoklinik V_2O_5 kristali elde etmiştir (Vinichenko ve ark., 2011). Hajzeri çalışmasında V_2O_5 , VO_2 ve V_2O_3 fazlarında filmler elde etmiştir (Hajzeri ve ark., 2012). Bizde de elde edilen filmler farklı fazları bir arada bulunduran bir özellik göstermekle beraber elde ettiğimiz fazlar oldukça farklıdır. Benzer şekilde Pakma çalışmasında cam ve p-Si üzerine farklı yapılar elde etmiş ve yazar bu durumu VOx 'in amorf cam üzerine fiziksel tutunurken, Si üzerine kimyasal tutunmasına bağlamıştır (Pakma ve ark., 2017). Vinichenko makalesinde Si

üzerine kaplanan filmlerin cam üzerine kaplanan filmlere göre daha yüksek XRD pikleri elde etmiş ve piklerin 2θ açıları bizim çalışmamızdakinden farklı olarak aynı çıkmıştır (Vinichenkoa ve ark., 2011). Çalışmamızda Si üzerine kaplanan filmlerde XRD pikleri daha şiddetli çıkmamış ve 2θ açıları cam ile p-Si yüzey üzerinde farklı değerler vermiştir. p-Si üzerine elde ettiğimiz filmlerde V_8O_{15} yapısının elde edilmiş olması literatürde pek rastlanan bir durum değildir. Literatürde benzer çalışmalara baktığımızda genellikle V_2O_5 veya VO_2 yapılarının elde edildiği görülmektedir.

Cam ve p-Si taban üzerine elde edilen filmlerde farklı yapılar elde edilmesinin temel nedeni VO_x farklı tabanlara farklı bağlanma göstermesi olabilir. Başka bir ifade ile Vanadyum oksit cam üzerine fiziksel bir bağlanma yaparken, p-Si üzerine kimyasal bir bağlanma yapmaktadır. Bu da farklı oksit yapıların oluşmasına neden olmaktadır denebilir. (Pakma ve ark., 2017). Cam ve p-Si taban üzerinde farklı oksit yapıların oluşması taban geometrisinin farklı oluşundan da kaynaklanıyor olabilir. Farklı geometri üzerinde gelişen yapı bu geometrinin yönlendirmesi ile farklı oksit yapının oluşumuna neden olabilir.

Cam üzerine çözücü madde olarak HCl kullanılarak elde edilen filmlerde ortalama tanecik boyutu HNO_3 çözücü olarak kullanılarak elde edilen filmlerdekine nazaran daha büyük çıkmıştır. Yine tavlama sıcaklığı yükseltildiğinde tanecik boyutunun arttığı gözlemlenmiştir. p-Si üzerine elde edilen filmlerde ise tanecik boyutu cam üzerine elde edilen filmlere göre oldukça büyük çıkmıştır. Çalışmamızda p-Si üzerine elde ettiğimiz filmlerde 280 nm boyutunda tanecikler gözlenirken, Pakmanın p-Si taban üzerine elde ettiği filmlerin tanecik boyutu çok daha büyük olmuştur (Pakma ve ark., 2017). Vinichenko çalışmasında Si üzerine elde ettiği filmlerde daha büyük tanecik boyutu elde etmiştir (Vinichenkoa ve ark., 2011). Acosta RF magnetron tekniği ile cam üzerine elde ettiği filmlerde 40 nm dalga boylu tanecikler elde etmiştir (Acosta ve ark., 2019). Çalışmamızda ise cam üzerine daha küçük tanecik boyutlu filmler elde edilmiştir. Tablo incelendiğinde en fazla 20 nm boyutunda tanecikler oluştuğu görülmektedir.

p-Si üzerine elde edilen filmlerin SEM görüntüleri elde edilmiştir. Görüntüler incelendiğinde taneciklerin film yüzeyine düzgün dağıldığı ve yüzeyde çatlamların olmadığı gözlemlenmektedir. Acosta çalışmasında benzer yüzey morfolojisine sahip

filmler elde etmiştir (Acosta ve ark., 2019). Ancak daha büyük tanecik boyutu gözlenmiştir. Bu durum filmlerin RF tekniği ile üretilmesinden kaynaklanabilir. Pakma çalışmasında benzer bir prosedür kullanmakla birlikte farklı yüzey morfolojisine sahip filmler elde etmiştir (Pakma ve ark., 2017). Bu farklılık Pakmanın çalışmasında çözeltiye bizden farklı olarak etilen glükol eklemesi olabilir. Ayrıca Pakma çalışmasında filmleri daha düşük sıcaklıklarda tavlamıştır (300 °C).

p-Si üzerine elde edilen filmlere ait AFM görüntüleri elde edilmiştir. AFM analizlerinin ortalaması alındığında filmin yüzey yükseklik değişiminin kök ortalama değeri $R_{ms}(Rq)=39.66$ nm, yüzey mutlak yükseklik değişiminin aritmetik ortalama değeri $R_a=32,60$ nm, Maksimum yükseklik R_{max} değeri ise 258.53 nm olduğu bulunur.

p-Si üzerine elde edilen filmlere ait EDX analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları incelendiğinde %90.55 ağırlık oranında Si, %3.87 V, %5.67 O tespit edilmiştir. Bunların dışındaki elementlerin kayda değer oranda çıkmamış olması filmlerimizin saflık derecesinin iyi düzeyde olduğunu gösterir.

p-Si tabanın mat yüzeyine buharlaştırma yöntemiyle Al kaplandıktan sonra daldırma yöntemiyle taban üzerine VOx film kaplanmış ve son olarak delikli maske kullanılarak VOx film üzerine buharlaştırma yöntemiyle tekrar Al kaplanarak Vanadyum oksit MOS yapılar elde edilmiştir. Bu yapılara ait I-V (akım-gerilim) ve C-V (Kapasite - Gerilim) ölçümleri farklı frekanstaki AC akımda gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümden faydalanılarak filmlere ait elektriksel özellikler hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Çizelge 4.5'te sunulmuştur.

MOS yapımıza ait kapasite-gerilim (C-V) ölçümleri incelendiğinde kapasitansın negatif besleme durumunda pozitif besleme durumuna göre daha yüksek olduğu ve sıfır bölgesine doğru hızla düştüğü görülmüştür. Kapasitansın frekans ile değişimi incelendiğinde ise frekans arttıkça kapasitansta düşüş gerçekleşmiştir.

MOS yapımıza ait iletkenlik-gerilim (G/w-V) ölçümleri incelendiğinde kapasitans ölçümlerine benzer bir durum ile karşılaşılmaktadır. Frekans arttıkça iletkenlik azalmakta

ve yine negatif bölgede yüksek bir iletkenlik gözlenirken, sıfır beslem bölgesine doğru yaklaştıkça iletkenliğin hızla düştüğü belirlenmiştir.

MOS yapımıza ait seri direnç (R_s) değerleri akım-gerilim ve kapasite-gerilim ölçümlerinden faydalanılarak hesaplanmıştır. R_s değerleri incelendiğinde negatif beslemeden sıfır beslem bölgesine doğru gidildikçe ani bir yükselme ve ardından ani bir düşüş belirlenmiştir. R_s değerinde artan frekans ile düşüş meydana gelmiştir.

MOS yapımıza ait I-V ölçümleri yapılmış ve bu ölçümden faydalanılarak $\ln I$ -V değerleri hesaplanmıştır. I-V grafiği incelendiğinde gerilimin diyot yapısındaki gibi başlangıçta 10^{-8} mertebelerinde sabit kaldığı ve 0.5 volt civarlarında hızla yükselme göstererek 10^{-4} mertebelerine ulaştığı görülmektedir. $\ln I$ - V değerleri incelendiğinde negatif besleme bölgesinde de akımın düştüğü ve sıfır beslemde yerel minimuma ulaştığı pozitif bölgede ise akımın hızla yükseldiği görülmektedir.

MOS yapımıza ait yapılan I-V ve C-V ölçümlerinden Alıcı yoğunlukları (N_a), Fermi Enerjisi (E_f), Kesme Gerilimi (V_o), Difüzyon Potansiyeli (V_d), Maksimum Elektrik Alan (E_m), Schottky Engel Alçalması ($\Delta\phi_b$), Potansiyel Engel Yüksekliği (ϕ_b), Tüketme Bölgesinin Genişliğini (W_d), Doyma Akımı (I_o), Sıfır Beslem Potansiyel Engel Yüksekliği (ϕ_{bo}), İdealite Faktörü (n), Seri Direnç (R_s) değerleri hesaplanmış ve Çizelge 4.5'te sunulmuştur.

KAYNAKLAR

- Acosta, D., Chavez-Esquivel, G., Magaña, C., Hernández, F., Pérez-Pacheco, A., & Huerta, L. (2019). Physical properties and phase transition observed in vanadium oxide thin films deposited by RF magnetron sputtering. *Materials Research Express*, 1-31.
- Almeida, L., Deep, G., Lima, A., Khrebtov, I. A., Malyarov, V. G., & Neff, H. (2004). Modeling and performance of vanadium–oxide transition edge microbolometers. *Appl. Phys. Lett.*, 85, 3605.
- Barker, A. S., Verleur, H. W., & Guggenheim, H. J. (1966). Infrared Optical Properties of Vanadium Dioxide Above and Below the Transition Temperature. *Phys. Rev. Lett.*, 17, 1286.
- Beke, S., Korösi, L., Papp, S., Oszko, A., & Nanai, L. (2009). XRD and XPS Analysis of Laser Treated Vanadium Oxide Thin Films. *Applied Surface Science*, 9779–9782(255), 9779-9782.
- Bilgiç, P. (2012). Tavlama Sıcaklığının Nano Ölçekli Vanadyum Oksit İnce Filmlerin Optik Ve Elektriksel Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. Eskişehir: Yüksek Lisans Tezi.
- Bouzidi, A., Benramdane, N., Nakrela, A., Mathieu, C., Khelifa, B., Desfeux, R., & Da Costa, A. (2002). First synthesis of vanadium oxide thin films by spray pyrolysis technique. *Mater. Sci. and Eng.*, 95, 141.
- Brews, E. H. (1982). *MOS Physics and Technology*. New York: Wile.
- Bugaev, A., Nikitin, S., & Terukov, E. I. (2001). Effect of the metal-semiconductor phase transition on the capacitance of an aluminum-dielectric-vanadium dioxide heterostructure. *Tech. Phys. Lett.*, 27, 924.
- Bugayev, A., & Gupta, M. (2003). Femtosecond holographic interferometry for studies of semiconductor ablation using vanadium dioxide film. *Opt. Lett.*, 28, 1463.
- Cavalleri, A., Dekorsy, T., Chong, H. H., Kieffer, J. C., & Schoenlein, R. W. (2004). Evidence for a structurally-driven insulator-to-metal transition in VO₂: A view from the ultrafast timescale. *Phys. Rev. B*, 70, 161102.
- Chae, B. G., Kim, H. T., Youn, D. H., & Kang, K. Y. (2005). Abrupt metal–insulator transition observed in VO₂ thin films induced by a switching voltage pulse. *Physica B*, 369, 76-80.
- Chen, C., Wang, R., Shang, L., & Guo, C. (2008). VO₂ multidomain heteroepitaxial growth and terahertz transmission modulation. *Appl. Phys. Lett.*, 93, 171101.

- Chen, J. L., Chun-Chieh, C., Ying-Kai, H., Chi Liang, C., Chih-Chin, H., Wei-Luen, J., . . . Chung-Li, D. (2015). Behind the color switching in gasochromic VO₂. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17, 3482.
- Chopra, K. (1969). *Thin Film Phenomenon*. Malabar, Florida: Robert E. Krieger Pub. Company.
- Cui, J., Da, D., & Jiang, W. (1998). Structure Characterization of Vanadium Oxide Thin Films Prepared by Magnetron Sputtering Methods. *Applied Surface Science*, 133, 225-229.
- Deal, B. E. (1980). Standardized Terminology for Oxide Charge Associated with Thermally Oxidized. *IEEE Trans, Electron Devices*, 606.
- Durmuş, O. (2011). Vanadyum Oksit İnce Filmlerinin Sol – Jel Yöntemi ile Hazırlanması ve Karakterizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Felde, B., Niessner, W., Schalch, D., Scharmann, A., & Werling, M. (1997). Plasmon excitation in vanadium dioxide films. *Thin Solid Films*, 305, 61.
- Gan, F. Y., & Laou, P. (2004). Optical and electrical properties of sputtered vanadium oxide films. *J.Vac. Sci. Technol.A*, 22.
- Gea, L., Boatner, L., Evans, H., & Zuhr, R. (1997). Optically active surfaces formed by ion implantation and thermal treatment. *Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res.*, 553, 127.
- Greenberg, C. (1983). Thermoresistive transitions in V₂O_{3+x} thin films. *Thin Solid Films*, 110, 73.
- Guzman, G., Beteille, F., Morineau, R., & Livage, J. (1995). Electrical switching in VO₂ sol–gel films. *J. Eur. J. Solid State Inorg. Chem.*, 32, 851.
- Guzman, G., Beteille, F., Morineau, R., & Livage, J. (1996). Thermochromic V_{1-x}Nb_xO₂ Sol-Gel Thin Films. *J. Mater. Chem.*, 6, 505.
- Hajzeri, M., Surca Vuk, A., Perse, L. S., Colovic, M., Herbig, B., Posset, U., . . . Orel, B. (2012). Sol–gel vanadium oxide thin films for aflexible electronically conductive polymericsubstrate. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 62-72.
- Hanlon, T. J., Coat, J. A., & Richardson, M. A. (2003). Molybdenum-doped vanadium dioxide coatings on glass produced by the aqueous sol-gel method. *Thin Solid Films*, 436(436,269), 269-272.
- Helmenstine, A. (2018). *Science Notes*. 10 5, 2018 tarihinde <http://sciencenotes.org> adresinden alındı

- Huang, Z., Zeng, H., Xue, L., Zhou, X., Zhao, Y., & Lai, Q. (2011). Synthesis of Vanadium Oxide, V₆O₁₃ Hollow-Flowers Materials and Their Application in Electrochemical Supercapacitors. *Journal of Alloys and Compounds*, 509, 10080-10085.
- J.Klesel. (2005). *What is the S.E.M, How does the SEM work, College*. 2018 tarihinde <http://mse.iastate.edu/microscopy/whatsem.html> adresinden alındı
- Jaros, M. (1989). *Physics and Applications of Semiconductor Microstructures*. Oxford: Carlendon Press.
- Jerominek, H., Picard, D., & Vincent, D. (1993). Vanadium oxide films for optical switching and detection. *Opt. Eng*, 32, 2092.
- Jin, P., Nakao, S., & Tanemura, S. (1998). Tungsten doping into vanadium dioxide thermochromic films by high-energy ion implantation and thermal annealing. *Thin Solid Films*, 151, 324.
- Kim, B., Lee, Y., Chae, B., Yun, S., Oh, S., & Kim, H. (2007). Temperature dependence of the first-order metal-insulator transition in VO₂ and programmable critical temperature sensor. *Appl. Phys. Lett.*, 90, 023515.
- Kumar, R., Karunakaran, B., & Mangalaraj, D. (2003). Room temperature deposited vanadium oxide thin films for uncooled infrared detectors. *Material Research Bulletin*, 38, 1235–1240.
- Ladd, L. A., & Paul, W. (1969). Optical and transport properties of high quality crystals of V₂O₄ near the metallic transition temperature. *Solid State Commun.*, 7, 425.
- Lee, C., Artkins, R., Giler, W., & Taylor, H. (1989). Fiber optic application for thermal switching in vanadium dioxide films. *Appl. Opt.*, 28, 4511.
- Lee, M. J., Park, Y., Suh, D. S., Lee, E. H., Seo, S., Kim, D. C., & Jung, R. (2007). Two Series Oxide Resistors Applicable to High Speed and High Density Nonvolatile Memory. *Adv. Mater.*, 19, 3919.
- Lee, M., Kim, M., & Song, H. (1996). Oxidation phase growth diagram of vanadium oxides film fabricated by rapid thermal annealing. *Thin Solid Films*, 30, 290.
- Lim, S., Long, J., & Xu, S. (2007). Nanocrystalline vanadium oxide films synthesized by plasma-assisted reactive rf sputtering deposition. *J. of Phys. D-Applied Physics*, 40, 1085–1090.
- Livage, J., Guzman, G., Beteille, F., & Davidson, P. (1997). Sol–gel synthesis of oxide materials. *J. Sol-gel Sci. and Technol.*, 8, 857.

- Lu, S., Hou, L., & Gan, F. (1996). Switching Properties and Phase Transition Mechanism of Mo⁶⁺-Doped Vanadium Dioxide Thin Films. *J. Mater. Sci. Lett.*, 15, 856.
- Lu, S., Hou, L., & Gan, F. (1997). Structure and optical property changes of sol-gel derived VO₂ thin films. *Adv. Mater.*, 9, 244.
- Luo, Z., Wu, Z., Xu, X., Wang, T., & Jiang, Y. (2011). Electrical and optical properties of nanostructured VOX thin films prepared by direct current magnetron reactive sputtering and post-annealing in oxygen. *Thin Solid Films*, 519.
- Manning, T., & Parkin, I. (2004). Atmospheric pressure chemical vapour deposition of tungsten doped vanadium(IV) oxide from VOCl₃, water and WCl₆. *J. Mater. Chem*, 14, 2554.
- Meng, L., Silva, R. A., Cui, H., Teixeira, V., Santos, M., & Xu, Z. (2006). Optical and structural properties of vanadium pentoxide films prepared by d.c. reactive magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 515.
- Meng, L., Silva, R., & H.N., C. (2006). Optical and structural properties of vanadium pentoxide films prepared by d.c. reactive magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 515, 195 –200.
- Miyazaki, H., Utsuno, F., Shigesato, Y., & Yasui, I. (1996). The structural characteristics of VO films prepared by He-introduced reactive RF unbalanced magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 281, 436.
- Morin, F. (1959). Oxides Which Show a Metal- To-Insulator Transition at the Neel Temperature. *Physical Review Letters*, 3.
- Mousavi, M., Khorrami, G. H., Kompany, A., & Yazdi, S. T. (2017). Structural, optical and electrochemical properties of F-doped vanadium oxide transparent semiconducting thin films. *Appl. Phys. A*, 755.
- Nagasawa, K., Bando, Y., & Takada, T. (1970). Growth and Magnetic Properties of V₈O₁₅ Single Crystals. *Japan. J. Appl. Phys.*, 9, 841.
- Ng, S. M. (2007). *Physics of Semiconductor Devices* (3 b.). Hoboken: NJ: John Wiley & Sons.
- Nicolian, E. H., & Brews, J. R. (1982). *Metal Oxide Semiconductor (MOS) Physics and Technology*. New York: John Wiley.
- Özdemir, M. C. (2014). Termokromik Özellik Gösteren Vanadyum Oksit Esaslı Ince Film Kaplamaların Sol - Jel Yöntemi ile Hazırlanması Ve Karakterizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul.

- Özer, N. (1997). Electrochemical properties of sol-gel deposited vanadium pentoxide films. *Thin Solid Films*, 305, 80-87.
- Pakma, O., Özaydın, C., Özden, Ş., Kariper, I. A., & Güllü, Ö. (2017). Synthesis and characterization of vanadium oxide thin films on different substrates. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28, 10909–10913.
- Ramanathan, S., & Changhyun, K. (2009). Dispersive capacitance and conductance across the phase transition boundary in metal-vanadium oxide-silicon devices. *Journal of Applied Physics*, 106, 034101.
- Ramanathan, S., & Ko, C. (2008). Stability of electrical switching properties in vanadium dioxide thin films under multiple thermal cycles across the phase transition boundary. *J. Appl. Phys.*, 104, 086105.
- Ramanathan, S., & Zhou, Y. (2013). Correlated Electron Materials and Field Effect Transistors for Logic: A Review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 38, 286-317.
- Roul, B., Kumar, M., Rajpalke, M., Bhat, T., & Krupanidhi, S. B. (2015). Binary group III-nitride based heterostructures: band offsets and transport properties. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 48.
- Sangwook, L., Kedar, H., Fan, Y., Jiawang, H., Changhyun, K., Joonki, S., . . . Junqiao, W. (2017). Anomalously low electronic thermal conductivity in metallic vanadium dioxide. *Solid State Physics*, 355, 371-374.
- Scherber, H. J., & Schlag, W. (2000). New sputter process for VO₂ thin films and examination with MIS-elements and C–V-measurements. *Thin Solid Films*, 366, 28-31.
- Simmons, J. G. (1967). Poole-Frenkel Effect and Schottky Effect in Metal-Insulator-Metal Systems. *Phys. Rev.*, 155, 657-660.
- Simon, M. (1981). *Physics of Semiconductor Devices*. New York: Wiley-Interscience.
- Sobhan, M., Kivaisi, R., Stjerna, C., & Granqvist, C. (1996). Thermochromism of sputter deposited W_xV_{1-x}O₂ films. *Solar Energy Mater. and Solar Cells*, 44, 451.
- Soltani, M., Chaker, M., Haddad, E., Kruzelecky, D., & Nikanpour, J. (2004). Optical switching of Vanadium dioxide thin films deposited by reactive pulsed laser Deposition. *J. Vac. Sci. technol. A*, 22, 859.
- Sönmezoğlu, S., Koç, M., & Akın, S. (2012). İnce Film Üretim Teknikleri. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(5), 389-404.

- Sze, S. M. (2007). *Physics of Semiconductor Physics*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Takahashi, T., Hibino, M., & Kudo, T. (1996). Thermochromic V_{1-x}W_xO₂ Thin Films Prepared by Wet Coating Using Polyvanadate Solutions. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 438, 35.
- Türhan, İ. (2008). Vanadyum Oksit ve Katkılı Vanadyum Oksit İnce Filmlerinin Hazırlanması Ve Karakterizasyonu. *Doktora Tezi*. İstanbul.
- Vinichenko, D. A., Zlomanova, V., Vasil'ev, V., & Seregin, D. (2011). Synthesis of Vanadium Dioxide Films by a Modified Sol–Gel Process. *Neorganicheskie Materialy*, 279-284.
- Wang, Y., Li, M., & Zhao, L. (2005). ; Phase compositions and resistance-temperature characteristic of VO_x thin films by magnetron sputtering. *Rare Met. Mater. Eng.*, 7, 1077.
- Warren, B. (1969). *X-ray Diffraction*. General Publishing Company.
- Warren, B. E. (1990). *X-Ray Diffraction*. Dover Publications.
- Wu, X., Lai, F., & L.M., L. (2008). Influence of thermal cycling on structural, optical and electrical properties of vanadium oxide thin films. *Applied Surface Science*, 255, 2840–2844.
- Xiao, D., Kim, K., & Zavada, J. (2005). Electrically programmable photonic crystal slab based on the metal-insulator transition in VO₂. *J. Appl. Phys.*, 97, 106102.
- Xu, J. F., Czerw, R., Webster, S., Carroll, D. L., Ballato, J., & Nesper, R. (2002). Nonlinear optical transmission in VO_x nanotubes and VO_x nanotube composites. *Appl. Phys. Lett.*, 81, 1711.
- Yavru, C. (2015). Nano Ölçekli Vanadyum Oksit İnce Filmlere Uygulanan Isıl İşlemin Film Yapısına Etkisinin Karakterizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*. Eskişehir.
- Yifu, Z., Min, Z., Meijuan, F., Chi, H., Chongxue, C., Yuliang, C., . . . Xinghai, L. (2011). Improvement of the electrochemical properties of V₃O₇:H₂O nanobelts for Li battery application through synthesis of V₃O₇@C core-shell nanostructured composites. *Current Applied Physics*, 11, 1159-1163.
- Yılmaz, E. (2017). Çözelti Yanma Senteziyle Üretilen Vanadyum Oksitlerin İnce Film Kaplanması Ve Optik Ve Elektrokimyasal Karakterizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul.
- Yin, D., Xu, N., Zhang, J., & Zheng, X. (1996). Staircase-like microstructure in vanadium oxide films. *Mater. Res. Bull.*, 31, 335.

- Zaitsev, R. O., Kuz'min, E. V., & Ovchinnikov, S. G. (1986). Fundamental ideas on metal-dielectric transitions in 3d-metal compounds. *Soviet Physics Uspekhi*, 29, 322-342.
- Zeghbroeck, B. V. (2011). *Principles of Semiconductor Devices*. Colorado: University of Colorado.

6. ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Yusuf BİLGİN
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Sivrice / 26.12.1978
Telefon : 0 (505) 298 45 06
e-mail : ysfbil@hotmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Siirt Atatürk Anadolu Lisesi	1996
Üniversite	: İnönü Üniversitesi	2002
Yüksek Lisans	: Gebze Teknik Üniversitesi	2008
Doktora	: Batman Üniversitesi	2019

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2004-2019	Milli Eğitim Bakanlığı	Fizik Öğretmeni

UZMANLIK ALANI

Sol-Gel Yöntemi, İnce Film, Çinko Oksit filmler, Vanadyum oksit filmler

YABANCI DİLLER

İngilizce