

**DİELEKTRİK İNCE FİMLERİN Si FOTODETEKTÖR AYGIT
PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIELECTRIC THIN
FILMS ON Si PHOTODETECTOR DEVICE PERFORMANCE**

LEVENT ÖZKARAYEL

DOÇ. DR. AKIN BACIOĞLU

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim - Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

NANOTEKNOLOJİ VE NANOTIP Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2022

ÖZET

DİELEKTRİK İNCE FİLMLEİN Sİ FOTODETEKTÖR AYGIT PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Levent ÖZKARAYEL

Yüksek Lisans, Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Akın BACIOĞLU

Ocak 2022, 90 sayfa

Bu çalışma Silisyum tabanlı fotodedektörlerde dielektrik ince filmlerin fotocevap ve karanlık akım gibi isterler üzerindeki etkisinin incelenmesini içermektedir. Silvaco yazılımı kullanılarak bilgisayar destekli modeller oluşturulmuş ve parametrik simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Detektör fotocevap performansının artırılması noktasında dielektrikler için yansıtma düzeyleri hesaplanmıştır. Silisyum ile olan uyum gözetilerek en başarılı yansıtma performansı 1.87 kırma indisli Si_3N_4 ince filmde elde edilmiştir. Dielektrik – yarıiletken arayüzeyindeki yük yoğunluğunun ölçülmesi yolu ile pasivasyon performansları incelenmiştir. Bu anlamda kapasitans – voltaj ölçümleri için simülasyonlar yapılmış ve deneysel çalışmalar öncesinde teorik zemin oluşturulmuştur. Islak termal oksidasyon, PECVD ve arındırma ile kuru termal oksidasyon gibi metotlarla büyütülen SiO_2 ince filmlerin pasivasyon performansları fotoiletkenlik ve kapasitans ölçümleriyle karşılaştırmalı olarak gerçekleştirilmiştir. Arındırma ile kuru oksitleme tekniğiyle büyütülmüş SiO_2 ince filmlerin Silisyum tabanlı aygıtlar için en başarılı pasivasyonu sağladığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Fotodedektör, Silisyum, Dielektrik, Yansıtma, Termal oksidasyon, PECVD, Pasivasyon, Fotoiletkenlik, CV ölçümü.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIELECTRIC THIN FILMS ON Si PHOTODETECTOR DEVICE PERFORMANCE

Levent ÖZKARAYEL

Master of Science, Department of Nanotechnology and Nanomedicine

Supervisor: Assoc. Prof. Akın BACIOĞLU

January 2022, 90 pages

This work contains the investigation of dielectric films effect on photoresponse and dark current in Silicon-based photodetectors. Computer-aided models were created using Silvaco software and parametric simulations were performed. Anti-reflection values were calculated for the dielectrics to increase the detector photo response performance. Considering the compatibility with Silicon, the most successful anti-reflection performance was obtained from Si_3N_4 thin film with refractive index of 1.87. Passivation performances were investigated by measuring the charge density at the dielectric-semiconductor interface. Simulations have been made for capacitance-voltage measurements and theoretical ground has been established before experimental studies. The passivation performances of SiO_2 thin films grown by methods such as wet thermal oxidation, PECVD and gettering dry thermal oxidation were compared with photoconductivity and capacitance measurement results. It has been observed that SiO_2 thin films grown by the gettering dry oxidation technique provide the most successful passivation for Silicon-based devices.

Keywords: Photodetector, Silicon, Dielectric, Anti - reflection, Thermal oxidation, PECVD, Passivation, Photoconductivity, CV measurement.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının oluşması için bana her türlü desteği veren, lisans yıllarından bu yana yarıiletken fiziğindeki teorik bilgi birikiminin oluşmasında büyük payı olan değerli hocam ve danışmanım sayın Doç. Dr. Akın Bacıoğlu'na,

Çalışma kapsamında kullandığım tüm fiziki olanakları sağlayan Bilkent Üniversitesi NANOTAM direktörü sayın Prof. Dr. Ekmel Özbay'a,

Hayatın her alanındaki bilgi birikimi ve iş yaşamında gösterdiği profesyonel liderlik ile birçok işin üstesinden başarıyla gelmemizi sağlayan Silikon Fotonik Teknolojiler müdürü sayın Dr. M. Cihan Çakır'a,

2009'dan itibaren lisansta, yüksek lisansta ve iş hayatında birlikte yol yürüdüğümüz çok değerli dostum Cem Alibeyoğlu'na,

Tez çalışması kapsamında karakterizasyon ölçümleri sırasında deneyimine başvurduğum, her zaman içtenlikle yardımcı olan arkadaşım Ferhat Uçar'a,

Birlikte çalışmaktan keyif aldığım, mikrofabrikasyon prosesleri sırasında desteklerini esirgemeyen ekip arkadaşlarım Hakan Yakupoğlu'na, Tolga Semiz'e, Gülşah Çelik'e ve tüm NANOTAM çalışanlarına,

Fotoiletkenlik ölçümleri için gerekli sistemi kullanma olanağı sağlayan GÜNAM direktörü sayın Prof. Dr. Raşit Turan'a ve sistemin kullanımında bana içtenlikle yardımcı olan Gence Bektaş'a,

Borcumu hiçbir zaman ödeyemeyecek olsam da, bugünlere onlarsız hiçbir şekilde gelemeyeceğimi bildiğim sevgili annem Bilgin Özkarayel, babam H. Rahmi Özkarayel ve canım kardeşim Kıvanç Özkarayel'e,

En değerli varlığım, canım eşim Büşra Özkarayel'e,

ve BAL'a ☺

en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. Giriş	1
2. Temel Bilgiler	5
2.1 Fotodedektör Teknolojisi ve Ardındaki Temel Yarıiletken Fiziği	5
2.1.1 PN / PIN Eklemi Yapıları ve Fotodedektör Teknolojisindeki Rollerini	8
2.1.2 Fotodedektör Performans Parametreleri	11
2.2 Dielektrik İnce Filmlerin Silisyum Tabanlı Fotodedektör Performans Parametrelerine Etkisi	15
2.2.1 Dielektrik İnce Filmlerin Yansıma Önleyici Katman Olarak Kullanılması	16
2.2.2 Dielektrik İnce Filmlerin Pasivasyon Amacıyla Kullanılması	18
3. Mikrofabrikasyon Teknikleri	26
3.1 Fotolitografi	26
3.2 İnce Film Kaplama Teknikleri	29
3.2.1 Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme (PECVD)	29
3.2.2 Islak Termal Oksit Büyütme.....	31
3.2.3 Arındırma Kuru Termal Oksit Büyütme.....	34
3.2.4 Elektron Demeti ile Buharlaştırma	35
4. Karakterizasyon Teknikleri.....	37

4.1	Prob İstasyonu Düzeneği	37
4.2	Kapasitans – Voltaj (CV) Ölçümü	37
4.3	Sanki Kararlı Durum Fotoiletkenlik Ölçümü	38
5.	Simülasyon Çalışmaları	40
5.1	Dielektrik İnce Filmlerin Yansıma Önleyici Performanslarının İncelenmesi	42
5.1.1	Dielektrik Kırma İndisinin Etkisi	44
5.1.2	Dielektrik Kalınlığının Etkisi	46
5.1.3	Dielektrik Materyalinin Etkisi	48
5.1.4	Çalışma Özeti	50
5.2	Dielektrik İnce Filmlerin Pasivasyon Performanslarının İncelenmesi	50
5.2.1	Arayüzey Yük Yoğunluğunun Etkisi	54
5.2.2	Dielektrik Kalınlığının Etkisi	55
5.2.3	Dielektrik Materyalinin Etkisi	57
5.2.4	Yapılan Diğer Parametrik Simülasyonlar ve Çalışma Özeti	58
6.	DeneySEL Çalışmalar	62
6.1	Islak Termal Oksit Kaplama Prosesleri (Grup A Örnekleri)	62
6.2	PECVD Kaplama Prosesleri (Grup B Örnekleri)	64
6.2.1	SiO ₂ Kaplama Prosesleri (Grup B-1 Örnekleri)	64
6.2.2	Si ₃ N ₄ Kaplama Prosesleri (Grup B-2 Örnekleri)	65
6.3	Arındırma Kuru Termal Oksit Kaplama Prosesleri (Grup C Örnekleri)	66
6.4	Hızlı Isıl İşlem (Tavlama) ile Yüzey İyileştirme Prosesleri	67
6.5	Kapasitans – Voltaj Ölçümleri İçin Elektriksel Kontak Oluşturma Prosesleri	68
6.5.1	Fotolitografi ile Desenleme Prosesleri	68
6.5.2	Metal Kaplama Prosesleri	72
7.	Karakterizasyon Ölçümleri ve DeneySEL Sonuçlar	75

7.1	Sanki Kararlı Durum Fotoiletkenlik Ölçümleri	75
7.2	Kapasitans – Voltaj (CV) Ölçümleri	80
8.	Sonuç.....	84
KAYNAKLAR.....		86
ÖZGEÇMİŞ.....		

ŞEKİLLER

Şekil 2-1	Bir yarıiletkenin enerji bant diyagramı ve elektron – boşluk çifti üretim süreçleri ve yeniden birleşme.	6
Şekil 2-2	PN eklemının enerji bant diyagramı.	9
Şekil 2-3	Ters besleme altındaki PIN eklemının enerji bant diyagramı [12].	10
Şekil 2-4	Tipik bir fotodiyot için spektral fotocevap grafiği ve ideal durum eğrisi ile karşılaştırmalı gösterim [6].	13
Şekil 2-5	Hava – Dielektrik ve Dielektrik – Silisyum arayüzeylerinde gerçekleşen yansımaların yıkıcı ve yapıcı girişimleri.	17
Şekil 2-6	Silisyum yüzeyindeki bağ yapmamış atomlar ve dielektrik kaplama sonrasında N ve H atomlarıyla yapılan bağlar ile yüzeyin elektriksel olarak pasivize edilmesi [11].	18
Şekil 2-7	PIN tipi bir fotodedektörde yüzey pasivasyonu ve yansıma önleyici amacıyla kullanılan dielektrikler.	19
Şekil 2-8	Bir SiO ₂ dielektrik filmde bulunan dört tip yük kaynağı [28].	20
Şekil 2-9	Dielektrik ince film karakterizasyonu için hazırlanması gereken örneğin kesit görünümü ve CV ölçümlerinde kullanılan elektriksel devre şeması.	21
Şekil 2-10	N tipi bir silisyum alttaş üzerindeki MOS yapısı için tipik CV grafiği [31].	22
Şekil 2-11	Birikim (accumulation) bölgesinde Metal – Yarıiletken arasındaki elektriksel yük dağılımı ve dielektrik ince filmin kapasitif etkisi.	23
Şekil 2-12	Terslenim (inversion) bölgesinde metal – dielektrik ve dielektrik - yarıiletken arasındaki elektriksel yük dağılımı ve dielektrik ince filmin kapasitif etkisi.	24
Şekil 2-13	MOS yapının a) birikim b) tükenme c) terslenim bölgelerindeki enerji bant diyagramı [32].	24
Şekil 3-1	Pozitif ve negatif tonlu fotorezistler için ayrışan fotolitografi proses adımlarının şematik gösterimi.	27
Şekil 3-2	Negatif tonlu fotorezist ile litografi ve ince film kaplama prosesleri. ...	28
Şekil 3-3	PECVD ince film kaplama tekniğinin şematik gösterimi [40].	30

Şekil 3-4	PECVD tekniğinde büyütmenin ilk aşamalarında başlayan 3 boyutlu ve ardından devam eden 2 boyutlu ince film büyüme karakterinin şematik gösterimi.	31
Şekil 3-5	Yüksek sıcaklık fırınında uygulanan termal oksidasyon proses şematigi [43].	32
Şekil 3-6	Silisyum dioksit ince filmin silisyum alttaş yüzeyinde büyüme mekanizmasının kesit görünümü.	33
Şekil 3-7	Islak termal oksit prosesinde oksit büyüme hızını gösteren simülasyon grafiği.	34
Şekil 3-8	Elektron demeti ile buharlaştırma tekniğinin şematik gösterimi. [49] .	36
Şekil 4-1	Prob istasyonu düzeneğinin şematik görünümü [51].	37
Şekil 4-2	Prob istasyonu ve CV analizörün elektriksel bağlantıları [52].	38
Şekil 4-3	Sanki kararlı durum fotoiletkenlik deney düzeneğinin şematik görünümü [57].	39
Şekil 5-1	Simülasyon çalışmalarının yapıldığı Silvaco yazılımında model kodlamalarının girildiği "Deckbuild" penceresinin görünümü.	41
Şekil 5-2	Si ₃ N ₄ yansıtma ince filmin yansıma performansına etkisi.	43
Şekil 5-3	1.50, 1.75, 1.87 ve 2.00 kırma indisine sahip silisyum yüzeyinden 400 – 1200 nm dalgaboyu arasındaki yansıma değerleri.	45
Şekil 5-4	Kırma indisi 2.00 ve 2.40 aralığında değişen dielektrik ince film için yansıtıcılık eğrileri.	46
Şekil 5-5	Kalınlıkları 60 – 120 nm aralığında değişen Si ₃ N ₄ dielektrik tabakalarının 400 – 1200 nm dalgaboyu aralığında hesaplatılan yansıtıcılık değerleri.	47
Şekil 5-6	Si ₃ N ₄ , SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , HfO ₂ ve Si ₂ N ₂ O dielektrik malzemelerinin 400 – 1200 nm dalgaboyu aralığındaki yansıtıcılık değerleri.	49
Şekil 5-7	Termal SiO ₂ pasivasyon ince film katmanı bulunan fotodedektörün kesiti.	51
Şekil 5-8	Pasivasyon tabakasına sahip olan ve olmayan fotodedektör modellerinin simülasyon hesaplamaları sonucunda elde edilen IV grafikleri.	52
Şekil 5-9	Farklı arayüzey yük yoğunlukları için yapılan simülasyonlar sonucunda çizilen CV grafikleri.	54

Şekil 5-10	Farklı kalınlıklardaki dielektrikler için yapılan simülasyonlar sonucunda oluşturulan CV grafikleri.....	56
Şekil 5-11	SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , Al ₂ O ₃ ve HfO ₂ dielektrik malzemelerinin -2 / +2 V değer aralığındaki kapasitans – voltaj grafikleri.	57
Şekil 5-12	Farklı n tipi arka plan konsantrasyon değerleri için yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen CV grafikleri.	59
Şekil 5-13	Farklı frekans değerleri için yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen CV grafikleri.	60
Şekil 6-1	Islak termal oksit kaplama prosesinin deney düzeneğinden bir görüntü.	63
Şekil 6-2	Islak termal oksidasyon prosesinden çıkan 4" Silisyum alttaşın görüntüsü.....	64
Şekil 6-3	PECVD SiO ₂ kaplama prosesi sonrasında silisyum alttaşın görüntüsü.	65
Şekil 6-4	PECVD Si ₃ N ₄ kaplama prosesi sonrasında silisyum alttaşın görüntüsü. (n=1,87 / 135 nm)	66
Şekil 6-5	Arındırma kuru termal oksit kaplama prosesinde zamana bağlı uygulanan sıcaklık profili grafiği.	66
Şekil 6-6	Hızlı ısıtma işlem proseslerinin gerçekleştirildiği Allwin AW-810 sistemi. 68	
Şekil 6-7	Döndürücü sisteminde örneğin üst yüzeyinin fotorezist malzeme ile kaplanması.	69
Şekil 6-8	Fotorezist kurutma işlemlerinin yapıldığı sıcak tabla.	70
Şekil 6-9	Hizalama ve UV ışık ile pozlama işlemlerinin yapıldığı MA6 sistemi. 70	
Şekil 6-10	MA6 sistemine yüklenen örneğin görüntüsü.	71
Şekil 6-11	MA6 sisteminde kullanılan fotolitografi maskesindeki CV kontak desenleri. (Çap büyüklükleri soldan sağa: 100, 250 ve 500 µm'dir.)..	71
Şekil 6-12	Fotolitografi sonrasında CV ölçümü için atılan kontak açıklıklarının optik mikroskop görüntüsü.....	72
Şekil 6-13	Kontakt metal kaplama proseslerinin gerçekleştirildiği fiziksel buhar biriktirme sistemi.	73
Şekil 6-14	Aseton içerisinde yapılmaya devam eden fotorezist kaldırma işleminden bir görüntü.	74
Şekil 6-15	Metalizasyon ve kaldırma işlemi sonrasında CV ölçümü için oluşturulan alüminyum kontakların optik mikroskop görüntüsü.....	74

Şekil 7-1	Sinton WCT-120 sisteminin ölçüm tablasına alttaş yerleştirilmiş durumdaki görünümü.....	76
Şekil 7-2	Sinton ölçüm sisteminden elde edilen tipik bir grafik.	77
Şekil 7-3	Prob istasyonunda yapılan Kapasitans – Voltaj ölçümü esnasında çekilmiş fotoğraf.....	80
Şekil 7-4	Islak termal oksidasyon (A/1 ve A/2) örneklerinin 1kHz frekansta kapasitans – voltaj ölçüm grafikleri.	81
Şekil 7-5	PECVD (B-1 / 3 ve B-1 / 4) örneklerinin kapasitans – voltaj ölçüm grafikleri.	82
Şekil 7-6	Arındırma ile kuru oksidasyon (C / 9 ve C / 10) örneklerinin kapasitans – voltaj ölçüm grafikleri.	83

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$h\nu$	Foton enerjisi
E_g	Yasak enerji bant aralığı
E_c	İletkenlik bantı alt enerji seviyesi
E_f	Fermi enerji seviyesi
E_v	Değerlik bantı üst enerji seviyesi
$+N_d$	Donör atom yoğunluğu
$-N_a$	Akseptör atom yoğunluğu
G_{th}	Termal uyarım ile iletkenlik bandına geçiş
G_L	Foton uyarımı ile iletkenlik bandına geçiş
R	Rekombinasyon ile değerlik bandına geçiş
h^+	Boşluk
e^-	Elektron
E	Elektrik alan
I_{ph}	Fotoakım
η	Kuantum verimlilik
e	Elektron yükü
P_0	Optik güç
h	Planck sabiti
R	Fotocevap (Responsivity)
λ	Dalgaboyu
λ_g	Soğurulan sınır dalgaboyu
n	Kırma indisi
R	Yansıma
d	Kalınlık
p^+	p tipi katkılama
n^+	n tipi katkılama
V	Gerilim

Kısaltmalar

eV	Elektronvolt
nm	Nanometre
μm	Mikrometre
mm	Milimetre
UV	Morötesi
CV	Kapasitans – Voltaj
QE	Kauntum Verimlilik
NEP	Gürültü Eşdeğer Gücü
Si	Silisyum
SiO ₂	Silisyum dioksit
Si ₃ N ₄	Silisyum nitrür
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
HfO ₂	Hafniyum oksit
Si ₂ N ₂ O	Oksinitrür
DI	Deiyonize
H ₂ O ₂	Hidrojen peroksit
UV	Ultraviyole
RF	Radyo frekans
TiO ₂	Titanyum dioksit
PECVD	Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme
CVD	Kimyasal buhar biriktirme
PVD	Fiziksel buhar biriktirme
RTP	Hızlı termal proses
SiH ₄	Silan
N ₂ O	Nitrür oksit
NH ₃	Amonyak
NaOH	Sodyum hidroksit
MOS	Metal Oksit Yarıiletken

1. Giriş

Silisyum, bilgisayar teknolojisinin temelini oluşturan ve bütün yarıiletken literatürünün tarihsel gelişimi süresince lokomotif görevi görmüş bir malzemedir. Bununla birlikte halen yarıiletken teknolojisini sırtlayan, üzerinde güncel araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin devam ettiği bir doğal element olarak karşımıza çıkmaktadır. Silisyum malzemesi üzerinde transistör, tristör, diyot ve fotodedektör gibi çok çeşitli teknolojiler geliştirilmiş ve halen geliştirilmektedir. Silisyum tabanlı fotodedektörler ise yarıiletken teknolojisinde güncel ticari değeri halen sürmekte olan önemli bir çalışma alanını oluşturmaktadır.

Yarıiletken eklemlerde PIN yapının keşfiyle birlikte ilk silisyum tabanlı fotodedektör üretimi 1950 yılına uzanmaktadır [1]. O tarihten bu yana akademik anlamda fotodedektör performans parametrelerinin iyileştirilmesine yönelik yapılan çalışmaları hem motivasyonel hem de finansal anlamda kamçılayan gerçeklik; teknolojinin ulaştığı bugünkü noktada, fotodedektörlerin geniş bir ihtiyaçlar skalasında halen kullanılıyor olmasıdır. Bu skala: telekomünikasyon, çevresel algılama, ölçüm ve güvenlik gibi temel başlıkları içermektedir. Silisyum tabanlı fotodedektörler ise malzemenin izin verdiği görünür bölge ve kızılötesi dalgaboylarında algılama kabiliyeti ile hem askeri hem de sivil alanda aktif olarak kullanılmaktadır [2].

Bir fotodedektörün yaptığı iş üç temel aşamada incelenebilir: (1) gelen ışığın soğurulmasıyla yarıiletkende taşıyıcı oluşumu, (2) oluşan bu taşıyıcıların elektrik alan vasıtasıyla yarıiletken içerisinde taşınımı, (3) taşıyıcıların elektriksel kontaklar yoluyla toplanarak dış devre akımına katkı sunması. Bu üç temel çalışma safhası göz önünde tutularak bakıldığında, bir fotodedektörün; çalışma dalgaboyunda yüksek algılama hassasiyeti, yüksek fotocevap hızı ve düşük elektriksel gürültü gibi performans parametrelerini sağlaması beklenmekte ve hedeflenmektedir [3].

Fotodedektörler taşıyıcı soğurma biçimlerine göre termal ve foton dedektörler olmak üzere iki temel sınıfa ayrılır. Termal dedektörler malzemenin ışığı soğurması sonucu oluşan sıcaklık yükselişini algılayarak, foton dedektörler kuantum fotoelektrik etkiye dayanan bir çalışma biçimine sahiptir [4]. Foton tipi dedektörler ticari pazarda daha yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır [3].

Fotodedektörlerin performans parametrelerini iyileştirme noktasında yarıiletken fiziğini temel alan çok çeşitli optimizasyon faaliyetleri yürütülmesi mümkündür. Fotocevap ve kaçak akım gibi performans parametrelerinin iyileştirilmesi amacıyla doğrudan yarıiletken malzemesinin özellikleri üzerinde optimizasyon faaliyetleri yürütülebileceği gibi çeşitli mikrofabrikasyon teknikleri ile uygulanan metal kontak, katkılama bölgeleri veya dielektrik ince film gibi ikincil bileşenlerin iyileştirilmesi üzerine de çalışılabilir. Bu tez çalışmasında yarıiletken sanayiinde üretimi aktif olarak devam eden, performans parametreleri bazında uluslararası akademik rekabetin sürmekte olduğu silisyum fotodedektör teknolojisinin önemli bir bileşeni olan dielektrik ince filmlerin ele alınması ve aygıtın nihai performansına olan katkısı çerçevesinde yapılabilecek iyileştirme faaliyetlerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda dielektriğin sahip olduğu özelliklerin belirleyici olduğu iki nihai aygıt performans parametresi: fotocevap ve karanlık akım inceleme altına alınmıştır. Bu parametrelerin dielektrik özelliklerine bağlılığı sistematik olarak incelenmiş ve her bir parametre için yürütülen çalışmalar ayrı bir çalışma konusu içerisine dâhil edilmiştir. Çalışmanın belli bir olgunluk düzeyine erişmesiyle birlikte tüm çalışma konularının birbiriyle ilişkileri irdelenmiş ve nihai düzeyde en verimli yapının oluşturulması amaçlanmıştır.

Tez çalışması bilgisayar destekli simülasyon çıktılarının sağladığı zeminin üzerine bina edilmiştir. Öncelikli hareket noktası olarak simülasyonlar için modeller geliştirilmiş ve deneysel çalışmalara rehberlik edecek olan temel parametre ilişkilerinin anlaşılması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda simülasyon çalışmaları parametrik olarak, tek bir parametrenin inceleme altına alınması ve modelin diğer tüm parametrelerinin sabit tutulması yoluyla gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmalarındaki temel amaç: yeni bulgulara ulaşmak olduğu gibi deneysel çalışmalar öncesinde, deneyde kat edilecek yolu anlamak, öğrenmek ve tanımak gibi faaliyetleri de içermiştir. Simülasyonlar ile oluşturulan temel zeminin üzerinde yükselen deneysel çalışmalar ile dielektrik ince film özelliklerinin fotodedektör aygıtlarda beklenen performans parametreleri nezdinde ne yönde iyileştirilebileceği analiz edilmiştir.

Böyle bir akademik yaklaşımla, dielektrik özellikleri yansıtma ve pasivasyon olmak üzere iki ana başlık altında parametrik olarak incelenmiş ve kırma indisi, dielektrik kalınlığı, dielektrik materyali ve ara yüzey yük yoğunluğu gibi özelliklerin

etkileri incelenmiştir. Daha sonra PECVD ince film kaplama, kuru ve ıslak termal oksidasyon, fotolitografi, elektron demeti ile buharlaştırma ile metalizasyon ve kaldırma gibi temel mikrofabrikasyon basamaklarının uygulanmasıyla geliştirilen deneysel örnekler üzerinde karakterizasyon ölçümleri yapılarak simülasyonların gerçek dünyadaki karşılıkları belirlenmiştir. Fotoiletkenlik ve kapasitans ölçümleri yapılmış ve ortaya çıkan tüm veri setlerinin simülasyon sonuçlarının oluşturduğu zemin üzerinde karşılaştırılması imkanına ulaşılmıştır.

Dielektrik yansıtma performansına yönelik yapılan çalışmalar, simülasyon sonuçlarının ortaya konmasıyla birlikte tamamlanmıştır. Literatürde daha az yer kapladığı görülen pasivasyon performansına yönelik ise hem simülasyon hem de deneysel çalışmalar yürütülerek literatüre bu alanda katkı sunulması hedeflenmiştir.

Bölüm 2’de fotodedektör teknolojisi, yarıiletken eklem yapıları, aygıt performans parametreleri, silisyum tabanlı fotodedektörler, dielektriklerin nihai aygıt performansına etkisi gibi konular teorik olarak ele alınmış ve literatürde yer bulan bilgiler derlenerek aktarılmıştır.

Bölüm 3’te deneysel çalışmalar sırasında başvurulan temel mikrofabrikasyon tekniklerine, bu tekniklerin pratik uygulamalarına ve ilgili cihazların çalışma prensiplerine dair açıklamalara yer verilmiştir.

Bölüm 4’te deneysel örnekler üzerinde gerçekleştirilen karakterizasyon metotları aktarılmış ve ölçüm sistemlerinin kullanımı ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Bölüm 5’te bütün bir tez çalışmasının zeminini oluşturan simülasyon çalışmaları aktarılmıştır. Bu bölümde öncelikle simülasyon uygulama metodunun detaylarına yer verilmiş, kullanılan yazılımın kabiliyetlerinden bahsedilmiş ve parametrik olarak gerçekleştirilen tüm çalışmalar teknik karmaşıklığa uygun sırayla detaylandırılmıştır.

Bölüm 6’da deneysel örneklerin hazırlanışına dair proses bilgilerine yer verilmiştir. Bu bölümde dielektrik büyütme tekniğini merkeze alan bir yaklaşımla uygulanan prosesler, cihazlar, reçeteler ve diğer deneysel ayrıntılar aktarılmıştır.

Bölüm 7’de fotoiletkenlik ve kapasitans ölçümleri olmak üzere deneysel örnekler üzerinde yapılan karakterizasyon ölçümlerine yer verilmiş, ölçüm sonuçları aktarılmış ve dielektrik ince filmlerin pasivasyon performansları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma ve sonuçların yorumlanmasında, her iki ölçüm tekniğinin sonuçlarının

birbiri ile karşılaştırılmasının yanı sıra simülasyon çalışmaları neticesinde elde edilen bilgilerin de rehberliğine başvurulmuş ve değerlendirmeleri yapılmıştır.

Son olarak Bölüm 8'de bütün bir tez çalışmasının nihai sonucu yorumlanmış ve gelecek çalışmaların ne yönde ilerletilmesi gerektiğine dair önerilere yer verilmiştir.

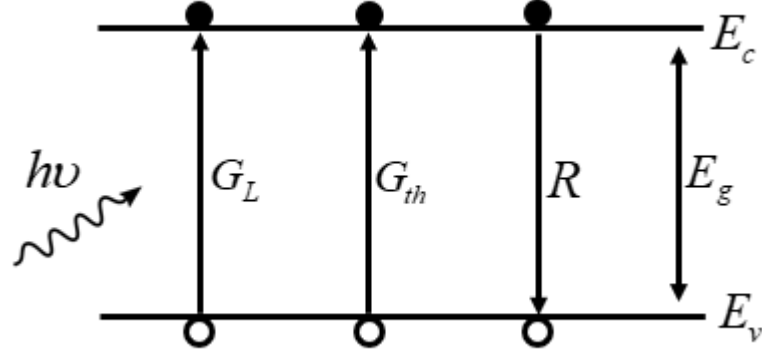
2. Temel Bilgiler

2.1 Fotodedektör Teknolojisi ve Ardındaki Temel Yarıiletken Fiziği

Fotodedektörler, yarıiletken fiziği ve teknolojisini temel alan ışık veya diğer elektromanyetik radyasyon sensörleridir. Fizikte “fotoelektrik etki” olarak bilinen fenomeni temel alan bir çalışma teknolojisine sahiptir. Elektromanyetik sinyalin taşıyıcısı olan fotonlar, yarıiletken malzeme içerisine girdiklerinde soğurular ve elektron – boşluk çiftlerini oluştururlar. Özel olarak katkılanarak elektriksel olarak manipüle edilmiş olan yarıiletken malzemenin PN eklemi yapısı ve besleme voltajı aracılığıyla oluşturulan akım vasıtasıyla taşınan elektron – boşluk çiftleri bir dış devre akımı oluşturur. Bu sayede fotonlar bir elektrik sinyaline dönüştürülmüş olur. Basit olarak: foton yoğunluğu arttıkça üretilen serbest elektron – boşluk yoğunluğu artar ve bu da elektrik sinyalinin güçlenmesine sebep olur. Bu sayede yarıiletken malzeme özelliklerinin izin verdiği ölçüde, ışık şiddetine neredeyse çizgisel bağlı olarak artan bir fotoakım elde edilir.

Fotoelektrik etki tüm malzemelerde oluşabilir. Opak cisimlerin ışığı geçirmiyor oluşlarının arkasındaki fizik; bu malzemenin ışığı soğuruyor olmasındandır. Tam tersi olarak saydam cisimler ise görünür bölge ışığı ile etkileşmez ve dolayısıyla ışığı soğurmazlar. Işığın malzeme tarafından soğurulması yapısındaki kimyasal bağlarla ilişkilidir [5].

Yarıiletken malzemeleri özel kılan ise elektriksel özelliklerinin kolay şekilde manipüle edilebilir olması ve ışık tarafından soğurulan elektronların basit şekilde serbest elektron gazı oluşturup iletkenliğe katkı sağlayabilir olmasındandır. Yarıiletken malzemelerin enerji bant diyagramlarında bulunan yasak enerji aralığı fotonların son yörünge elektronlarına aktaracakları enerji ile (1 – 5 eV) aşılabilecek seviyededir [6].



Şekil 2-1 Bir yarıiletkenin enerji bant diyagramı ve elektron – boşluk çifti üretim süreçleri ve yeniden birleşme.

Şekil 2-1’de bir yarıiletkenin son yörünge elektronlarının bulunduğu değerlik bandının üst enerji düzeyi E_v , serbest elektron gazının alt enerji düzeyi E_c ve bu düzeyler arasında bulunan yasak enerji seviyesi E_g olarak gösterilmiştir. Malzeme içerisine giren ışığın sahip olduğu enerji ise $h\nu$ olarak verilmiştir. Tek bir fotonun soğurulması için gerekli şart aşağıda formülize edilmiştir:

$$h\nu \geq E_g \quad (2-1)$$

Yarıiletkenlerde soğurmanın meydana gelmesi için foton enerjisi, yasak enerji bant aralığından daha büyük ya da eşit olmalıdır. Bu şart gerçekleştiğinde değerlik bandındaki elektronlardan biri enerji engelini aşarak iletkenlik bandına geçer ve serbest elektron gazı içerisine karışarak iletkenliğe katkı sağlar. Şekil 2-1’de foton soğurulması yolu ile değerlik bandından iletkenlik bandına geçen elektron hareketi G_L olarak gösterilmiştir.

Yarıiletken malzemelerde ortamda ışık olmasa dahi yasak enerji aralığını aşarak iletkenlik bandına geçen birçok elektron söz konusudur. Bu geçiş için yarıiletken malzemelere özgü olacak şekilde değerlik elektronlarına aktarılabilecek küçük bir enerji miktarı (1 – 5 eV) yeterli olmaktadır. Bu enerji, ortamda ışığın olmadığı durumda, malzemenin sahip olduğu ısı enerjisinden gelmektedir [7]. Örgü fononları, sahip oldukları termal enerji ile sürekli titreşirler ve etraflarındaki değerlik elektronlarını bu etki ile uyararak iletkenlik bandına geçmelerine sebep olurlar. Bu üretim

mekanizması ise Şekil 2-1'de G_{th} olarak gösterilmiştir. G_{th} geçiş olasılığı, malzemenin sıcaklığının yükselmesi durumunda fonon enerjileri de yükseleceği için artacaktır. Bu geçiş mekanizması termal dengedeki bir yarıiletkende baskın durumdadır [8]. Ancak dışarıdan bir etki olmadığı durumda tüm yarıiletkenler termal denge konumundadır ve fiziksel gözlemlerimiz termal etkilerle iletkenlik bandına geçen elektronların da yarıiletken içerisindeki elektriksel dengeyi bozmadıklarını göstermektedir [7]. Dengeyi sağlayan mekanizma yeniden birleşme mekanizmasıdır. Değerlik bandından iletkenlik bandına geçen elektronlar olduğu gibi, iletkenlik bandından değerlik bandına geçerek yapının kovalent bağlarına geri dönen elektronlar da bulunmaktadır [3]. Bu mekanizma Şekil 2-1'de R olarak gösterilmiştir.

Işığın olmadığı ortamda bulunan denge halindeki bir yarıiletkende termal üretim ile yeniden birleşme aynı oranda gerçekleşir.

$$G_{th} = R \quad (2-2)$$

Yarıiletken ışık ortamına sokulduğu anda G_L geçiş mekanizması etkinleşir ve denge bozulur. Ancak bu durum kısa bir süre için geçerlidir. Bir süre sonra G_L mekanizması daha etkin olmasına rağmen denge yeniden sağlanır.

$$G_L + G_{th} = R \quad (2-3)$$

Bu durumda, ortamda bulunan ışık, yarıiletken içerisinde elektron – boşluk çiftleri oluşturuyor fakat bu yükler oluştuğundan kısa bir süre sonra rekombine olmaktadır. Işık ile üretilen elektron – boşluk çiftlerinin yeniden birleşmelerini önlemenin yolu; onları konumsal olarak ayırmaktan geçmektedir.

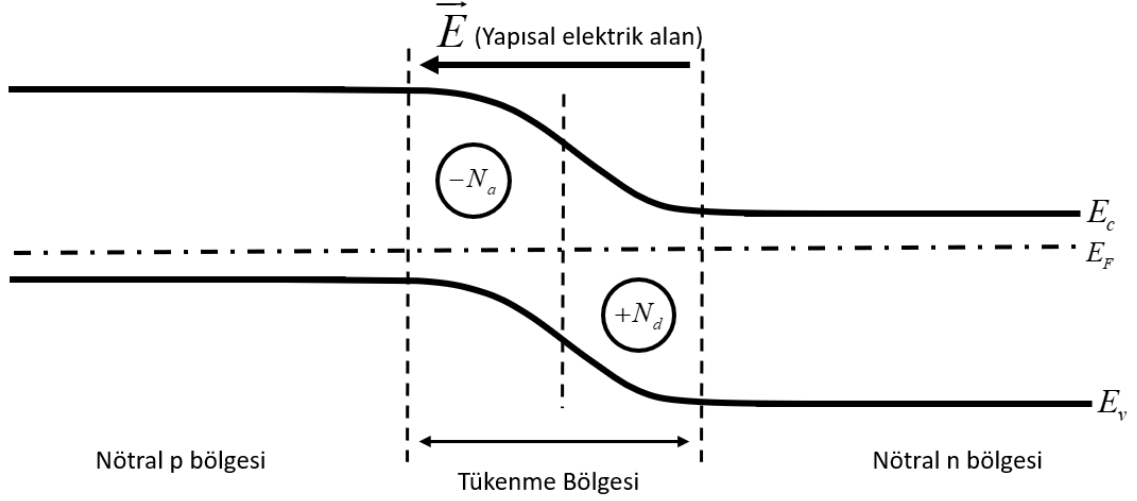
Elektron ve boşluk zıt işaretli elektriksel yüklere sahiptir. Elektrik alan altında hızlanmaları farklı yönlerde gerçekleşmektedir. Eğer yarıiletken içerisinde bir elektriksel alan oluşturulabilirse, foton soğurma yoluyla oluşan elektron – boşluk çiftleri elektrik alan altında farklı yönlere doğru etkiyen kuvvetin etkisi altında hızlanacak ve konumsal olarak ayrışacaklardır. Bu sayede üretim ve yeniden birleşme dengesi bozulacak ve yarıiletken içerisinde net yük oluşabilecektir. Yarıiletken içerisinde elektrik alan oluşturmanın yolu ise PN eklem yapısıdır [9].

2.1.1 PN / PIN Eklemleri Yapıları ve Fotodetektör Teknolojisindeki Rollerini

Yarıiletken malzemelerin elektriksel özellikleri katkılama yoluyla değiştirilebilmektedir. Örneğin 4A grubu elementi olan ve dolayısıyla son yörüngesinde bulunan elektronlarla kristal örgü içerisinde 4 kovalent bağ yapan silisyum örgünün p tipi ve n tipi katkılanması mümkündür. Katkılama tipi kristal içerisine gelen yükün elektriksel özelliğiyle ilgilidir. Silisyumun 3 bağ yapabilen 3A grubu elementi ile veya 5 bağ yapabilen 5A grubu elementi ile katkılanması sonucunda serbest elektron konsantrasyonu değiştirilebilir [10].

P tipi ve n tipi katkılama prosesleri, yarıiletkenin enerji bant diyagramında değişikliklere neden olur. Değişen ilk parametre yarıiletken Fermi düzeyleridir. Fermi düzeyi elektron bulunma olasılığının $\frac{1}{2}$ olduğu enerji seviyesidir. Katkısız bir yarıiletkenin Fermi düzeyi yasak enerji bant diyagramının ortasına tekabül eder. Katkılama durumunda ise Fermi düzeyi katkılamanın türüne bağlı olarak iletkenlik ya da değerlik bantlarına doğru kayar.

P tipi katkılama sonucunda serbest boşluk sayısında bir artış olur. Bu durumda Fermi düzeyi değerlik bandına doğru kayar. N tipi katkılama sonucunda ise serbest elektron sayısında bir artış olur. Bu durumda ise Fermi düzeyi iletkenlik bandına doğru kayar. P tipi ve n tipi olarak katkılanmış yarıiletkenlerin elektriksel özellikleri farklılaşmaktadır. PN yapıda hem p hem de n türü katkılama yer alır [8] ve bu yarıiletkende sadece tek bir Fermi düzeyinden bahsedilebilir. P ve n tipi katkılı yarıiletkenlerin enerji bant diyagramı Fermi düzeylerinin eşitleneceği şekilde yeniden düzenlenir. Fermi düzeylerinin eşitlenmesi sonucunda diğer tüm enerji bantları fermi düzeyini referans alarak yeniden şekillenecektir.

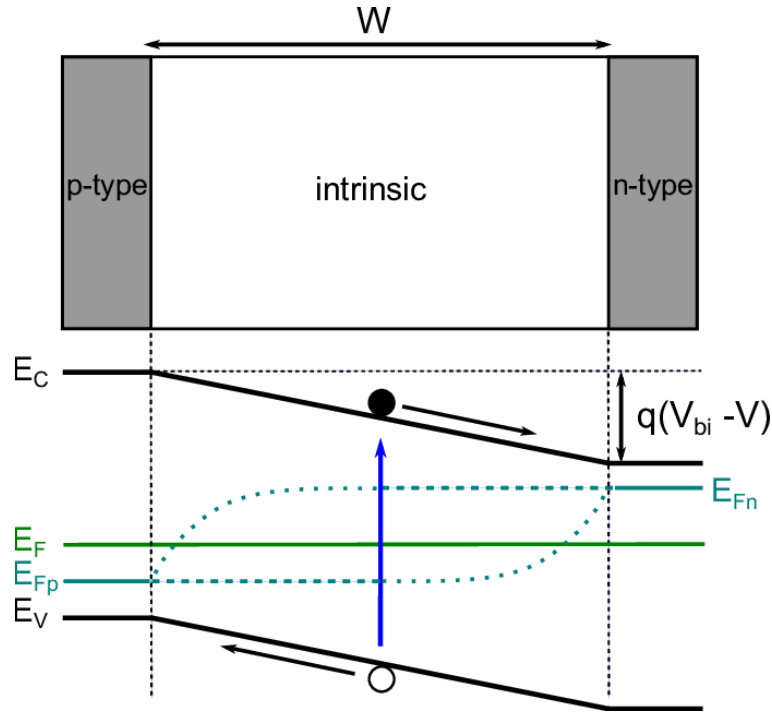


Şekil 2-2 PN eklemının enerji bant diyagramı.

Düşünsel bir teorik yaklaşımla p ve n tipi katkı yarıiletkenler birleştirildiğinde n katkı yarıiletkenin elektronları difüzyon kuvveti ile p bölgesine girerek p katkı yarıiletkenin boşlukları ile yeniden birleşir ve tükenme bölgesini oluşturmaya başlarlar. Elektron ve boşluk taşıyıcılarının birleşmesi (+) yüklü N_d donör atomlarının ve (-) yüklü N_a alıcı atomlarının oluşmasına neden olur. Taşıyıcılarını kaybetmeye başlayan bu çakılı atomlar sebebiyle bir elektrik alanı oluşmaya başlar. Oluşan elektrik alan elektron – boşluk çiftlerinin bir araya gelmesini sağlayan difüzyon kuvvetinin tersi yöne doğru taşıyıcıları sürüklenme eğilimindedir. Şekil 2-2’de görülen tükenme bölgesinin genişliğini belirleyen etki bu iki kuvvetin denge noktasıdır. Taşıyıcıları rekombinasyona iten ve dolayısıyla tükenme bölgesini genişletme eğiliminde olan difüzyon akımıyla, taşıyıcı sürüklenmesini engelleyen ve dolayısıyla tükenme bölgesini daraltma eğiliminde olan drift akımının birbirini dengelemesiyle taşıyıcı hareketi durur. Denge durumunda tükenme bölgesi genişliği kararlı hale gelmiştir. Nötral n ve nötral p bölgesindeki serbest taşıyıcılar elektrik alanın varlığı nedeniyle tükenme bölgesine giremezler. Daha doğru kuantum fiziksel yaklaşımla bakıldığında tükenme bölgesine giren ve çıkan taşıyıcı yoğunlukları birbirine eşittir. Denge korunur [11].

Fotodedektör fiziği açısından değerlendirildiğinde PN eklemi ile birlikte artık elektron – boşluk çiftlerinin birbirinden ayrıştırılması mümkün hale gelmiştir. Şekil 2-2’de görülen PN eklemının tükenme bölgesi fotodedektör teknolojisi için soğurma bölgesi olarak kabul edilir. Fotonların bu bölgede soğurulması durumunda kurulu elektrik

alanın varlığı nedeniyle elektron – boşluk çiftleri birbirinden fiziksel olarak uzaklaşır ve dış devre akımı oluşturur. Nötral p ve nötral n bölgelerinde gerçekleşecek soğurma ile oluşan elektron – boşluk çiftleri için ise bir elektrik alan varlığından söz edilemeyeceği için rekombinasyon mekanizması halen çalışmaktadır ve bu bölgede oluşan taşıyıcılar, difüzyon ile tükenme bölgesine girmedikleri müddetçe akıma katkı sağlayamadan rekombine olurlar. Dolayısıyla fotodedektör teknolojisi için nötral katkı bölgeleri, soğurulan fotonların tam verimle toplanamadığı ve dolayısıyla elektriksel iletme kısmi olarak katkı sunabildiği verimsiz bölgelerdir. Bu bölgelerin toplam yarıiletken hacmi içerisinde mümkün olduğunca küçültülüp, tükenme bölgesinin genişletilmesi, soğurma performansının artırılması için gereklidir. Bunun eldesi ise PIN eklemi ile mümkün olmaktadır [12].



Şekil 2-3 Ters besleme altındaki PIN eklemının enerji bant diyagramı [12].

PIN eklemi PN ekleminden farklı olarak orta bölgede katkısız (intrinsic) ifadesinden gelen bir I bölgesi içermektedir. Fotodedektör teknolojisi açısından bu bölgenin varlığı aygıt performansını yükselten çeşitli avantajlar getirmektedir. PIN eklemi için enerji bant diyagramı Şekil 2-3'te verilmiştir. Bu yapıda tükenme bölgesi genişliği baskındır ve nötral bölgeler toplam yarıiletken içerisinde ihmal edilebilecek kadar küçüktür [13].

PIN eklemi ile yapısal elektrik alana sahip olan ışığın soğurulduğu tükenme bölgesi çok daha geniş tutulabilmekte ve dedektörün soğurma performansı maksimize edilebilmektedir. Diğer taraftan tükenme bölgesinin genişletilmesiyle birlikte eklem kapasitansı düşürülmekte ve dolayısıyla dedektörün RC zaman sabiti küçültülmektedir. Bu nedenle dedektörün performans parametrelerinden biri olan fotocevap hızı, taşıyıcıların sürüklenme hızı tarafından belirlenir hale gelmektedir. Tükenme bölgesinin genişlemesiyle birlikte akıma katkı sağlayan taşıyıcılar içerisinde tükenme bölgesine nötral bölgeden difüzyon yolu ile giren taşıyıcıların oranı azalmakta ve fotocevap katkısı soğurma bölgesindeki hızlı taşıyıcılar tarafından etkin olarak sağlanır hale gelmektedir. Bahsedilen bu avantajları sebebiyle yarıiletken fotodedektör teknolojisinde PIN yapılar baskın olarak kullanılmaktadır.

2.1.2 Fotodedektör Performans Parametreleri

Fotodedektörlerin karakterize edilmesinde ve ulaşılan uç teknolojilerin karşılaştırılmasında metrik sistem dahilinde ölçümlenen ve ortaya konan çeşitli parametreler mevcuttur. Bir fotodedektör üretimi dahilinde genel – geçer olarak kabul edilmiş bu parametrelerin karakterize edilmesi gerekliliği oluşmuştur.

2.1.2.1 Kuantum Verimlilik ve Fotocevap

Bölüm 2.1.1’de “PN / PIN Eklemi Yapıları ve Fotodedektör Teknolojisindeki Rol” başlığı altında verilen temel yarıiletken fiziği çerçevesinde bakıldığında ışığın soğurulması sonucunda oluşan tüm elektron – boşluk çiftleri dış devre akımına katkı sağlayamaz. Elektron – boşluk çiftlerinin yeniden birleşme hızı bu durumu engeller. Dolayısıyla fotoakıma katkı sağlayan ve dedektörün fotocevap performansına etki eden elektron – boşluk çiftleri, yaratılan ve toplanabilen taşıyıcılardan oluşmaktadır. Kuantum verimlilik, dedektör üzerine düşen foton başına yaratılan ve toplanabilen elektron – boşluk çifti sayısıdır [6].

$$\eta = \frac{\text{Yaratılan ve toplanan elektron – boşluk çifti sayısı}}{\text{Gelen toplam foton sayısı}} \quad (2-4)$$

Yaratılan ve toplanan elektron – boşluk çifti sayısı, fotoakım büyüklüğünün birim yüke bölünmesiyle bulunabilir. Ramo teoremi gereği her bir elektron – boşluk çifti akıma birim yük katkısı sağlar. Toplam fotoakım I_{ph} ifadesi ile gösterilirse, yaratılan ve toplanan elektron – boşluk çifti sayısı I_{ph}/e olur. Diğer taraftan, dedektöre giren toplam foton sayısı ise toplam optik gücün, birim foton enerjisine bölünmesiyle bulunur. Optik güç P_0 ile gösterilirse, gelen foton sayısı $P_0/h\nu$ olur. Kuantum verimlilik Denklem (2-4) uyarınca yeniden ifade edilirse;

$$\eta = \frac{I_{ph}/e}{P_0/h\nu} \quad (2-5)$$

olur. Denklem (2-4)'te verilen kuantum verimlilik tanımı tüm dedektörü içine alan bir tanımdır. Dedektör üzerine düşen tüm ışık hesaba dahil edilir. Bu sebepten literatürde “dış kuantum verimliliği” olarak da ifade edilmektedir. Dedektör üzerine düşen ışığın bir kısmı ise yansıma ile hiçbir şekilde soğurulmadan kaybedilmektedir. Yansıma ile kaybedilen fotonların dahil edilmeyerek doğrudan dedektör tarafından soğurulan foton başına oluşan elektron – boşluk çiftlerinin sayısını veren ifade ise “iç kuantum verimliliği” olarak isimlendirilmektedir [14].

Bir fotodedektörün fotocevap performansı ışığa duyarlılığının metrik bir ölçütüdür. Başka bir deyişle; yarıiletken üzerine düşen optik güç başına üretilen elektrik akımının niceliksel ifadesidir. Denklem (2-5)'i oluşturan ifadeler üzerinden gidildiğinde;

$$R = \frac{\text{Fotoakım (A)}}{\text{Toplam Optik Güç (W)}} = \frac{I_{ph}}{P_0} \quad (2-6)$$

şeklinde matematiksel olarak ifade edilir. Burada R sembolü fotocevap (Responsivity) tanımından ileri gelmektedir. Bu ifade, bir fotodedektörün en önemli performans parametrelerinden biridir. Birimi [Amper/Watt]'tır [6].

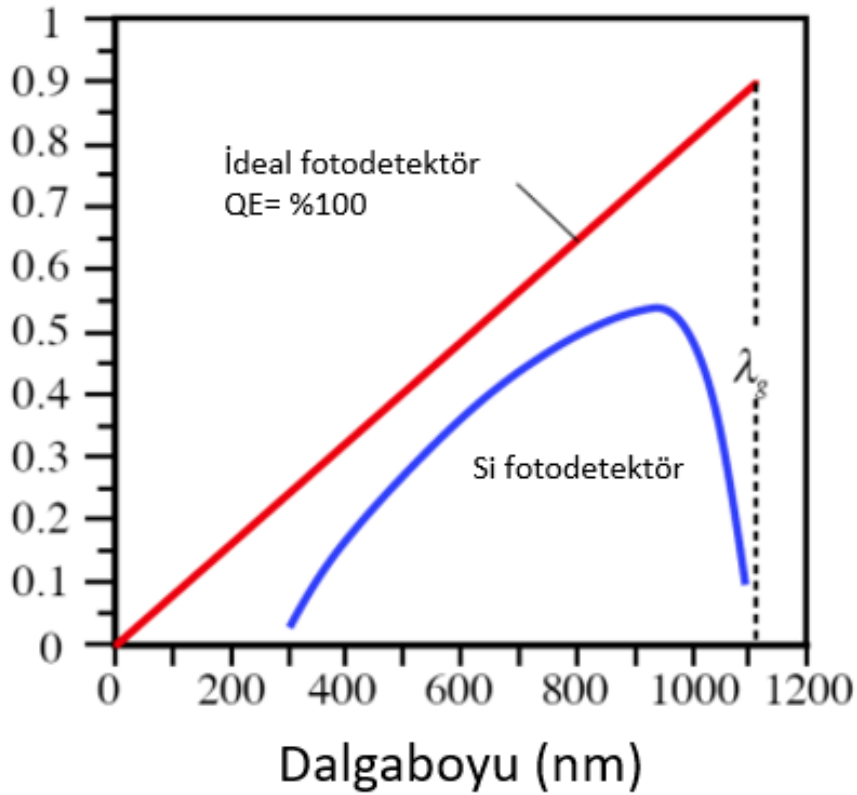
Fotocevabı, kuantum verimliliğe bağlayan ifade şu şekilde verilebilir:

$$R = \eta \frac{e}{h\nu} = \eta \frac{e\lambda}{hc} \quad (2-7)$$

Denklem (2-7)'de ifade edildiği gibi fotocevap, dedektöre düşen ışığın dalgaboyuna (λ) bağlıdır. Geri kalan e/hc terimleri ise dedektörden bağımsız sabitlerdir. Dolayısıyla fotocevap ifadesine dalgaboyu bağımlılığı nedeniyle spektral fotocevap da denilmektedir. Dalgaboyuna bağlı fotocevap performansı, diğer ifadesiyle spektral fotocevap, bir fotodedektörün karakteristiğini ortaya koyan tipik bir performans parametresidir ve ticari olarak üretilen tüm fotodedektörlerin sahip olduğu özellikler arasında yerini alır.

Şekil 2-4'te tipik bir fotodedektör için dalgaboyuna bağlı fotocevap grafiği verilmiştir. Kırmızı ile gösterilen eğri kuantum verimliliğin teorik çerçevede %100 olduğu ideal durum için verilmiştir. İdeal durumla karşılaştırılabilecek tipik bir silisyum dedektörün gerçek verilerini içeren eğri ise mavi ile gösterilmiştir.

Fotocevap (A/W)



Şekil 2-4 Tipik bir fotodiyot için spektral fotocevap grafiği ve ideal durum eğrisi ile karşılaştırmalı gösterim [6].

Silisyum yarıiletken malzemesinin fiziksel sınırlarından ileri gelen üst ve alt limit dalgaboyu algılama sınırları mevcuttur. Bu değerler silisyuma özgü yasak enerji aralığının büyüklüğünden ileri gelmektedir. Silisyumun yasak enerji aralığı 1.12 eV'tur. Bu değerden küçük enerjilere karşılık gelen dalgaboyları için silisyum alttaşı geçirendir. Bu dalgaboyu bölgesi 1100 nm ve daha küçük dalgaboylarına karşılık gelmektedir.

2.1.2.2 Karanlık Akım

Bir fotodedektörün ışığı algılama ve elektrik sinyaline dönüştürme kabiliyetini etkileyen en önemli etmenlerden bir tanesi ışığı algılama kapasitesi olduğu gibi, toplam fotoakım içerisinde karışan ve algılanan ışık tarafından tetiklenmeyen "kaçak akım" büyüklüğü de önemlidir. Kaçak akımların kaynağı yarıiletken malzemenin içerisindeki yeniden birleşmelerdir. Dedektörün ışığı algılaması sonucunda oluşan fotoakım, arka planda sürekli var olan bu kaçak akımların üzerine binerek toplam akımı oluşturur. Bu sebepten; kaçak akım büyüklüğü doğrudan doğruya fotoakım çözünürlüğünü etkileyen bir faktör olarak karşımıza çıkar [15]. Fotoakım sinyalinin doğruluğunu artırabilmek için kaçak akımları düşürmek şarttır. Rekombinasyon kaynaklı oluşan bu kaçak akım dedektörün aydınlatılmadığı durumda da var olması sebebiyle bu akım kaynağına fotodedektör jargonunda "karanlık akım" da denilmektedir [16].

Karanlık akımların kaynağı olan rekombinasyon akımları "rekombinasyon merkezi" olarak isimlendirilen ve yarıiletken fabrikasyonunda genel tanımı itibariyle kusur olarak görülen noktaların yoğunluğuyla ilişkilidir [17]. Rekombinasyon merkezleri, yarıiletken alttaşı içerisindeki kristal kusurları olabileceği gibi yüzeyde dielektrik – yarıiletken arayüzeyindeki kopuk bağlar da olabilir. Diğer taraftan yine yüzeyde, metal – yarıiletken arayüzeyinde çoklu kristal yapılarındaki heteroeklem geçişlerdeki kusurlar da rekombinasyon merkezlerine örnek olarak verilebilir.

Karanlık akımları azaltmanın yolu, her biri akıma katkı sağlayan ve fotoakım çözünürlüğünün kötü yönde etkilenmesine sebep olan bu rekombinasyon merkezlerini azaltmaktan geçer. Dielektrikler bu merkezlerin azaltılması noktasında önemli bir yapı olarak karşımıza çıkar [18]. Yarıiletkenin yüzeyindeki kopuk bağları

doymak ve yüzeyde bulunan rekombinasyon merkezlerini ortadan kaldırmak için pasivasyon olarak isimlendirilen dielektrik ince film yapısı oluşturulabilir [18].

2.1.2.3 Diğer Performans Parametreleri

Bir fotodedektörün performansını tanımlayan fotocevap ve karanlık akım haricinde birçok parametre daha bulunmaktadır. Tez kapsamında yapılan dielektrik ince film çalışmasını doğrudan ilgilendirmediği için bu parametrelere değinilmeye yetinilecektir.

Fotocevap hızı, dedektörün ışığa karşı duyarlılığının zamansal boyuttaki ölçütüdür. Özellikle anahtarlama gibi uygulamalarda tepkisellik hızı önemli hale gelmektedir [19]. Taşıyıcıların sürüklenme hızı, soğurma bölgesinin genişliği gibi özellikler tarafından belirlenir. Soğurma bölgesinin genişliği her ne kadar soğurma performansını artıran bir sonuç ortaya koyuyor olsa da, genişlik arttıkça taşıyıcıların elektriksel kontaklara ulaşmak için kat etmeleri gereken mesafe artmakta ve bu durum da dedektör hızını düşüren bir etkiye neden olmaktadır [6]. Dolayısıyla burada performans parametreleri arasında bir mühendislik dengesi gözetilmesi gerektiği açıktır.

Gürültü, dedektörün frekansa bağlı içsel akım veya geriliminin ifadesidir. Karanlık akım olarak Bölüm 2.1.2.2'de ifade edilen nicelik esasında gürültü parametresinin frekanstan arındırılmış sürekli haldeki tanımıdır. Gürültü tanımından hareketle oluşturulmuş olan NEP (Noise Equivalent Power) (Gürültü Eşdeğer Gücü) dedektör algılama hassasiyetinin bir ölçüsüdür [20]. Dedektörün arka plan gürültüsüne denk gelen fotoakımı üreten optik gücün ifadesidir. NEP düşüldükçe fotodedektör hassasiyeti artar [20].

2.2 Dielektrik İnce Filmlerin Silisyum Tabanlı Fotodedektör Performans Parametrelerine Etkisi

Dielektrik ince filmler bir fotodedektörün performans parametreleri üzerinde önemli belirleyiciliğe sahiptir. Fotodedektör tasarımı aşamasında bir dielektrikten temel anlamda iki performans parametresi üzerinde yoğunlaşan katkı hedeflenmektedir. İlki dedektöre giren ışığın yansıma ile kaybedilmesinin azaltılması yoluyla kuantum verimliliğini ve dolayısıyla fotocevabı artırmaktır. İkincisi ise Silisyum yarıiletkenin

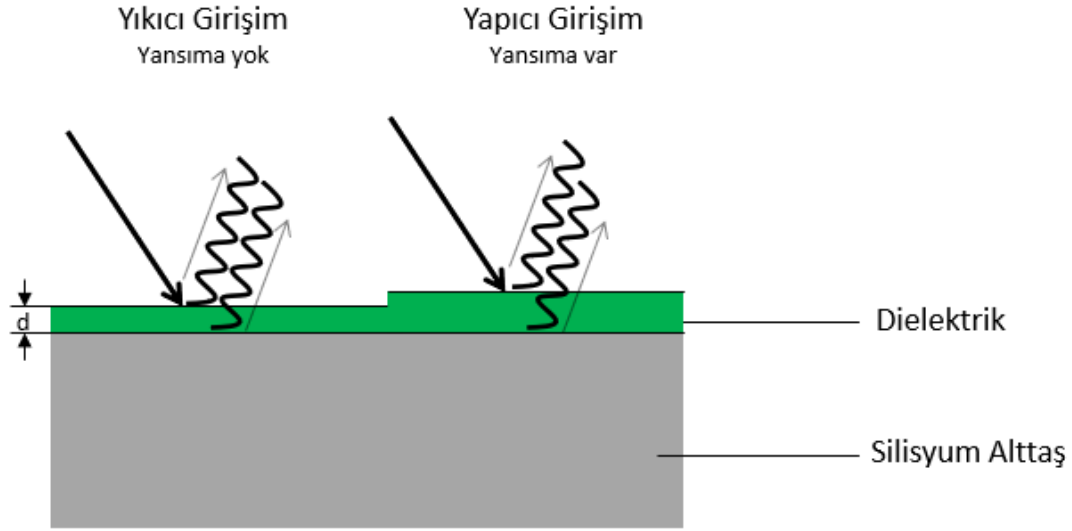
kopuk bağlarını doyurmak suretiyle pasivize edilmesi ve karanlık akımların azaltılmasıdır [18]. Bu sayede dedektörün algılama hassasiyetini artırmak ve performansı yükseltmek noktasında başarı elde edilebilir.

Bu çerçeve dahilinde, tez kapsamında yürütülen çalışmalar iki ayrı başlık altında incelenmiştir. Literatür tarama çalışmaları da bu ilerleme stratejisine uygun olarak iki temel başlık altında yürütülmüştür.

2.2.1 Dielektrik İnce Filmlerin Yansımaya Önleyici Katman Olarak Kullanılması

Çıplak silisyum yüzeyinin ışığı yansıtma oranı %30'un üzerindedir [6]. Fotodedektörün ışığı algılama kapasitesinin artırılmasının birincil yolu dedektör soğurma bölgesine mümkün olduğunca yüksek miktarda ışığın girmesini sağlamaktır. Bunun eldesi ise ışığın fotodedektör yarıiletken malzemeye bulunduğu ilk yüzeyde yansımaya ile doğrudan kaybedilen bu %30'un üzerindeki ışığı azaltacak şekilde bir yapı geliştirmekle mümkün olabilmektedir. Bu yapının geliştirilmesi ve yansımaya azaltılması için literatürde bilinen birtakım yöntemler mevcuttur. Bunların en başında silisyum yüzeyini dokulandırmak gelir. Dokulandırılmış yüzey üzerine düşen ışık birden çok defa yansımaya maruz kalır ve bu sayede her yansımaya en az %70'i kazanılmış olur. Işığın yarıiletken içerisine girme olasılığı artırılır [21].

Diğer bir teknik ise silisyum yüzeyine yansımaya önleyici nitelikte dielektrik ince film kaplama uygulanmasıdır [22].



Şekil 2-5 Hava – Dielektrik ve Dielektrik – Silisyum arayüzeylerinde gerçekleşen yansımaların yıkıcı ve yapıcı girişimleri.

Silisyum alttaşın ışığın yarıiletken ile buluştuğu üst yüzeyine kaplanan dielektrik ince film uygulamasında Şekil 2-5'te görüldüğü gibi iki arayüzeyden yansıma gerçekleşmektedir. Hedef; yıkıcı girişim yüzdesini artırarak yansıma miktarını minimize etmektir.

Şekil 2-5'te yıkıcı ve yapıcı girişimlerin görselleştirildiği dielektrikler arasındaki temel farkın kalınlıklar olduğu görülmektedir. Kalınlık yansıma önleyici ince film dielektriklerin geliştirilmesinde optimize edilmesi gereken önemli bir parametredir. Fakat kalınlıktan önce gözetilmesi gereken birincil parametre kırma indisidir [23]. Yansıma önleyici katman olarak kullanılacak olan dielektrik katmanının kırma indisini hesaplayabilmek için ışığın geldiği ortamın ve Silisyum alttaşın kırma indislerinin geometrik ortalaması alınmalıdır. Işığın geldiği ortam olan havanın kırma indisi 1 ve silisyum alttaşın kırma indisi de 3.5 olarak alındığında dielektrik kırma indisinin 1.87 olması gerektiği hesaplanır [6].

Film kalınlığı ise doğrudan doğruya minimum yansıtıcılık eldesinin sağlanacağı dalgaboyuyla ilişkilidir. Kırma indisinin en optimum değerinin Hava – Silisyum arayüzeyi için 1.87 olarak belirlenmesiyle birlikte dedektör çalışma dalgaboyu referansı ile kalınlığın belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 2-5'te görselleştirilen yıkıcı ve yapıcı girişim durumundan hareketle; yansıma önleyici dielektrik katmanının

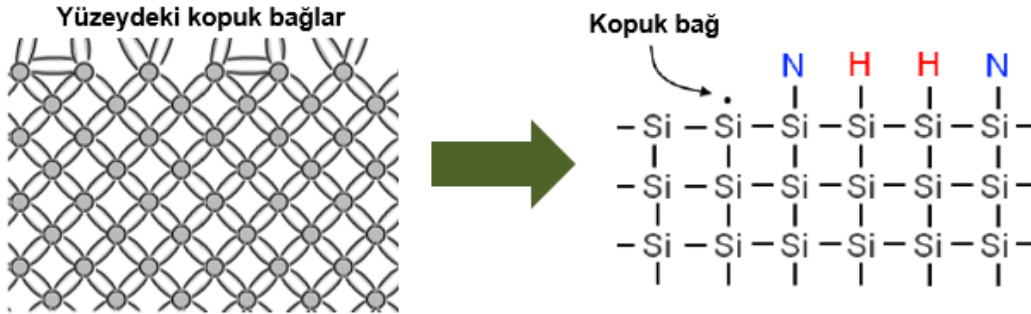
minimum yansıtıcılık için sahip olması gereken kalınlığı veren matematiksel formül aşağıdaki gibidir;

$$d = \frac{\lambda}{4n_2} \quad (2-8)$$

Bu formül spesifik bir dalgaboyunda pik soğurma elde etmek için kullanılabilir ve yansıma önleyici katman geliştirme çalışmalarında bu formülasyon kullanılarak kalınlık değeri elde edilebilir. Örnek olarak; 900 nm dalgaboyunda çalışacak bir Silisyum fotodedektör için geliştirilecek yansıma önleyici dielektrik katmanın kırma indisi 1.87 kalınlığı ise 53.5 nm olmalıdır.

2.2.2 Dielektrik İnce Filmlerin Pasivasyon Amacıyla Kullanılması

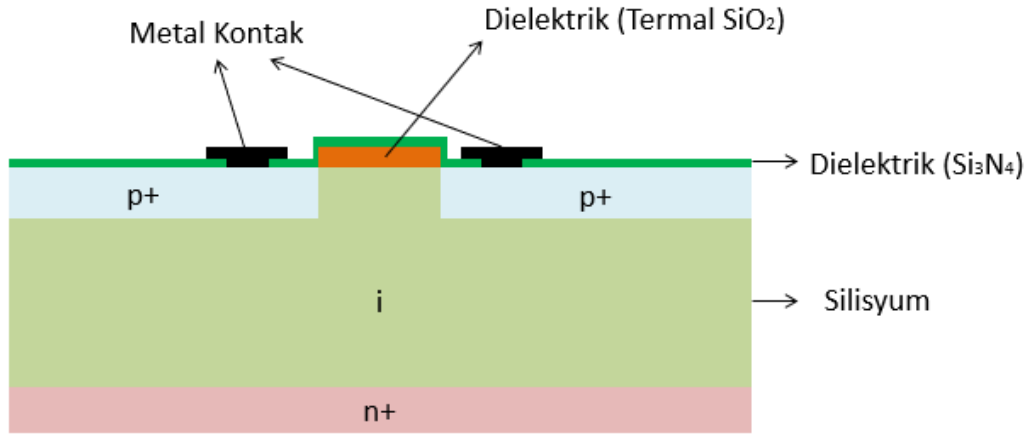
Bölüm 2.1.2.2'de karanlık akım parametresinin, fotodedektör performansını etkileyen niteliğe sahip olduğundan söz edilmişti. Karanlık akımların kaynağı olan rekombinasyon merkezlerinin azaltılması noktasında yüzey pasivasyonu sağlanması amacıyla dielektrik ince filmlerin kullanılması yarıiletken endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir [11].



Şekil 2-6 Silisyum yüzeyindeki bağ yapmamış atomlar ve dielektrik kaplama sonrasında N ve H atomlarıyla yapılan bağlar ile yüzeyin elektriksel olarak pasivize edilmesi [11].

Bu teknikte temel olan; yarıiletken yüzeyinde bulunan bağ yapmamış Si atomlarının Şekil 2-6'da görüldüğü şekilde dielektrik yapısı ile eksik kalan bağları tamamlaması

ve rekombinasyon merkezi olma özelliğini kaybederek karanlık akımın azaltılması üzerine kuruludur [24].

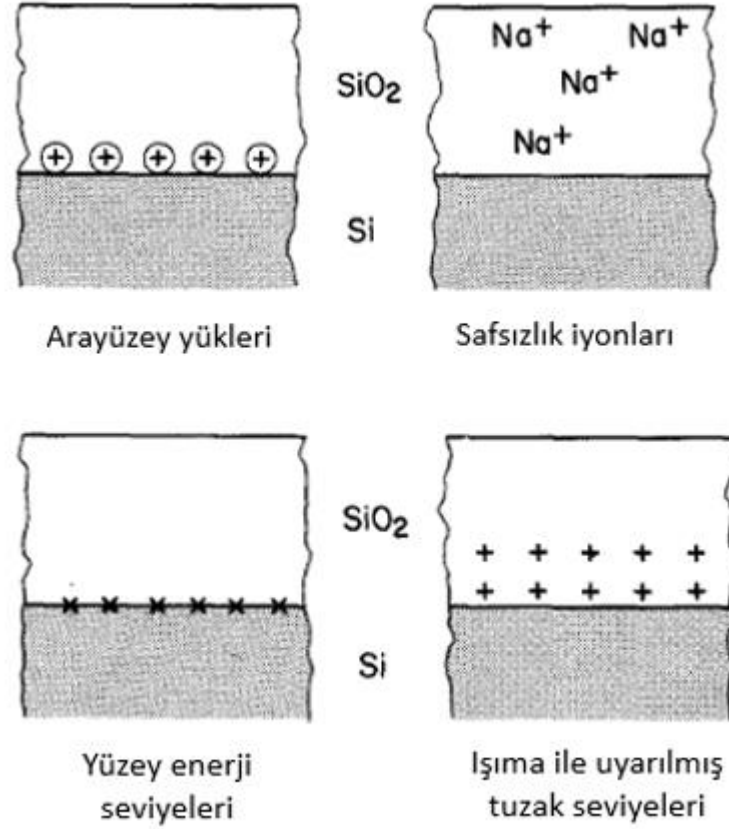


Şekil 2-7 PIN tipi bir fotodedektörde yüzey pasivasyonu ve yansımaya önleyici amacıyla kullanılan dielektrikler.

Şekil 2-7'de verilen kesit görüntüde yarıiletken üst yüzeyinde iki farklı p+ konsantrasyon bölgesi bulunmaktadır. Bu bölgeler ışığın girdiği ve soğurulmanın gerçekleşeceği birbirinden farklı alanlardır. PIN yapıları bu bölgelerin arasında kalan i bölgesi bir dielektrik ile kaplanmadığında karanlık akım kaynağı olarak davranacaktır. Kesit görünümde yer alan SiO₂ dielektrik, p+ bölgeleri arasında pasivasyon amacıyla konulmuştur. Diğer taraftan p+ bölgeleri üzerinde bulunan Si₃N₄ dielektriğinin birincil amacı her ne kadar yansıtma performansı olsa da, bu bölgeler üzerinde de rekombinasyon merkezleri bulunduğu ve dielektrik yapısının geliştirilmesi sırasında pasivasyon performansının da gözetilmesi gerektiği açıktır [25].

Dielektrik ince filmin pasivasyon performansının ölçümü CV (Kapasitans – Voltaj) ölçüm tekniğiyle yapılabilir. Kapasitans, esasında bir fotodedektörün son halindeki performans niceliklerinden biridir. Kapasitans değerinin belli bir sınırın üzerinde olması, fotodedektörün bağlanacağı elektronik devrenin gürültüsünü artırıcı nitelikte olacaktır [26]. Bu nedenle aygıtın kapasitansının belli limitler dâhilinde tutulması hedeflenir. Dielektrikler için baktığımızda kapasitans ölçümü, arayüzey yük yoğunluğunu işaret ediyor olması nedeniyle pasivasyon kalitesi hakkında fikir verebilme özelliğine sahip olan bir ölçüm tekniğidir [27].

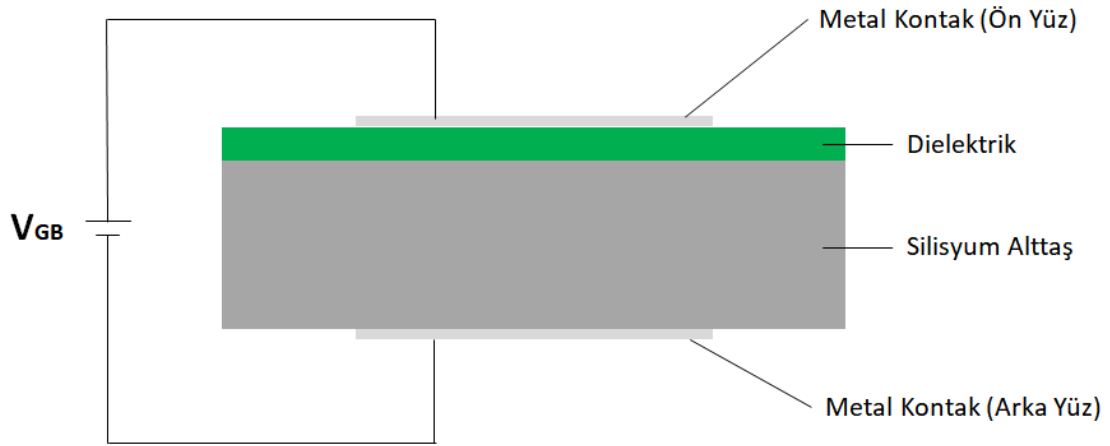
Bir dielektrik filmde fotodedektör kaçak akımlarına etki etme potansiyeli taşıyan çeşitli yük kaynakları bulunur. Şekil 2-8'de verilen bu yük kaynakları arasında dielektrik ince film içindeki safsızlık iyonları, tuzak seviyeleri, dielektrik – yarıiletken arayüzeyindeki yükler ve yüzey enerji seviyeleri yer alır.



Şekil 2-8 Bir SiO₂ dielektrik filmde bulunan dört tip yük kaynağı [28].

Pasivasyon performansının öncelendiği dielektrik proseslerinde hedef: Şekil 2-8'de verilen yük kaynaklarının mümkün olduğunca azaltılması yönündedir. Dielektrik içerisinde bulunan her bir yük, silisyum yarıiletken içerisinde zıt kutuplu bir başka yükün oluşmasına neden olur. Yükün arayüzeye yakınlığı oranında silisyum yarıiletkene olan etkisi artar. Arayüzeye yakın bir yük, yarıiletkene tümüyle etki ederken, dielektrik filmin derinlerinde bulunan bir yük, yarıiletkene çok az etki eder veya hiç etmez. Arayüzey yüklerinin niceliksel analizi için literatürde yer eden ölçüm yöntemi CV'dir. Bu yöntem ile dielektrik – yarıiletken arayüzeyinde bulunan yük yoğunluğu ölçülebilir [28].

Bir dielektrik ince filmin kapasitans ölçümünün fotodedektör mikrofabrikasyonunun ara basamaklarından biri dahilinde ölçülmesi olanaklı değildir. Bunun sebebi kapasitans ölçümü için dielektrik ince film üzerine elektriksel kontak alınabilmesi amacıyla metal kaplanması gerekliliğidir [29]. Bu metal kontakın yarıiletken ile doğrudan temas etmemesi, yalnızca dielektrik ince film üzerinde kalması gereklidir. Diğer taraftan kapasitif etkinin gözlenebilmesi içinse ikinci kontakın yarıiletkenin arka yüzünden alınması gereklidir. Dielektrik karakterizasyonu için hazırlanması gereken örneğin kesit görünümü Şekil 2-9'da verilmiştir. Şekil 2-9'da görülen yapı esasında bir MOS (Metal – Oxide – Semiconductor) yapısıdır. Bu yapının kontakları arasındaki kapasitans değeri, iki polariteyi kapsayan farklı voltaj değerlerinde ölçüm yapılarak elde edilir [30].

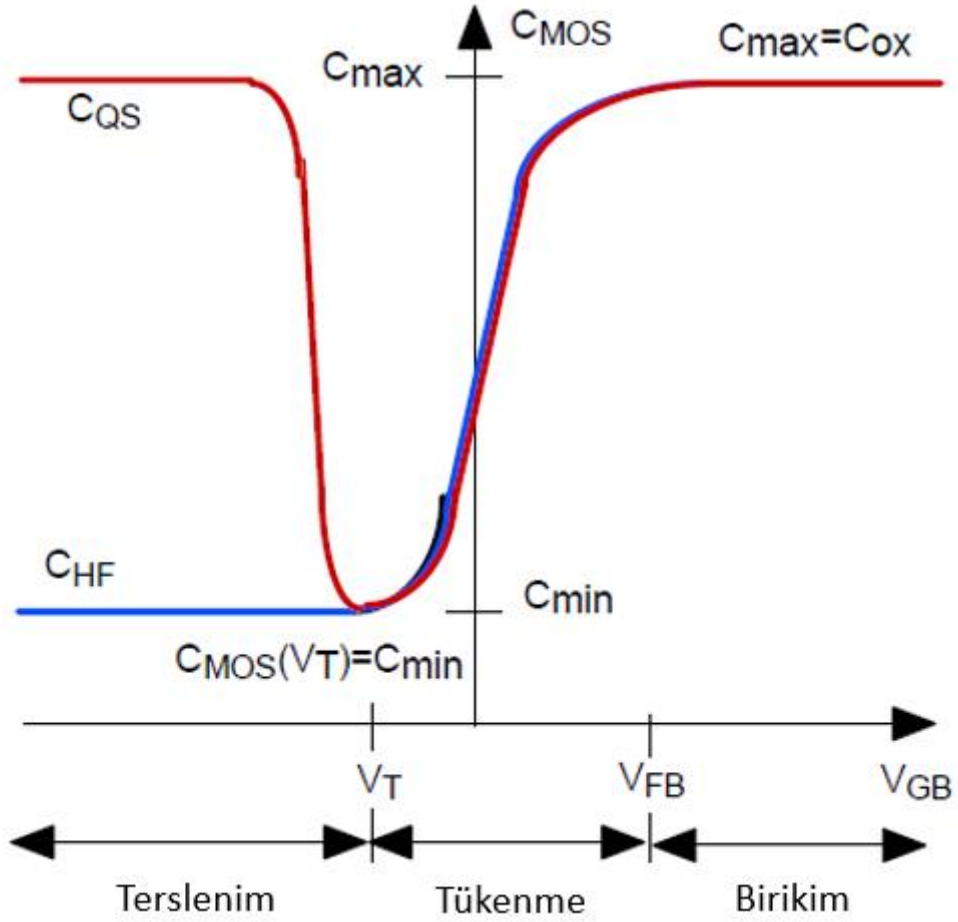


Şekil 2-9 Dielektrik ince film karakterizasyonu için hazırlanması gereken örneğin kesit görünümü ve CV ölçümlerinde kullanılan elektriksel devre şeması.

Şekil 2-9'da kapasitans ölçümü için gerekli devre şeması verilmiştir. Karakterizasyonu yapılacak olan dielektrik üzerindeki metal kontak, akımın sürüldüğü kontak ve pozitif voltaj değerleri için (+) polaritededir.

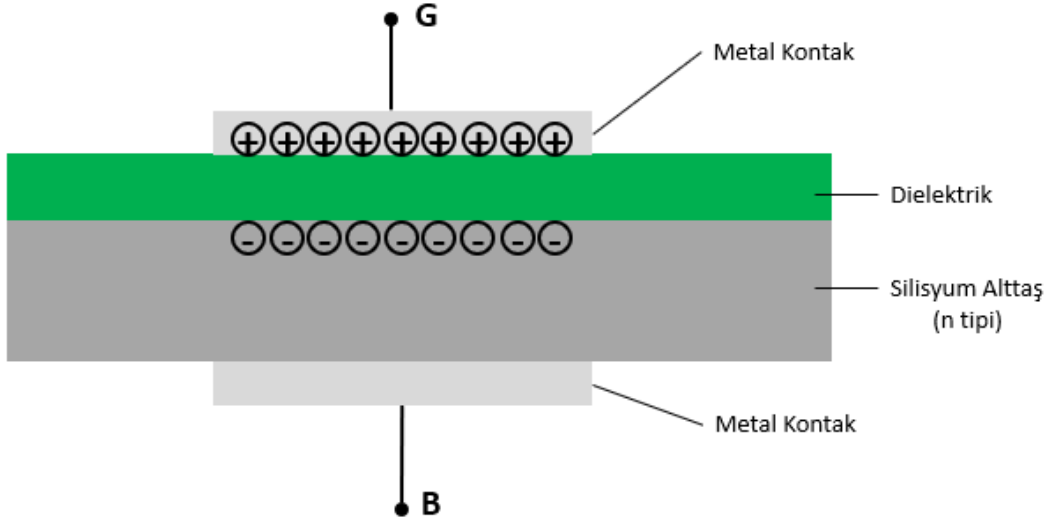
Voltaj değerleri (+) ve (-) polaritelerin taranması yoluyla ayarlanır. Bu dielektrik – yarıiletken arayüzündeki kapasitif etkilerin manipülasyonu yoluyla yük dağılımlarını analiz edebilmek için gereklidir [30].

Bu ölçüm sonucunda elde edilebilecek karakteristik CV grafiği Şekil 2-10'da verilmiştir.



Şekil 2-10 N tipi bir silisyum alttaşı üzerindeki MOS yapısı için tipik CV grafiği [31].

Dielektrik pasivasyon karakterizasyonu için kullanılan MOS yapısının karakteristik CV grafiği incelendiğinde yapının elektriksel konfigürasyonunun farklılaştığı 3 ayrı bölgeden söz edilebilir [3]. Birikim (accumulation) bölgesinde dielektrik üzerinde bulunan metal kontak (+) yüklüdür ve bu nedenle dielektrik – yarıiletken arayüzeyinde elektron birikimi söz konusudur. Grafiğin bu bölgesinde arayüzeydeki elektron yoğunluğu alttaştaki elektron yoğunluğunun üzerindedir. Dielektrik ince film, metal kontakta biriken (+) yükler ve dielektrik – yarıiletken arayüzeyinde biriken (-) yükler arasında kapasitif etki oluşturan bir yalıtıcı görevindedir.

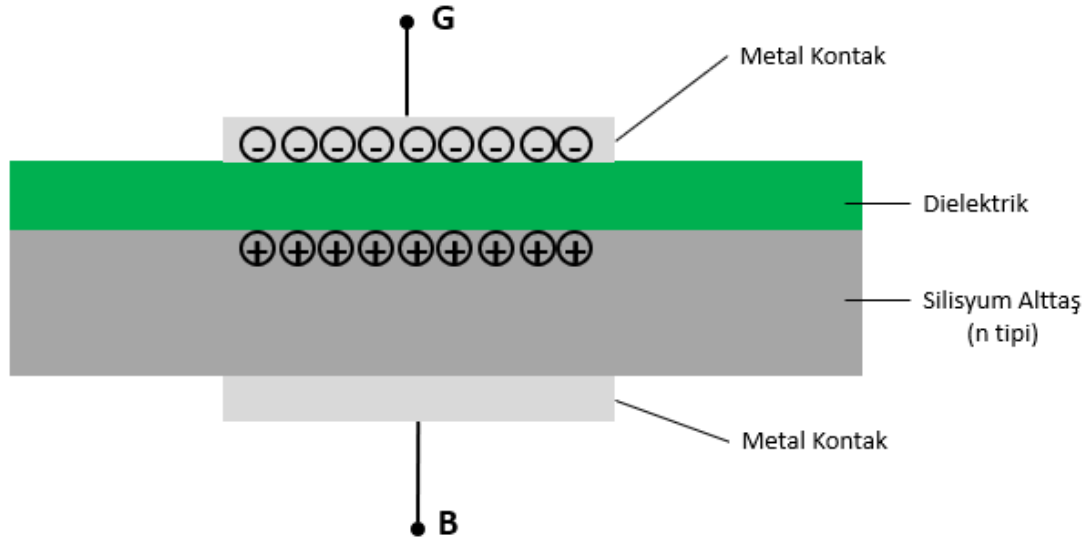


Şekil 2-11 Birikim (accumulation) bölgesinde Metal – Yarıiletken arasındaki elektriksel yük dağılımı ve dielektrik ince filmin kapasitif etkisi.

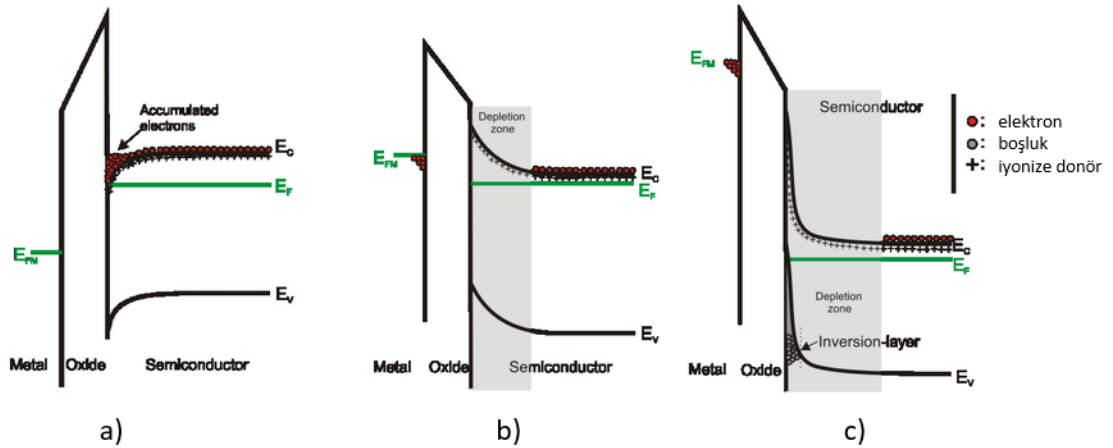
Şekil 2-11’de görülen (+) besleme altındaki yük dağılımı V_{GB} ’nin azalmasıyla birlikte Şekil 2-10’de verilen eğriyi takip ederek V_{FB} değerine kadar sabit kalmaktadır. V_{FB} değerinden sonra Şekil 2-11’de gösterilen yük miktarı hızlıca azalır. Besleme voltajının sıfırlandığı, eğrinin y eksenini kestiği noktada kapasitans halen düşmeye devam etmektedir ve kapasitans değeri minimum değer üzerinde. Bunun sebebi alttaşın n tipi olması ve arka plan katkı konsantrasyonunun büyüklüğüyle orantılı olarak serbest elektron bulunmasındandır. Besleme voltajı (-) polariteye geçtiği noktadan sonra bu sefer metalde negatif yüklerin yoğunlaşması karşısında dielektrik – yarıiletken arayüzeyinde (+) yüklü iyonize donör atomları oluşmaya başlar. Bu atomların alttaş içerisindeki serbest (-) yüklerle dengeye ulaştıkları ve dolayısıyla dielektrik kapasitansının en düşük olduğu nokta V_T voltaj değerine tekabül etmektedir. Kapasitansın giderek azaldığı $V_{FB} - V_T$ aralığına tükenme (depletion) bölgesi denilmektedir. Bu bölgede kapasitif yük yoğunluğu azalan voltajla birlikte tükenmektedir [3].

V_T noktasından sonra artık (-) polarite artmakta olan besleme voltajıyla birlikte, dielektrik – yarıiletken arayüzeyinde (+) yükler baskın hale gelir ve boşluk yoğunluğu oluşmaya başlar. Besleme voltajının yükselmesiyle birlikte kapasitif yük yoğunluğu

artar ve kapasitans yeniden yükselir. Bu bölge terslenim (inversion) bölgesi olarak ifade edilmektedir. Kapasitans, ters polariteyle yeniden yükselmektedir.



Şekil 2-12 Terslenim (inversion) bölgesinde metal – dielektrik ve dielektrik - yarıiletken arasındaki elektriksel yük dağılımı ve dielektrik ince filmin kapasitif etkisi.



Şekil 2-13 MOS yapının a) birikim b) tükenme c) terslenim bölgelerindeki enerji bant diyagramı [32].

Şekil 2-13'te enerji bant diyagramları ile desteklenerek görselleştirilen birikim, tükenme ve terslenim gibi yük dağılım bölgeleri arasındaki geçişi etkileyen ve dielektrik kapasitans eğrisinde değişime yol açan yapısal faktörlerden bir tanesi, tez kapsamında da inceleme altına alınan dielektrik – yarıiletken arayüzeyindeki

yüklerdir. İdealde yüksek performanslı pasivasyona sahip bir dielektrik – yarıiletken arayüzeyinde yük bulunmayacağı kabul edilebilir. Ancak pratikte arayüzey yük yoğunluğu sıfır limite doğru yakınsayan fakat günümüz mikrofabrikasyon teknikleri dâhilinde her zaman ölçülebilir büyüklükte kalan bir niceliktir. Bu nedenle Şekil 2-10'da verilen tipik CV grafiğinde dielektrik – yarıiletken arayüzey yük yoğunluğu baskın bir şekilde karakteristiği etkilemekte ve bundan yola çıkarak CV ölçümü aracılığıyla yük yoğunluğu hakkında bilgi elde edilebilmektedir [31].

Arayüzey yük yoğunluğunun CV grafiğine etkisi Bölüm 5.2.1 Arayüzey Yük Yoğunluğu başlığı altında yürütülen simülasyon çalışmaları ile detaylı olarak incelenmiştir. CV tekniğinin deneysel süreçlerde kullanılarak pasivasyon karakterizasyonunun yapılması noktasındaki yarıiletken fiziği mantığının anlaşılması, yürütülen parametrik simülasyonlar neticesinde parametreler arasındaki niceliksel ilişkilerin ortaya konması yoluyla gerçekleştirilebilir.

3. Mikrofabrikasyon Teknikleri

Tez çalışmaları kapsamında yürütülen deneysel süreçlerin geliştirilmesi ve uygulanması noktasında başvuru mikrofabrikasyon tekniklerinin genel nitelikli literatür notlarına aşağıda verilen ilgili başlıklar altında değinilmiştir.

3.1 Fotolitografi

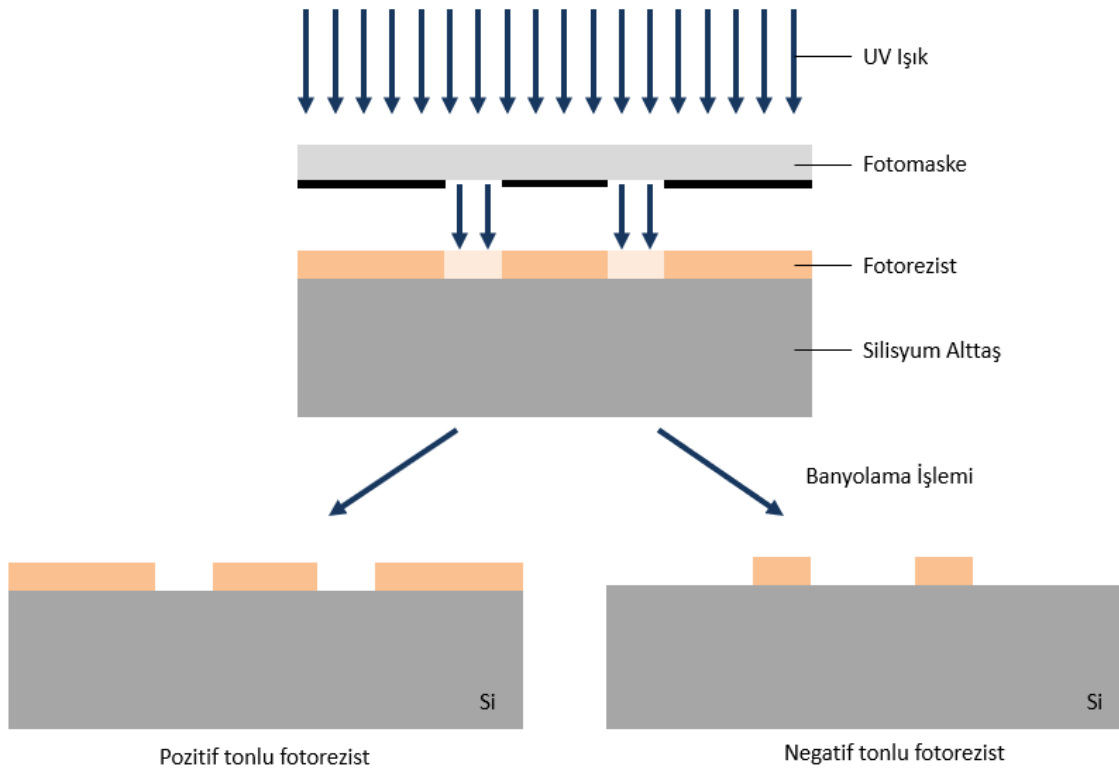
Fotolitografi, yarıiletken mikrofabrikasyonunda yaygınlıkla kullanılan bir desenleme işlemidir [33]. Optik litografi veya UV (Ultraviyole) litografi olarak da anılmaktadır [33]. Yarıiletken alttaşın veya alttaş üzerine kaplanmış olan ince filmin üzerinde geçici bir desenleme oluşturulur ve bu işlemin akabinde yapılacak ikinci bir işlemle bu desen kalıcı hale getirilir. Bu açıdan fotolitografi işlemleri kendisinden sonra gelecek olan ileri prosesin ihtiyaçlarına göre şekillenir.

Temelde olan işlem daha öncesinde başka bir işlemle şekillendirilmiş olan fotomaske üzerindeki deseni alttaş üzerine aktarmaktır. Fotomaskenin oluşturulması lazer pozlama gerektiren başka bir süreçtir [34].

Fotolitografi işlemi alttaşın desenlenmesi istenen yüzeyinin ışığa duyarlı özel bir polimer malzemeye (fotorezist) kaplanması ile başlar. Bu kaplama işlemi yaygınlıkla dönel kaplama tekniğiyle yapılır [35]. Sprey kaplama gibi başka teknikler de kullanılmaktadır [35]. Kaplama işleminden sonra kimyasalın yüzey tutunumunu arttırmak ve kimyasal içerisindeki uçucuları uzaklaştırmak için sıcak yüzey üzerinde kurutma işlemi uygulanır. Akabinde örnek pozlama işlemi için hazır hale gelmiş olur. Özel bir fotomaske – alttaş hizalayıcı sisteminde hizalama işlemi yapılır ve UV ışık kullanılarak kimyasal uygun dozda pozlanır. Bu pozlama işleminde fotomaske üzerindeki açıklıklardan UV ışık örnek üzerine düşer ve kimyasalın yapısını değiştirerek çözülebilir hale getirir. Fotomaskedeki krom metaliyle kaplı alanlardan ise ışık geçemez ve dolayısıyla bu alanlardaki kimyasal yapı değişikliğe uğramaz. Pozlama sonrasında alttaş özel bir sıvı kimyasal çözücü içerisinde batırılarak banyolama işlemine tabi tutulur. Pozlama sırasında yapısı değişen kısımlar çözdürülerek desenleme işlemi tamamlanır. Tüm bu prosesler sırasındaki sıcaklık, bekleme süresi, pozlama dalgaboyu, pozlama gücü, pozlama süresi, çözücü konsantrasyonu ve çözdürme süresi gibi parametreler işin gereksinimlerine özel olacak şekilde hassas olarak ayarlanarak belirlenir. Proses gereksinimlerine uygun

olacak şekilde malzemeler aynı kalsa bile parametreler işe bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Fotolitografide elde edilecek çözünürlük, kullanılan UV ışığın dalgaboyu ile sınırlıdır [36].

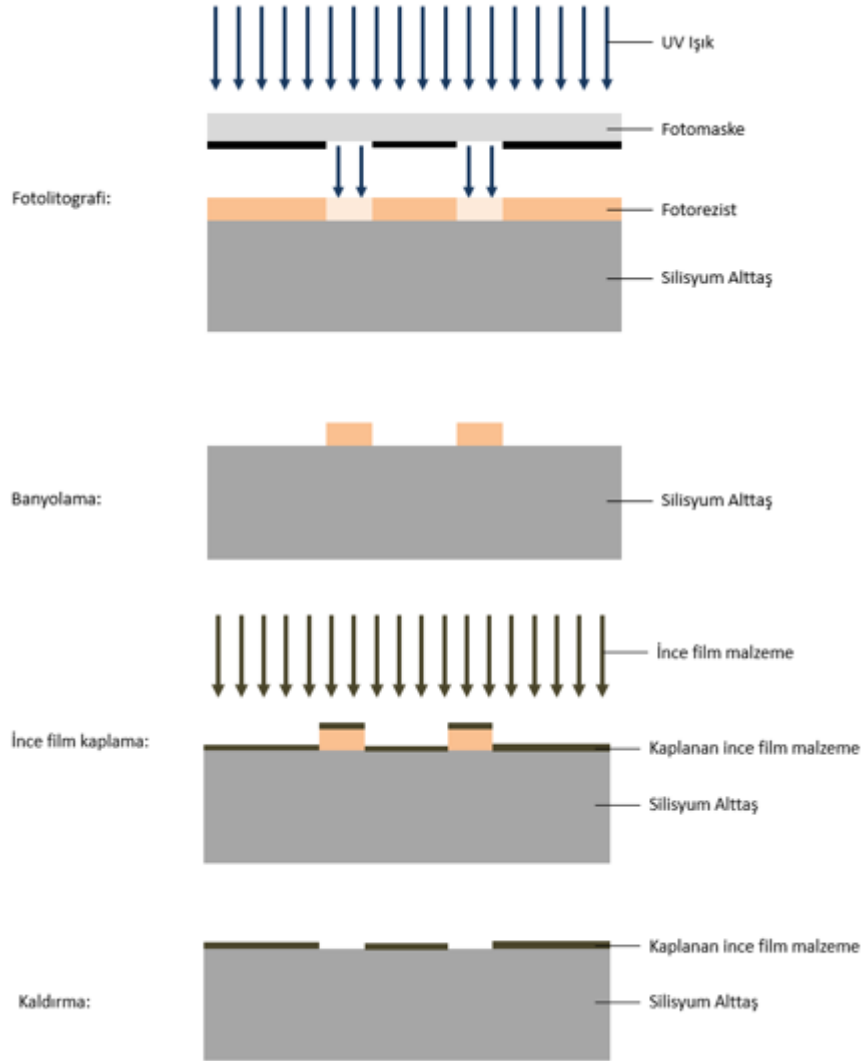
Bazı fotolitografi kimyasalları terslenir niteliktedir. Bu tip polimerler pozlandıği durumda çözülebilir hale gelmek yerine çözülemez hale gelir ve negatif tonlu olarak isimlendirilirler. Özellikle ince film kaplama gibi prosesler öncesindeki litografilerde negatif tonlu polimerler kullanılması proses kalitesini artırıcı niteliktedir [37]. Pozitif ve negatif tonlu fotorezistler ile uygulanan fotolitografi prosesinin yukarıda anlatılan adımlarının şematik gösterimleri Şekil 3-1’de verilmiştir:



Şekil 3-1 Pozitif ve negatif tonlu fotorezistler için ayrışan fotolitografi proses adımlarının şematik gösterimi.

Mikrofabrikasyon prosesleri arasında fotolitografi adımı bir araç prosesidir. Amaç; fotolitografiden sonra gelen procesi uygulayarak desenleme işlemini kalıcı olarak alttaş üzerine geçirmektir. Tez kapsamında yürütülen çalışmalarda fotolitografi işlemine ince film metal kaplama procesi için başvurulmuş ve bu amaçla negatif

tonlu fotorezist kullanılmıştır. Bu proses akışının tüm adımlarının şematik gösterimlerine Şekil 3-2'de yer verilmiştir.



Şekil 3-2 Negatif tonlu fotorezist ile litografi ve ince film kaplama prosesleri.

Şekil 3-2'de yer verilen adımlarda ince film kaplama prosesi sonrasında kaldırma adımının uygulandığı görülmektedir. Bu işlem sıvı kimyasal içerisinde belli bir süre bekletilerek veya sıcaklık ve titreşim gibi dış müdahaleler uygulanarak gerçekleştirilen bir işlemdir. Burada temel amaç fotorezist ile kapatılmış bölgelerin, üzerinde kalan ince film malzemesi ile birlikte örnekten uzaklaştırılmasıdır. Bu işlem sonucunda fotolitografi prosesinin tüm kalıntıları alttaş üzerinden alınmış fakat fotolitografi işlemi aracılığıyla desenlenmiş bir ince film kaplama prosesi gerçekleştirilmiş olur. Burada görselleştirilen ince film kaplama tekniği, elektron

demeti ile buharlaştırmadır. Dielektrik ince film kaplama teknikleri yüksek sıcaklığa ihtiyaç duymaları nedeniyle fotorezist kimyasalı ile önceden desenlenemezler. Burada uygulanan işlem ise dielektrik ince film kaplama işlemi sonrasında fotolitografi uygulanması ve desenlemenin aşındırma yolu ile yapılmasıdır [38]. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda dielektrik ince film desenlenmesine ihtiyaç duyulmamıştır.

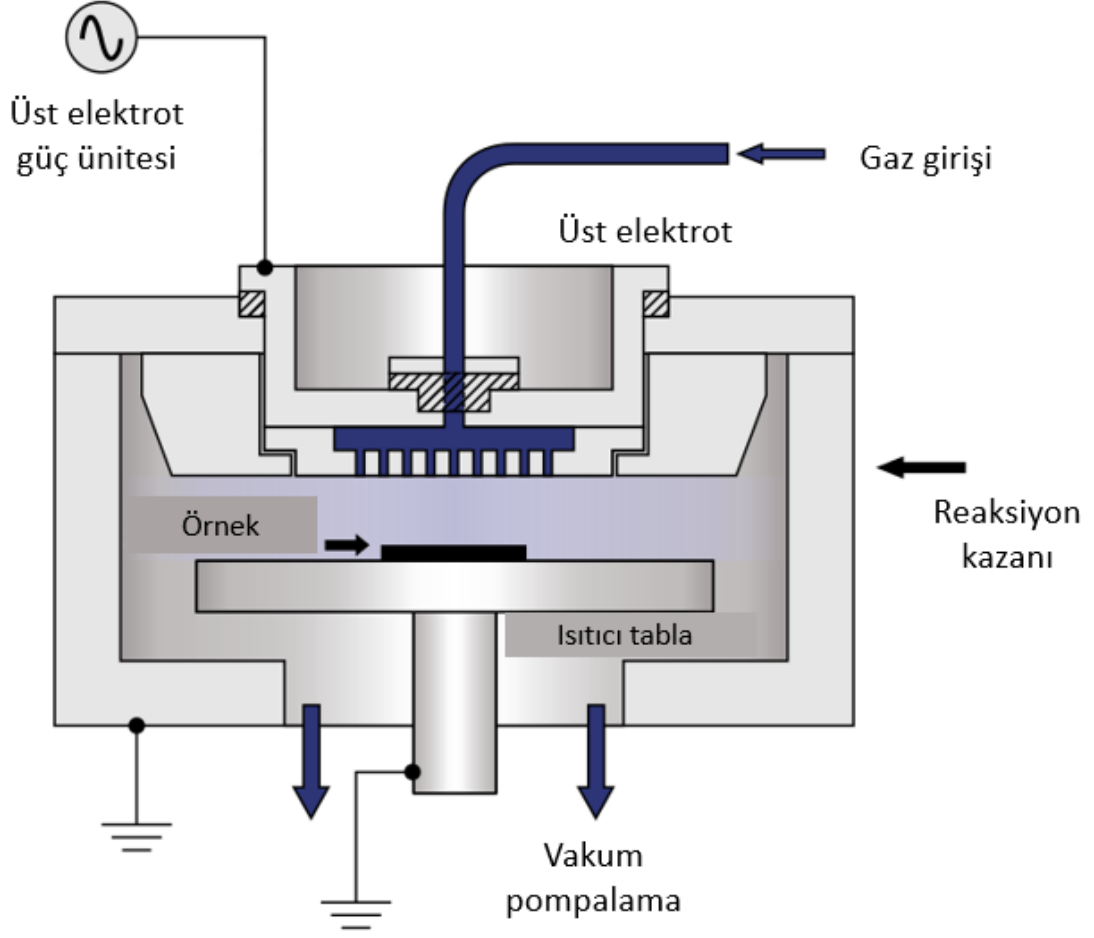
3.2 İnce Film Kaplama Teknikleri

İnce film, nanometre mertebesinden birkaç mikrometre kalınlığa kadar ulaşabilen bir tabakanın adıdır [39]. 20. Yüzyılda ince film kaplama tekniklerinde yaşanan ilerlemeler ile birlikte elektronik, optik, makine, otomotiv, enerji, depolama, sağlık, endüstri, beyaz eşya gibi çok çeşitli sektörlerde kullanılır olmuştur. İnce filmlerden beklenen performans kriterleri, kimi sektörde dayanıklılık ve sağlamlık gibi isterler olurken kimi sektörde ise optik gereksinimler olmuştur [39]. Yakın bir örnek; evlerde iyi bir metal yansıtıcı ince film katmanla kaplanmış olan cam aynalarıdır. Yarıiletken çip sektöründe de ince film kaplama tekniklerine çok geniş bir çerçevede başvurulmaktadır [33].

Tez kapsamında yürütülen çalışmalarda da inceleme altına alınan dielektrik ince filmlerin uygulamasına başvuru kaplama teknikleri bu bölümde mercek altına alınmış ve literatür düzeyinde teknik bilgilere yer verilmiştir.

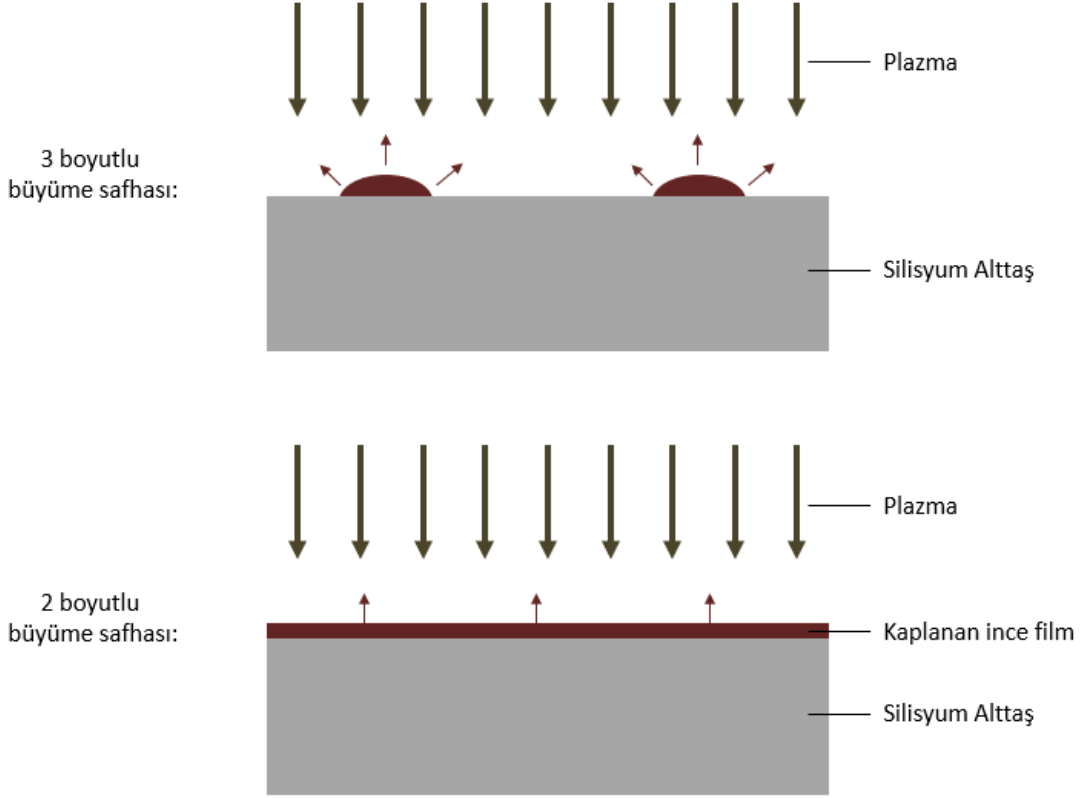
3.2.1 Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme (PECVD)

Tez kapsamında inceleme altına alınan ince film dielektrikler; Silisyum nitrür (Si_3N_4) ve Silisyum dioksit (SiO_2) plazma destekli kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle kaplanmıştır. Bu yöntem kimyasal buhar biriktirme yöntemini köken alan bir biriktirme tekniğine sahiptir. Reaksiyon kazanı içerisine gaz fazında verilen reaktantların plazma yardımıyla alttaş üzerine çökelerek katı fazda kimyasal olarak bağlanması sağlanır. Bu tekniği ayrı kılan plazma desteği ise reaksiyon kazanı içerisine verilen gazların kapasitif etkiyle deşarj edilerek serbest radikallere ayrıştırılmasıdır. Bu radikaller, alttaşın yerleştirildiği platforma uygulanan RF güç ile yarıiletken üzerine yönlendirilir [37].



Şekil 3-3 PECVD ince film kaplama tekniğinin şematik gösterimi [40].

Altaş üzerinde başta yüzeysel kusurlara tutunarak 3 boyutlu olarak adacıklar halinde başlayan film birikme süreci, adacıkların sıklaşarak tüm yüzeyi kaplamasının ardından 2 boyutlu şekilde devam eder [41].



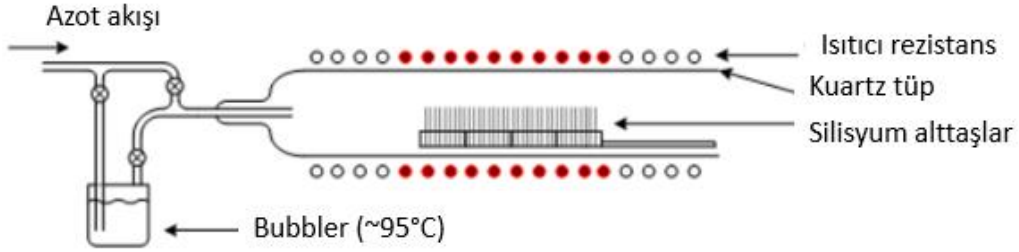
Şekil 3-4 PECVD tekniğinde büyütmenin ilk aşamalarında başlayan 3 boyutlu ve ardından devam eden 2 boyutlu ince film büyüme karakterinin şematik gösterimi.

PECVD tekniğinde film birikme hızı, filmin yoğunluğu, kalınlığı, hedeflenen elektriksel, optik ve mekanik özelliklere ulaşılması noktasındaki optimizasyon faaliyetleri; alttaş sıcaklığı, RF gücü, reaksiyon kazanının toplam basıncı, gaz akış hızları ve gaz akış oranları gibi parametrelerin hassas şekilde ayarlanması yolu ile sağlanır [33].

3.2.2 Islak Termal Oksit Büyütme

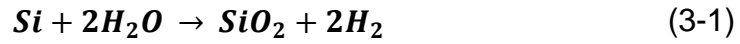
Islak termal oksit büyütme tekniğinin, kimyasal buhar biriktirme tekniğinden farkı Silisyum dioksit için gereken silisyum atomunun dışarıdan bir reaktant aracılığıyla alınması ile değil, doğrudan silisyum kristal içerisindeki atomların kullanılmasını içerir. Bu yönüyle bir biriktirme işlemi değil difüzyon yasalarını esas alan bir büyütme işlemidir [42]. Difüzyon için silisyum kristal örgünün, atomik bağların zayıflayacağı ve kristal içerisine dış ortamdan atomların girebileceği kadar yüksek sıcaklıklara (Ör: >800°C) çıkarılması gereklidir. Bu açıdan PECVD tekniğine kıyasla çok daha

yüksek sıcaklıklara gereksinim duyulmaktadır ve proses yüksek sıcaklıklara dayanıklı kuartz tüp fırınlarda uygulanmaktadır [35].



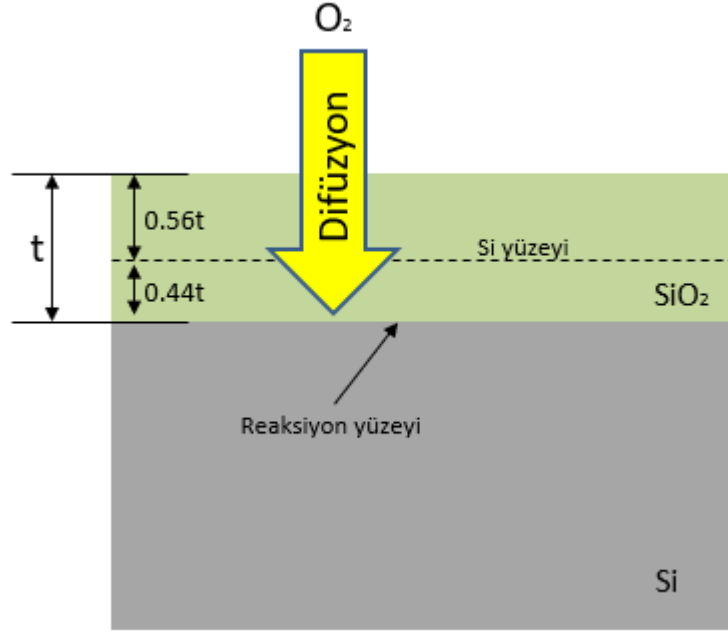
Şekil 3-5 Yüksek sıcaklık fırınında uygulanan termal oksidasyon proses şematiği [43].

Şekil 3-5'te yer verilen proses şematiğinde görüldüğü şekilde, kaynama sıcaklığının hemen altında tutulan saf su içerisinde sürülen inaktif (azot) gaz ile taşınarak su molekülleri yüksek sıcaklık fırını içerisine sürülür. Yüksek sıcaklık içerisinde su molekülünden ayrılan oksijen atomları difüzyon yolu ile silisyum kristal içerisine girerek Silisyum dioksit (SiO_2) yapısını oluşturur. Burada gerçekleşen kimyasal reaksiyon aşağıda gösterilmiştir [33]:



Denklem (3-1)'te gösterilen kimyasal reaksiyonun çıktısı olan Hidrojen gazı ise bir proses artığı olarak su buharı ve azot gazı ile birlikte kuartz tüp fırın egzozundan dışarı atılır.

Termal oksitleme prosesinde bir birikmeden değil, difüzyon yasalarına oturan bir büyüme işleminden söz edildiği için proses sonucunda oluşan ince film oksit tabakanın toplam kalınlığının %44'ü silisyum alıtış içerisinde kalmaktadır [42].

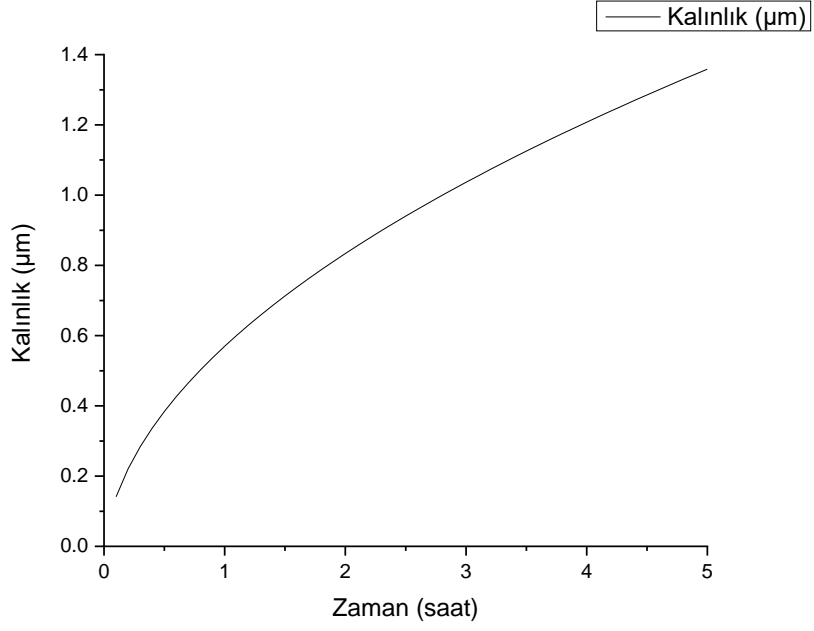


Şekil 3-6 Silisyum dioksit ince filmin silisyum alttaş yüzeyinde büyüme mekanizmasının kesit görünümü.

Tez kapsamında ıslak termal oksit büyütme prosesin 1100°C sıcaklıkta simülasyonu Deal – Grove modeli temel alınarak gerçekleştirilmiştir [44]. Bu modelde oksit kalınlığı $x(t)$ zamana bağlı olarak 3-2'deki eşitlikle verilmektedir:

$$x_0(t) = \frac{B}{A}(t + \tau) \quad (3-2)$$

Burada B, A ve τ difüzyon kinetiğiyle ilgili sabitlerdir. Bu değerler deneysel veriler neticesinde başlangıç olarak alınmış ve zamana bağlı proses projeksiyonu yapılarak büyüme hızı grafiği oluşturulmuştur.



Şekil 3-7 Islak termal oksit prosesinde oksit büyüme hızını gösteren simülasyon grafiği.

Şekil 3-7'de grafiği verilen simülasyon çalışmasında teorik bir yaklaşımla oksit büyüme hızının gösterilmesi amaçlanmıştır. Prosesin başlangıç aşamalarında oksit büyüme hızının görece yüksek olduğu yaklaşık 2 saatin ardından sabit bir hıza eriştiği görülmektedir. Artan oksit kalınlığıyla birlikte difüzyon mesafesinin artması nedeniyle bu durum beklenen bir sonuçtur. Yapılan simülasyon çalışmasında yaklaşık 1000 nm kalınlığındaki bir termal oksit prosesinin 4 saatlik bir difüzyon uygulama zamanına ihtiyaç duyduğu görülmektedir.

3.2.3 Arındırma Kuru Termal Oksit Büyütme

Islak termal oksit büyütme prosesinin yanı sıra, Şekil 3-5'te şematize edilen proseten farklı olarak bir su buharı jeneratörü kullanmadan oksijen gazının doğrudan tüp fırın içerisine verilmesi suretiyle de oksit film büyütme prosesi uygulanabilir. Bu yöntem kuru termal oksit büyütme adı verilir. Bu teknikte reaksiyon artığı olarak Hidrojen gazı oluşmaz, oksit film yoğunluğu daha yüksek olur fakat reaksiyon hızı düşer. Bu prosete takriben 1000 nm oksit kalınlığına ulaşmak için ıslakta birkaç saat mertebesinde olan proses zamanınının 1 – 2 gün seviyesine yükseltilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır [45].

Bu uzun proses zamanına rağmen getirdiği daha yoğun moleküler düzenlenim ve pasivasyon kalitesi nedeniyle final aygıtın gereksinimleri çerçevesinde kimi zaman doğrudan kuru termal oksitleme yöntemi tercih edilmesi gerekebilir. Prosese kuru oksitleme yöntemiyle başlanıp ıslak devam edilmesi de bir seçenektir. Bu sayede kuru oksitleme ile başlatılan sıkı moleküler düzenlenim, ıslak ile de devam ettirilerek, sıfırdan başlatılan ıslak prosese göre daha yoğun yapı elde edilir [46].

Arındırma işlemi ise birden çok termal döngü ile kristal örgü içerisindeki safsızlıkların elektriksel olarak inaktif hale getirilmesidir. Bu işlem kristal içerisinde oksijen atomlarının çökmesi aracılığıyla bir termal döngü prosesini takip edecek şekilde gerçekleştirilir. Proses, yüksek bir sıcaklıkta kuru oksitleme ile başlatılır. Belli bir süre sonra kristalin difüzyon serbestliğini kaybedeceği sıcaklığa inilerek uzun süre oksijen moleküllerinin çökmesi için beklenir. Bu kontrollü çökeltme işlemi ile kristalde kusur yoğunluğu artırılmış olur. Akabinde yeniden yüksek sıcaklığa çıkılarak kontrollü şekilde yaratılan kusur kümelerinin kristaldeki hareket kabiliyetleri artırılır ve safsızlıkların bu kusur kümelerine bağlanarak inaktif olmaları sağlanır. Birkaç gün süren bu termal döngü prosesinde birbirinden dağınık ve ayrık halde bulunan safsızlıklar bilinçli ve kontrollü şekilde oluşturulan kusur kümeleri içerisine toplanıp hapsedilerek pasifleştirilir [47], [48].

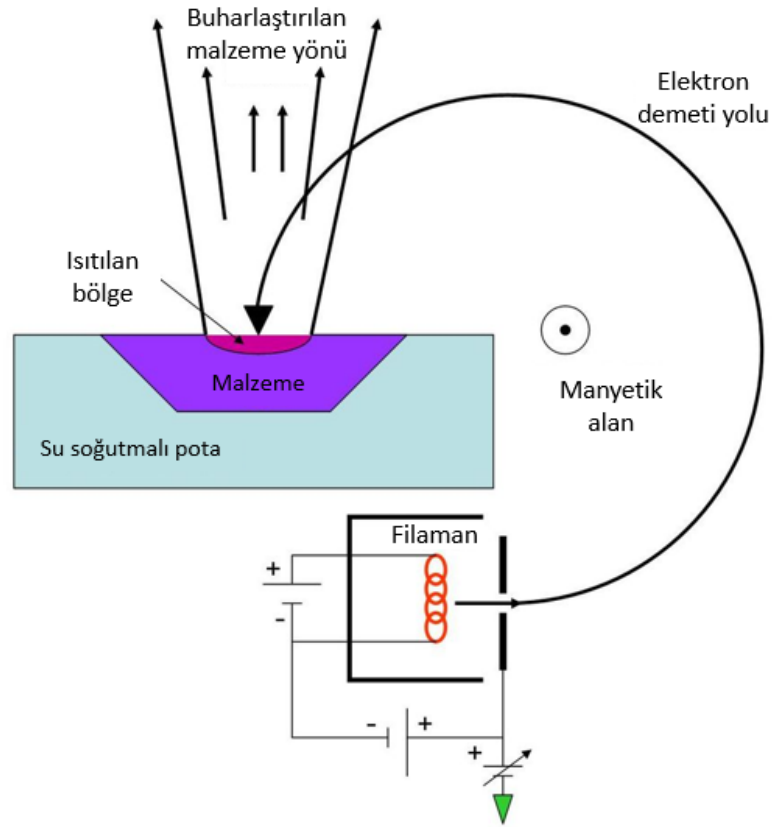
Tez kapsamında yürütülen çalışmalarda arındırma kuru oksitleme prosesi ile oluşturulan dielektrik Silikon dioksit (SiO_2) ince filmin pasivasyon kalitesinin gözlenmesi hedeflenmiştir. Uygulanan prosese dair uygulama detayları Bölüm 6.3 “Arındırma Kuru Termal Oksit Kaplama Prosesleri” başlığı altında tartışılacaktır.

3.2.4 Elektron Demeti ile Buharlaştırma

Elektron demeti ile buharlaştırma tekniği, bu kısma kadar incelenen ince film kaplama tekniklerinden fiziksel bir kaplama tekniği olması nedeniyle ayrılmaktadır. Daha önceki teknikler gaz fazında gerçekleşen kimyasal süreçleri içerirken, bu teknik malzemenin katı fazda doğrudan fiziksel olarak buharlaştırılmasını içermektedir [37].

Kaplanacak olan malzeme, özel bir pota içerisine katı fazda yerleştirilir ve yüksek vakum altında tungsten filamandan koparılan elektronlar hızlandırılarak pota içerisindeki malzemeye manyetik alan vasıtasıyla doğrudan yönlendirilir. Malzeme

üzerine odaklandırılmış yüksek enerjili elektronlar, yüksek vakum altında malzemenin erimesine ve buharlaşmasına yol açarlar. Buharlaşan malzeme potadan uzaklaşarak reaksiyon kazanı içerisindeki yüzeylere çarparak soğur ve tutunduğu yerde katı faza geçerek çöker. Buharlaştırılan malzemenin karşısında konumlandırılan örnek yüzeyi yüksek yoğunlukta olmak üzere potanın açışal doğrultusu içerisinde kalan tüm kazan yüzeyleri ince bir tabaka ile kaplanmış olur [33].



Şekil 3-8 Elektron demeti ile buharlaştırma tekniğinin şematik gösterimi [49].

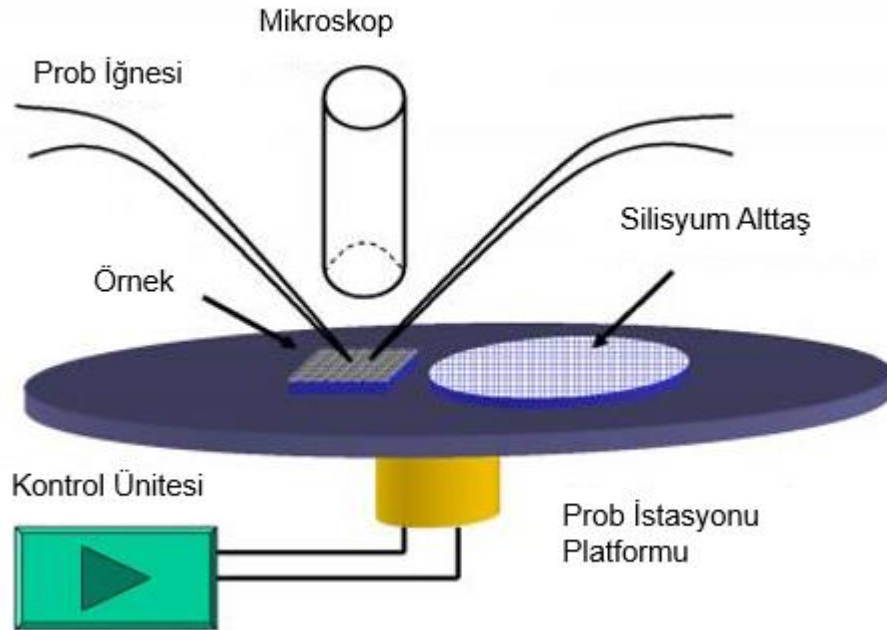
Elektron demeti ile buharlaştırma tekniğiyle aygıt kontaklarını oluşturacak olan metalik yapıda ince filmler kaplanabileceği gibi dielektrik malzemeler de kaplanabilmektedir. Tez kapsamında yürütülen çalışmaların dielektrik CV ölçümleri kısmında metal kontak oluşturulması amacıyla metalik ince filmlerin kaplanması için bu tekniğe başvurulmuştur.

4. Karakterizasyon Teknikleri

4.1 Prob İstasyonu Düzenegi

Prob istasyonu, yarıiletken aygıtların karakterizasyonu için kullanılan, aygıt kontakları üzerinden fiziksel bağlantı aracılığı ile elektriksel sinyal almayı sağlayan mekanik bir düzendir. Prob istasyonunda, yarıiletken aygıtın kontakları üzerine hassas şekilde ayarlanarak fiziksel olarak konumlandırılabilir ince uçlu iletken iğneler bulunur. Bu iğneler prob istasyonu düzenegine eklenmiş bir mikroskop vasıtasıyla ayarlanarak metal kontaklar üzerine dokundurulur [50].

Yarıiletken aygıtın çalışma sistematigine uygun olacak şekilde elektriksel olarak uyarılması yoluyla prob iğneleri üzerinden sinyaller alınır ve osiloskop veya SMU (Source measure unit) üzerinden bu sinyaller görüntülenir. Prob istasyonu düzeneginin şematik görünümüne Şekil 4-1'de yer verilmiştir.



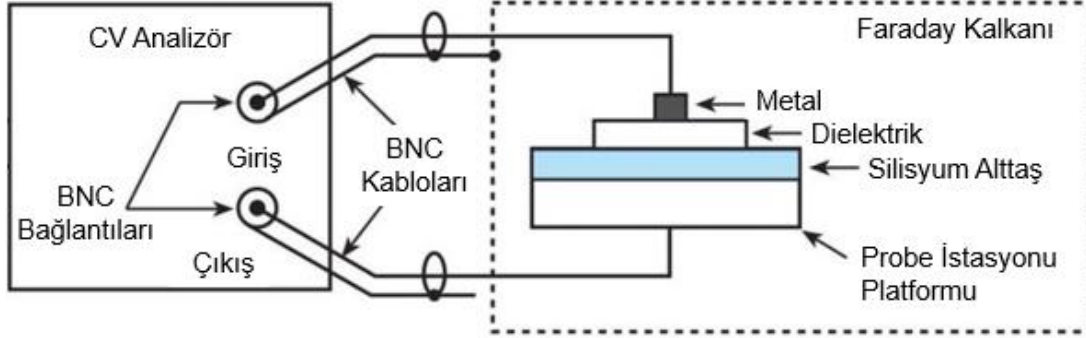
Şekil 4-1 Prob istasyonu düzeneginin şematik görünümü [51].

4.2 Kapasitans – Voltaj (CV) Ölçümü

Tez kapsamında yürütülen dielektrik ince film karakterizasyon çalışmalarında CV ölçümleri prob istasyonu düzeneginde gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümün teknik arka

planına Bölüm 2.2.2 “Dielektrik İnce Filmlerin Pasivasyon Amacıyla Kullanılması” başlığında detaylıca değinilmiştir.

Prob istasyonu üzerinde gerçekleştirilen CV ölçümlerinin şematik görünümüne Şekil 4-2’de yer verilmiştir.



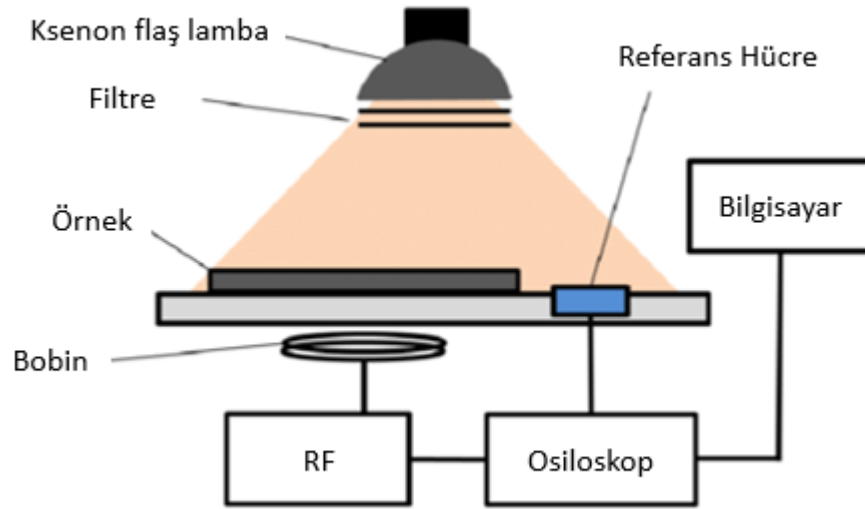
Şekil 4-2 Prob istasyonu ve CV analizörünün elektriksel bağlantıları [52].

4.3 Sanki Kararlı Durum Fotoiletkenlik Ölçümü

Fotoiletkenlik, yarıiletken malzemenin üzerine düşen fotonları soğurması yoluyla oluşan taşıyıcı enjeksiyonu yoluyla elektriksel iletkenliğinin değişmesine verilen isimdir. Malzemenin foton ile uyarılması nedeniyle foto- ön ekini alır. Fotonun yarıiletken tarafından soğurulması, yarıiletkenin yasak enerji aralığıyla doğrudan ilgilidir ve bu nedenle malzemeye özgü bir dalgaboyu kullanılması gereklidir. Soğurulma sonrasında oluşan taşıyıcıların yoğunluğu ölçülerek kristal yapı içerisindeki safsızlıklar ve kusurların yoğunluğu tespit edilebilir [53].

Fotoiletkenlik ölçümü ile altaş kristal örgüsü içerisindeki safsızlıklar görüntülenebileceği gibi eğer çok yüksek dirençli (dolayısıyla çok düşük safsızlık yoğunluklu) altaşlar üzerinde yer alıyorsa, dielektrik karakterizasyonları da yapılabilir [54]. Bu sayede ölçüm sırasında altaştan gelecek olan gürültüler minimize edilmiş olur. Diğer taraftan özellikle dielektrik – yarıiletken arayüzeyinin karakterizasyonu için zaman çözümülemeli fotoiletkenlik ölçüm düzeneği kullanılır. Bu sistemde ek olarak uyarılma ve sönümlenme arasındaki zaman ölçülür. Esasında bu zaman parametresi taşıyıcıların kristal içerisindeki ömrünü ifade eder. Dielektrik – yarıiletken arayüzeyinde indüklenen taşıyıcıların değerlik bandına geçme zamanlarını belirleyen etken rekombinasyon merkezi yoğunluğudur. Bu

merkezlerin yoğunluğu ise doğrudan dielektriğin sağlaması beklenen elektriksel pasivasyon kalitesini gösteren bir parametredir. Dolayısıyla zaman çözümlü fotoiletkenlik ölçüm tekniğiyle taşıyıcı ömürleri ölçümlenerek dielektrik pasivasyon kalitesi karakterize edilebilmektedir [55]. Bu ölçüm, yarıiletkenin sanki kararlı durumda tutulması yoluyla elde edilir Ölçüm sırasında tek bir ışık atması değil, zamanla azalan şekilde bir aydınlatma verilir ve taşıyıcı yoğunluğunun ölçüm boyunca denge durumunda olduğu kabul edilir [56].



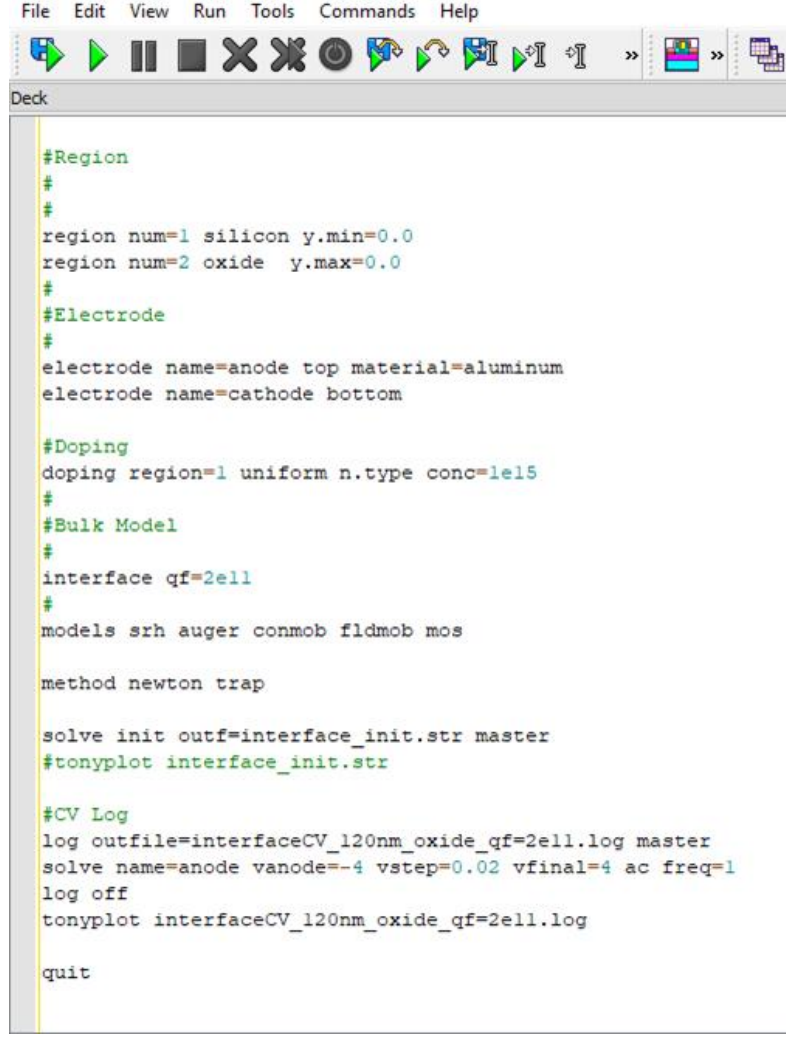
Şekil 4-3 Sanki kararlı durum fotoiletkenlik deney düzeneğinin şematik görünümü [57].

Tez kapsamında bu yönteme başvurulmuş ve farklı yapılardaki dielektrik malzemelerin zaman çözümlü sanki kararlı durum fotoiletkenlik ölçümleri yapılarak taşıyıcı ömürleri üzerinden gidilerek pasivasyon kaliteleri karşılaştırılmıştır.

5. Simülasyon Çalışmaları

Fotodedektör aygıtlarının çalışma performanslarının artırılması noktasında ince film kaplamalarının önemli yeri bulunmaktadır. Yarıiletken temelli aygıtlarda, teknoloji konsepti gereği sıklıkla uygulanan ince filmler fotodedektörlerin ışık algılama kapasitesini üst seviyeye çekerken, diğer taraftan karanlık durumda istenmeyen kaçak akımların düşürülmesi noktasında da katkı sunacak şekilde elektriksel özellikleri etkilemektedir. Bu etkinin gerçek dünyada hayata geçirilmeden önce bilgisayar destekli simülasyon çalışmalarının yürütülmesi ve performans düzeylerinin optimizasyonu için çalışmalar gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmalarda temel hedef: En iyi sonucu veren ince film teknik özelliklerinin, yürütülecek deneysel çalışmalar öncesinde bilgisayar ortamında test edilerek görülmesi ve deneysel çalışmalar için test edilmiş bir ilerleme istikameti belirlenmesidir.

Bu motivasyondan hareketle, simülasyon çalışmaları, silisyum malzemesine özgü yarıiletken fiziği alanında içerdiği geniş bilimsel arşiv nedeniyle Silvaco yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu yazılımın içeriğinde bulunan bilimsel modellerin başlangıç niteliğinde kullandığı parametreler, Silisyum'a göre belirlenmiş olduğundan Silvaco yazılımının özellikle Silisyum elementini temel alan yarıiletken aygıtların simülasyonları için oldukça elverişli olduğu kabul edilmektedir. Silvaco yazılımı kapsamında bulunan modüller, simülasyon çalışmalarının farklı uygulamalar çerçevesinde gerçekleştirilebilmesini olanaklı kılmaktadır. Bu modüllerden en sık kullanılan iki tanesi Atlas ve Athena'dır. Athena modülünde proses merkezli simülasyonlar yapılabildiği gibi Atlas modülünde doğrudan aygıt modeli oluşturularak elektriksel ve optik simülasyonlar, proseslerden bağımsız olarak doğrudan aygıt bünyesinde gerçekleştirilebilmektedir. Tez kapsamında yapılan simülasyon çalışmaları, aygıt bazlı olduğundan ve proseslerden bağımsız olarak ince film dielektrik katmanlarının aygıt performansına etkisinin incelenecek olmasından dolayı simülasyon çalışmalarının ağırlıklı olarak Atlas modülü kullanılarak gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Atlas modülünde yürütülen simülasyon çalışmaları Silisyum tabanlı fotodedektör modelleri geliştirilerek uygulanmıştır.



```
#Region
#
#
region num=1 silicon y.min=0.0
region num=2 oxide y.max=0.0
#Electrode
#
electrode name=anode top material=aluminum
electrode name=cathode bottom
#Doping
#
doping region=1 uniform n.type conc=1e15
#Bulk Model
#
interface qf=2e11
#
models srh auger conmob fldmob mos
method newton trap
solve init outf=interface_init.str master
#tonyplot interface_init.str
#CV Log
log outfile=interfaceCV_120nm_oxide_qf=2e11.log master
solve name=anode vanode=-4 vstep=0.02 vfinal=4 ac freq=1
log off
tonyplot interfaceCV_120nm_oxide_qf=2e11.log
quit
```

Şekil 5-1 Simülasyon çalışmalarının yapıldığı Silvaco yazılımında model kodlamalarının girildiği “Deckbuild” penceresinin görünümü.

Şekil 5-1’de Silvaco yazılımın “Deckbuild” olarak adlandırılan kod giriş penceresi görülmektedir. Bu pencere üzerinden Silvaco yazılımının kodlama sistematiğine uygun şekilde modeli oluşturan tüm parametreler sisteme girilmektedir. Görüntüde Silisyum alttaşın ve oksit tabakasının belirlendiği “Region” kodları, arka plan katkı konsantrasyonunun belirlendiği “Doping” kodları, arayüzey yük yoğunluklarının belirlendiği “Interface” kodları ve hesaplama metotlarının belirlendiği “Models” kodlarının tanımlandığı görülmektedir. “Log” kod başlığı altında ise oluşturulan aygıtın voltaj beslemesi yapılarak hesaplama sınırları belirlenmiştir.

Bilgisayar destekli simülasyon çalışmalarında parametrik uygulamalar yapılmıştır. Fotodedektör performansına etkisi incelenecek olan ince film dielektrik özelliği tekil

olarak ele alınmış ve ilgili simülasyon hesaplamalarının özel parametresi olarak kabul edilerek modeller oluşturulmuştur. Modelin oluşturulması sırasında tekil olarak incelenecek olan parametrenin dışında kalan diğer tüm niteliksel özellikler temel düzeyde tanımlanarak sabit tutulmuştur. Model oluşturulduktan sonra hesaplamalar yalnızca ilgili parametrenin değiştirilmesi ve fotodedektör performansına olası etkilerinin analiz edilmesi yoluyla gerçekleştirilmiştir. Bu anlayıştan hareketle, yalnızca ilgili parametrenin değiştirilmesiyle oluşturulmuş veri setleri elde edilmiş, diğer tüm parametreler sabit tutulmuş ve dolayısıyla parametre değişiminin performansa etkisi doğrudan gözlemlenmiştir. Mercek altına alınan her bir parametre için temel yaklaşım mantığı aktarılmış olan parametrik simülasyon hesaplamaları, performans etkisinin yeterince anlaşılmasına imkân sağlayacak sayıda iterasyonla gerçekleştirilmiş ve parametre – performans ilişkisi ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır.

Bu çalışma mantığından hareketle, ince film dielektriklerin, fotodedektör performansına etkileri öncelikle optik açıdan ele alınmış ve yansımaya ile kaybedilen ışığın en aza indirilmesi noktasında performans sergileyen “yansımaya önleyici dielektrik filmin” optimizasyonu için simülasyon çalışmaları parametrik olarak gerçekleştirilmiştir.

5.1 Dielektrik İnce Filmlerin Yansımaya Önleyici Performanslarının İncelenmesi

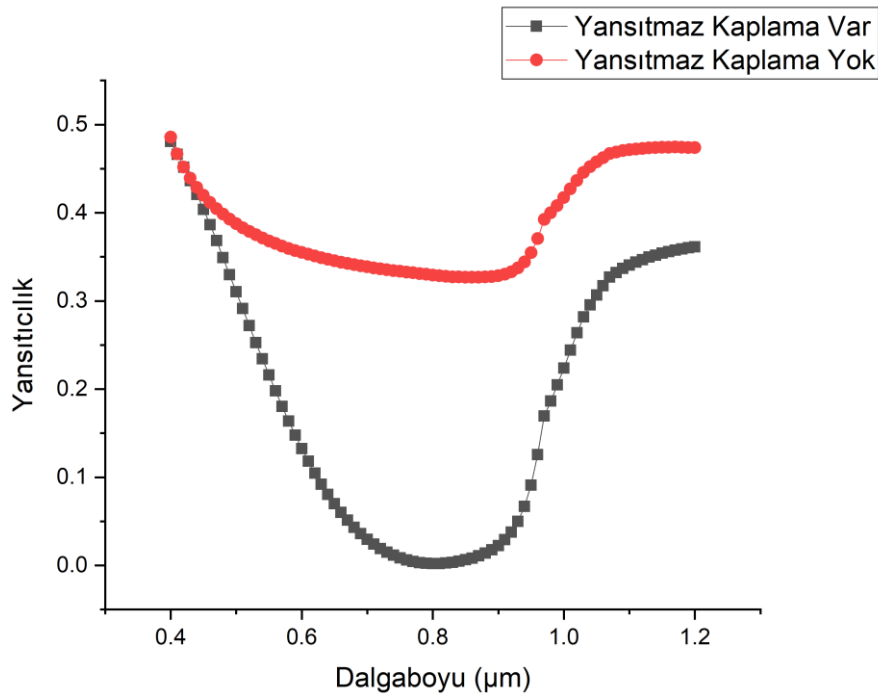
Bir fotodedektörün maksimum fotocevap performansına erişebilmesi için silisyum alttaş soğurma bölgesine mümkün olan en yüksek oranda kayıpsız şekilde ışığın ulaştırılması gerekmektedir. Bunun yolu ise yüzey geçişlerinde yansımaya ile kaybedilen ışığı, mümkün olan en düşük seviyede tutmaktır. Bu amacı gerçekleştirmek üzere ışığın geldiği ve gireceği ortamın kırma indisleri arasındaki farkı azaltacak şekilde optimize edilmiş bir yansımaya önleyici ince film katmanının büyütülmesi gerekmektedir.

Bu konudaki literatür bilgisi ve teorik hesaplamalar “2.2.2 Dielektrik İnce Filmlerin Pasivasyon Amacıyla Kullanılması” başlığı altında ele alınmıştır. Dielektrik filmlerin geliştirilmesi noktasında, teorik hesaplamalar başlangıç niteliğinde bilgi sunabilmekte fakat gerçeğe daha yakın sonuçlar için simülasyon çalışmalarına

başvurulması gerekmektedir. Çünkü simülasyon hesaplamalarında bilgisayar desteğiyle birlikte tüm fiziksel paradigmlar hesaplamaların içerisine kolaylıkla dahil edilebilmektedir.

Bu bölümde ele alınacak simülasyonlar, dielektrik filmlerin tekil parametrelerini baz alarak yapılmış çalışmaların sonuçlarını içermektedir. Bu parametreler kırma indisi, kalınlık ve materyal gibi spesifik özelliklerdir. Tekil parametrelerin birbirinden ayrık sonuçları çalışma sonucunda ortak bir potada birleştirilerek yaklaşım yapılmıştır.

Simülasyon çalışmalarına öncelikle teorik hesaplamaların uyumunu görmek ve yansıtma film olup olmadığı durumları doğrudan karşılaştırmak amacıyla bir model geliştirilerek başlanmıştır. 1.87 kırma indisine sahip, 100 nm kalınlığındaki Si_3N_4 dielektrik tabakasına sahip bir Silisyum tabanlı fotodedektör modeli oluşturulmuştur. Bu modelde, dalgaboyu 400 ile 1200 nm arasında 10 nm aralıklarla değişen monokromatik ışık için optik yansıtıcılık değerleri yüzey normalinde gelen açıda hesaplanmıştır. Aynı çalışma model üzerindeki yansıtma ince film tabakanın kaldırılmasıyla da tekrarlanmıştır. Elde edilen verilerle oluşturulan iki eğri, aynı grafikte üst üste çizdirilmiştir.



Şekil 5-2 Si_3N_4 yansıtma ince filmin yansıtma performansına etkisi.

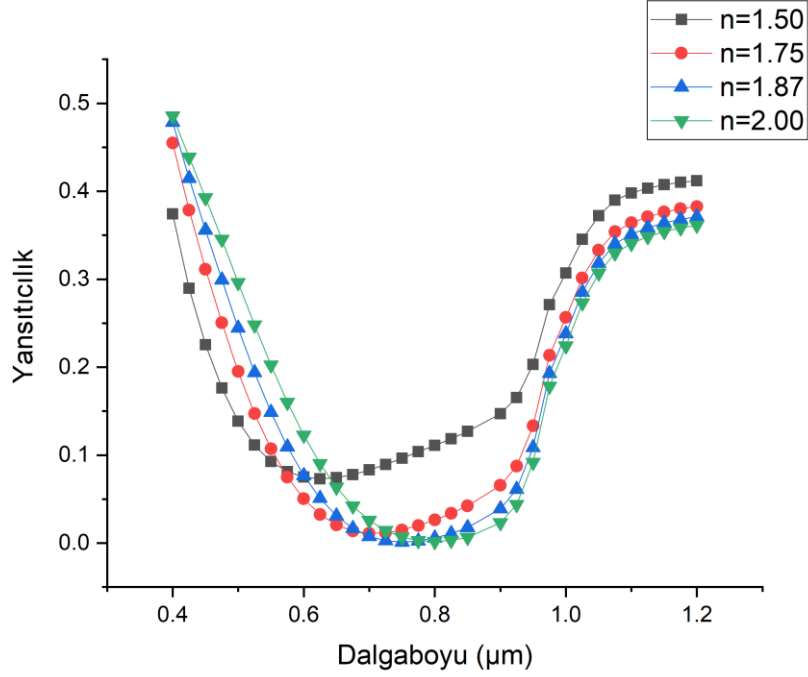
Şekil 5-2'deki grafik incelendiğinde yansıma önleyici ince filmin yansıma performansına olan etkisi görülmektedir. Herhangi bir yansıma önleyici tabaka yokken model üzerine düşen ışığın 800nm'de yaklaşık %33'ü ön yüzden yansımaktadır. Bu yansıyan ışık, alttaş içerisine hiç girmemekte, dolayısıyla soğurma olasılığı, malzeme içine girmeden önemli miktarda azalmaktadır. Bunun önüne geçebilmek ve yansıma oranını azaltmak için teorik olarak hesaplanarak elde edilen 1.87 kırma indisli ve 100 nm kalınlığa sahip Si_3N_4 ince film tabaka simülasyon modelinin ışığın girdiği üst yüzeyine yerleştirilmiştir. Bu durumda 800 nm'de %33'larda olan yansıma oranı %0.2'lere gerilemiştir. Bu simülasyon çalışmasından silisyum tabanlı fotodedektörlerin fotoakım verimi üzerinde yansıma önleyici ince filmin önemli derecede etkili olduğu anlaşılmış ve ilerleyen simülasyon çalışmalarına geçilmiştir.

5.1.1 Dielektrik Kırma İndisinin Etkisi

Kırma indisi, dielektrik ince film geliştirme ve optimizasyon çalışmaları sırasında öncelikle ele alınması gereken parametredir. Filmin yoğunluğunun, kimyasal bağ oranlarının ilişkili olduğu malzemenin ışıkla etkileşimini belirleyen bir parametredir. Yansıma söz konusu olduğunda da kırma indisi doğrudan belirleyiciliğe sahiptir. Bu etki kırma indisinin parametrik simülasyonlarıyla görülmeye çalışılmıştır.

Silisyum alttaş üzerine 100 nm kalınlıkta Si_3N_4 dielektrik ince film yerleştirilerek bir model oluşturulmuştur. Bu model üzerine 400 – 1200 nm aralığında ışık düşürülerek yansıma değerleri hesaplatılmıştır. Her hesaplamada Si_3N_4 dielektrik ince film katmanının kırma indisi değiştirilerek yeniden girilmiştir. Oluşturulan eğriler aynı grafik üzerinde çizdirilerek karşılaştırma yapmaya imkân tanıyan grafiksel gösterimler oluşturulmuştur.

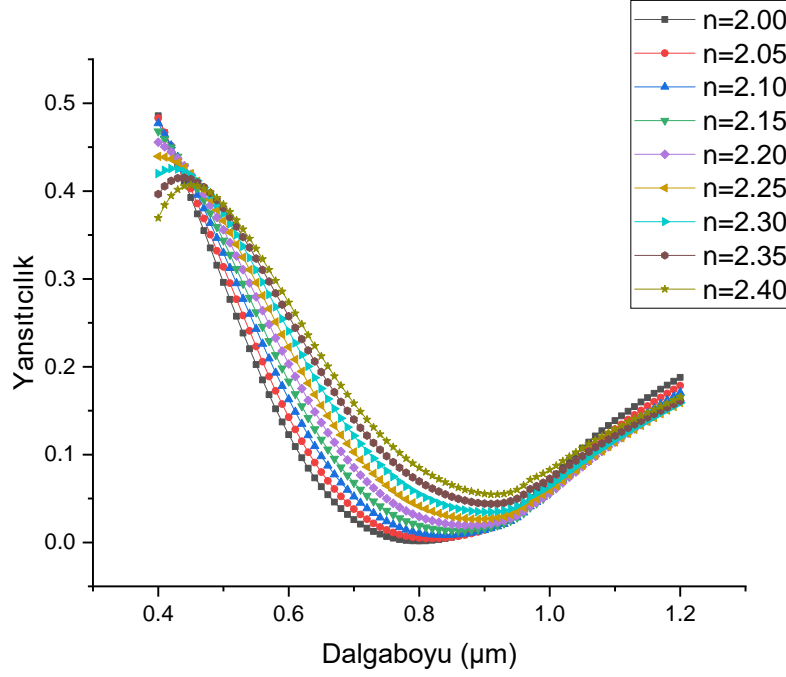
İçlerinde Si_3N_4 'ın kırma indisini de içerecek 4 farklı kırma indisinde, 1.50, 1.75, 1.87 ve 2.00 değerleri için yapılan simülasyon çalışmasının grafiği Şekil 5-3'te verilmiştir:



Şekil 5-3 1.50, 1.75, 1.87 ve 2.00 kırma indisine sahip silisyum yüzeyinden 400 – 1200 nm dalgaboyu arasındaki yansıma değerleri.

Şekil 5-3 incelendiğinde 1.50 kırma indisi eğrisinin 400 – 600 nm aralığında minimum yansıtıcılık sağlarken daha uzun dalgaboyları için yansıtma verimliliğini kaybettiği görülmüştür. Diğer eğrilerin yansıtıcılık performansları arasında toplamda bir fark görülmezken kırma indisi arttıkça grafikte sağa doğru kayma gerçekleştiği görülmüştür. Yüksek kırma indisleri için minimum yansıtıcılık çukuru (600 – 1000 nm aralığı) büyük dalgaboylarına içerecek şekilde sağa kaymaktadır.

Bu durumun daha yüksek kırma indisleri için geçerli olup olmadığının test edilmesi için simülasyon çalışmaları daha yüksek hassasiyet içerecek şekilde yüksek kırma indisleriyle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5-4 Kırma indisi 2.00 ve 2.40 aralığında değişen dielektrik ince film için yansıtıcılık eğrileri.

Şekil 5-4 incelendiğinde kırma indisi artırıldığında yansıtıcılık grafiğinde görülen yüksek dalgaboylarına doğru kayma davranışının 2'nin üzerindeki kırma indisi değerleri için de devam ettiği görülmüştür. Ancak bunun yanı sıra hava - silisyum geçişi için teorik hesaplamalarla bulunan optimum kırma indisi değeri olan 1.87'den uzaklaşıyor olmasıyla birlikte yansıtma performansında da azalma görülmesi dikkat çekicidir. 2.00 için okunan en düşük yansıtma değeri %1'lerdeyken 2.40 için bu değerler %8'lere çıktığı görülmektedir.

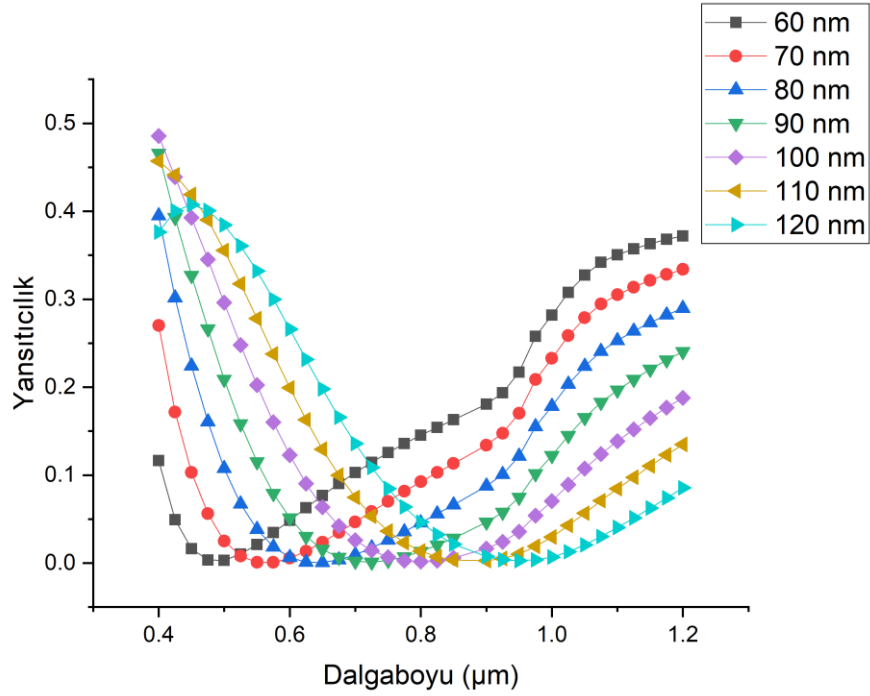
Dielektrik ince filmler için kırma indisi parametresi merkezinde yapılan simülasyon çalışmalarının teorik hesaplamalarla uyumlu olarak en düşük yansıtma değerini 1.87 için verdiği görülmüştür.

5.1.2 Dielektrik Kalınlığının Etkisi

Kırma indisi için yapılan çalışmaların ardından teorik hesaplamalarda da yer bulan kalınlık parametresi inceleme altına alınmıştır. Simülasyon çalışmaları aynı Hava –

Si_3N_4 – Silisyum yapısı kullanılarak, 1.87 kırma indisi değeri sabit olarak tutulmak suretiyle parametrik kalınlık değerleriyle ilerletilmiştir.

Simülasyon çalışmalarında 1.87 kırma indisine sahip, kalınlıkları 60 ile 120 nm arasında değişen farklı Si_3N_4 dielektrik tabakaları üzerine 400 ile 1200 nm arasında dalgaboyuna sahip olan ışık düşürülmüş ve bu aralıktaki her 25 nm’de bir yansıtıcılık değerleri hesaplatılmıştır.



Şekil 5-5 Kalınlıkları 60 – 120 nm aralığında değişen Si_3N_4 dielektrik tabakalarının 400 – 1200 nm dalgaboyu aralığında hesaplatılan yansıtıcılık değerleri.

Şekil 5-5’te görüldüğü gibi kalınlık parametresinin değiştirilmesi, minimum yansıtıcılık elde edilen dalgaboyunu önemli ölçüde değiştirmektedir. Kalınlıkta meydana gelen artış, kırma indisinde görülen duruma benzer şekilde grafiğin sağa doğru kaymasına ve minimum yansıtıcılık noktasının uzun dalgaboylarını kapsamaya yol açmaktadır.

Dielektrik kalınlıklarının değiştirildiği parametrik simülasyonda, kırma indisini baz alan simülasyon sonuçlarından farklı olarak toplam yansıtıcılık performansının değişmediği görülmüştür. Grafikte kalınlığın değişimiyle birlikte görülen temel değişiklik eğride meydana gelen kaymadır. Bu nedenle Hava – Silisyum arayüzeyi

için tek bir optimum kırma indisi değeri (1.87) söz konusuysen kalınlık için belirlenebilecek optimum tek bir değer mevcut değildir. Kalınlık için belirlenecek değer uygulamaya göre değişmekte, fotodedektörün çalışma dalgaboyuna bağımlı olduğu gözlenmiştir. Kalınlığın parametrik olarak incelendiği simülasyonda tüm eğriler için toplam yansıtma performansları eşittir. Kalınlığın değişmesiyle birlikte gerçekleşen tek durum eğrinin sağa veya sola doğru yer değiştirmesidir.

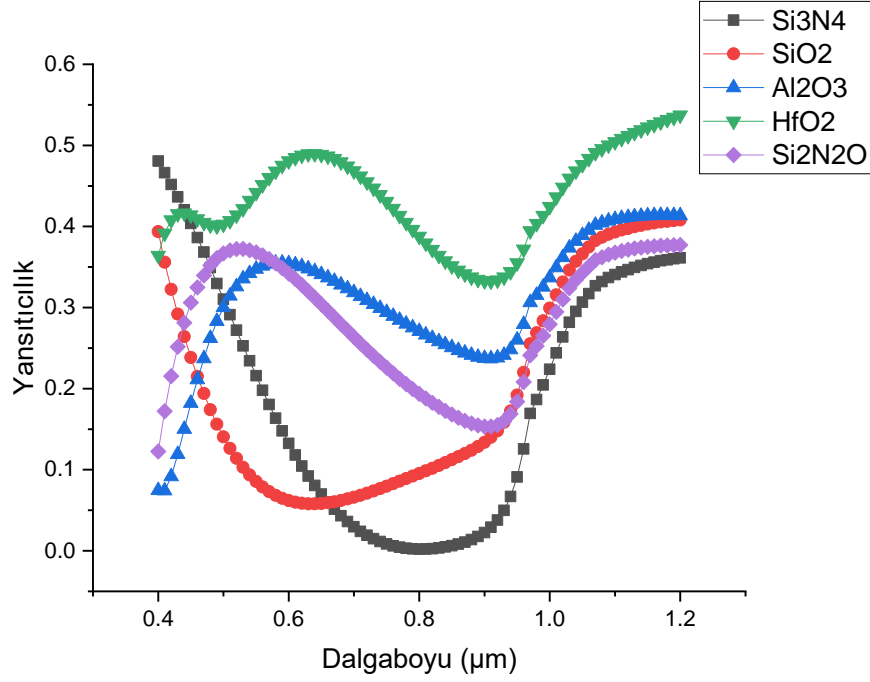
Bu durumda örneğin çalışma dalgaboyu 600 nm olacak olan fotodedektörün yansıma önleyici özellikli dielektrik ince film kalınlığı için optimum değer 70 – 80 nm aralığında olmalıysen, çalışma dalgaboyu 1000 nm olacak olan fotodedektör için bu değer 120 – 130 nm aralığında olmalıdır. Bu değerler aralığında daha yüksek hassasiyetle yapılacak simülasyon çalışmaları sonucunda net değerın spesifik olarak tespit edilmesi mümkündür.

Kalınlığa bağılı yapılan parametrik simülasyon çalışmasıyla yansıtıcılık performansları hesaplanmış ve değişime bağılı davranışlar grafik üzerinde incelenmiştir. Teorik hesaplarla uyumlu sonuçlar elde edilmesiyle birlikte uygulamaya özel kalınlık tespiti yapılması gerektiği görülmüştür.

5.1.3 Dielektrik Materyalinin Etkisi

Kırma indisi ve kalınlık parametrelerinin yansıma performansına etkisinden sonra dielektrik sabitleri, kimyasal bağ yapıları, atomik ve moleküler düzenlenimleri, kristal yapıları farklı olan, dolayısıyla optik özellikleri de farklılaşan dielektrik malzemelerin yansıma performansı üzerindeki etkileri gözlenmek istenmiştir. Dolayısıyla yalnızca dielektrik malzemenin değiştiği parametrik simülasyonlar yapılarak yansıma verileri elde edilmek suretiyle farklılıkların incelenmesi hedeflenmiştir.

Simülasyonda kullanılan model daha önceki çalışmalarda kullanılan modellerle aynı tutulmuş yalnızca dielektrik materyalleri parametrik olarak değiştirilmiştir. Yansıtıcılık hesaplamaları 400 – 1200 nm dalgaboyu aralığında yapılmış ve sonuçlar karşılaştırmak amacıyla aynı grafik üzerinde çizdirilmiştir.



Şekil 5-6 Si₃N₄, SiO₂, Al₂O₃, HfO₂ ve Si₂N₂O dielektrik malzemelerinin 400 – 1200 nm dalgaboyu aralığındaki yansıtıcılık değerleri.

Simülasyonda parametrik modelleme sonucunda materyal dışındaki diğer tüm nicelikler sabit olarak alınmıştır. Daha önceki kalınlık çalışmalarından bilinmektedir ki; her bir dielektrik için kalınlık optimizasyonu yoluyla en düşük yansıtıcılık noktası, hedeflenen dalgaboyuna kaydırılabilmektedir. Dolayısıyla çalışma sonucunda elde edilen grafik, dalgaboyu ekseninden bağımsız olarak yansıtıcılık ekseninde (y) incelenmelidir.

Şekil 5-6'da sonuçları verilen çalışmada SiO₂ (Silisyum dioksit), Si₃N₄ (Silisyum nitrür), Al₂O₃ (Alüminyum oksit), HfO₂ (Hafniyum oksit) ve Si₂N₂O (Oksinitrür) malzemelerine Hava – Silisyum modelinde yansıma önleyici dielektrik ince film olarak yer verilmiş ve yansıma performansları incelenmiştir. İlgili dielektrik malzemelerin her birinin minimum yansıma sağladıkları dalgaboyu değeri farklılık göstermekle birlikte, en düşük yansımaya, dolayısıyla en iyi yansıtma performansına sahip olan dielektrik malzemenin Si₃N₄ olduğu görülmüştür. Bunu SiO₂ malzemesi takip etmektedir.

Bu çalışma sonucunda Si_3N_4 yapının, sahip olduğu optik özellikler neticesinde Silisyum tabanlı fotodedektörler için en başarılı yansıtma performansı veren malzeme olduğu görülmüştür.

5.1.4 Çalışma Özeti

Bir fotodedektörün optik algılama performansını artırma noktasında aygıtta düşen ışığın mümkün olduğunca büyük bir yüzdesini yarıiletken içerisine ve soğurma bölgesine almak gerekmektedir. Bu doğrultuda yansıma ile kaybedilen ışık miktarını düşük tutmak esastır. Bu hedefin elde edilebilmesi için ince film dielektrik proseslerinde yansıtma performansı bir parametre olarak ele alınmalıdır.

Tez kapsamında yansıtma performanslarının mercek altına alınmasıyla yapılan simülasyon çalışmaları neticesinde silisyum tabanlı fotodedektörler için en başarılı dielektrik malzemenin 1.87 kırma indisine sahip olan Si_3N_4 olduğu görülmüştür. Yapılan kalınlık simülasyonlarında, fotodedektörün spesifik çalışma dalgaboyuna bağlı olarak esnekliğe sahip olduğu görülmüştür. Dielektrik kalınlığının aygıt çalışma dalgaboyuna bağlı olarak belirlenmesi gerektiği, yapılan simülasyon çalışmaları neticesinde anlaşılmış ve dalgaboyuna bağlı kalınlık örnekleri üretilmiştir.

Simülasyon çalışmalarının sonuçları, literatür taraması ile ulaşılan teorik bilgiler neticesinde yapılan aritmetik hesaplamalarla uyumlu olmuş ve yarıiletken fiziğindeki yansıtma fenomeninin, kırma indisi, kalınlık ve malzeme ile olan ilişkisi hem teorik hem de simülasyon hesaplamaları ile analiz edilerek karşılaştırılmıştır.

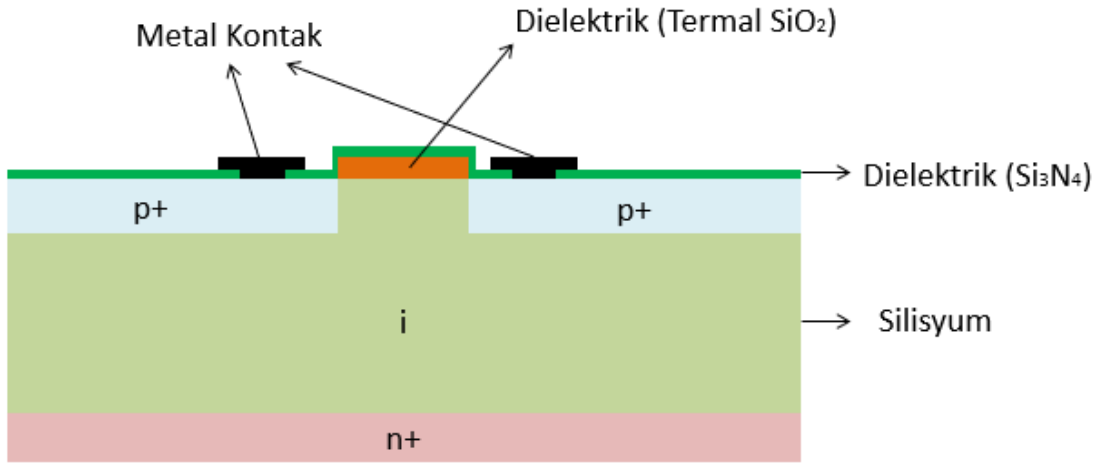
5.2 Dielektrik İnce Filmlerin Pasivasyon Performanslarının İncelenmesi

Dielektrik ince filmlerin silisyum tabanlı fotodedektörlerde yansıtma sonrası bir diğer kullanım amacı da yüzey pasivasyonunu sağlama yoluyla karanlık akımların düşürülmesidir. Dolayısıyla dielektrik ince filmler, yansıtma özelliğiyle fotodedektörün optik performansına katkı sunarken, pasivasyon özelliğiyle elektriksel performansına da katkıda bulunmaktadır.

Dielektrik ince filmin yansıtma özelliğinin kırma indisi, kalınlık ve malzeme olarak optimize edilmesi gibi pasivasyon özelliğinin de en uygun parametrelerle optimize edilmesi yoluyla yüzey kaçaklarının başarılı şekilde düşürülmesi mümkündür.

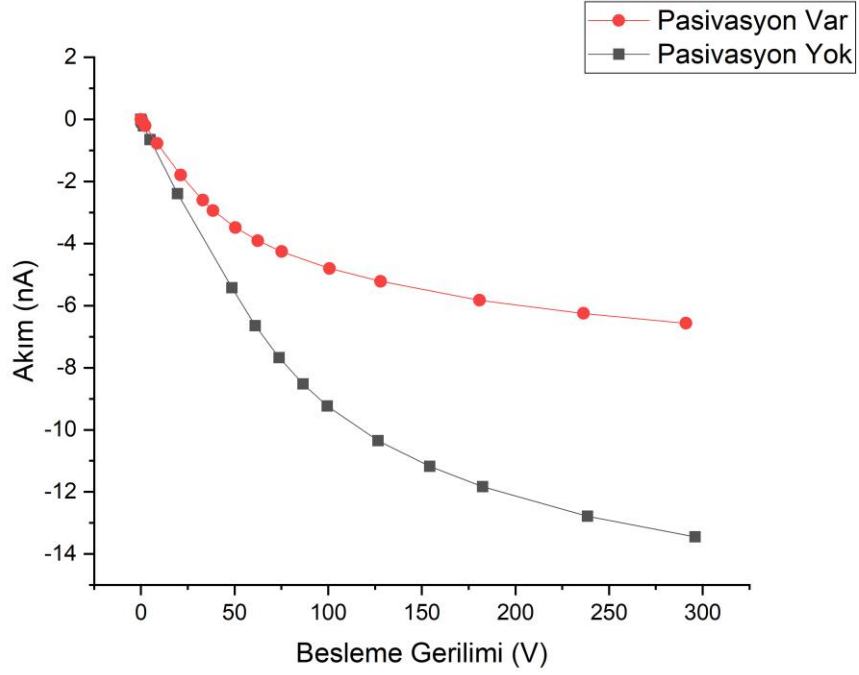
Parametrik simülasyonlar öncesinde bir dielektriğin pasivasyon özelliğini, yansıtma çalışmasında olduğu gibi, henüz optimize edilmemiş model üzerinden görülmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda en iyi pasivasyon özelliğe sahip olacağı öngörülen yüksek ısı işlem ile büyütülmüş termal SiO₂ pasivasyon katmanı içeren silisyum tabanlı fotodedektör için model oluşturulmuş ve toplam karanlık akım hesaplamaları yaptırılmıştır.

Simülasyonu yapılan modelin kesit görünümü Şekil 5-7’de verilmiştir:



Şekil 5-7 Termal SiO₂ pasivasyon ince film katmanı bulunan fotodedektörün kesiti.

Kesit görünümde p+ katkı bölgeleri arasında bulunan termal SiO₂ ince filmi 1100°C sıcaklıkta 4 saatlik proses süresi tanımlanarak bir proses simülasyonu uygulanarak büyütülmüş ve modelin son geometrisinde yer almıştır. Oluşturulan fotodedektör modelinin 180V ters besleme altında karanlık akımları hesaplatılmış ve termal SiO₂ ince film katmanı olan ve olmayan modellerin besleme voltajına bağlı karanlık akım değerleri parametrik olarak elde edilmiştir.



Şekil 5-8 Pasivasyon tabakasına sahip olan ve olmayan fotodedektör modellerinin simülasyon hesaplamaları sonucunda elde edilen IV grafikleri.

Şekil 5-8’de termal oksit pasivasyon parametresi üzerinden yürütülen simülasyon çalışmalarının çıktısı niteliğinde olan pasivasyonlu ve pasivasyonsuz örnekler için IV grafikleri, üst üste çizdirilmek suretiyle verilmiştir. Bu simülasyonlarda uzun hesaplama sürelerinden kaçınmak amacıyla yalnızca termal oksidasyon ince film için proses simülasyonu gerçekleştirilmiş, modelin diğer tüm bileşenleri aygıt simülasyonu niteliğinde oluşturulmuştur. Bu durum; Silisyum tabanlı bir fotodedektörün gerçeğe en yakın karanlık akımını bulma noktasında bir miktar belirsizlik getireceği gibi, tek başına termal oksidasyon filminin karanlık akımda yaratacağı olası iyileşmenin görülmesi noktasında fikir verici nitelikte olacaktır.

Simülasyonun başında oluşturulan modellere termal oksidasyon prosesi uygulanmış daha sonra bu dielektrik ince film bölgesel olarak aşındırılarak difüzyon bölgeleri Şekil 5-7’de görüldüğü şekilde belirlenmiştir. Difüzyon işleminin ardından model ikiye ayrılmış birinde termal oksit filmin aşındırıldığı proses uygulanırken diğerinde bu proses uygulanmamıştır. Diğer tüm aygıt bileşenleri birebir olacak şekilde aynı tutulmuştur.

Şekil 5-8'de verilen eğriler incelendiğinde, literatür taramaları neticesinde gelişen beklentiye uygun olarak, termal oksit pasivasyonu uygulanmış olan aygıt modelinde ters besleme altında daha düşük karanlık akımların elde edildiği görülmüştür. Bu doğrultuda simülasyon sonuçlarının beklentiye destekleyen yönde veri sağladığı ve termal oksit maskenin pasivasyon sağlayarak yüzey kaçak akımlarını düşüreceği tezini doğruladığı görülmüştür.

Şekil 5-8'de verilen grafik detaylıca incelendiğinde termal oksit ince film bulunmayan (pasivasyon olmayan örnek) aygıt için 180V'ta 12 nA kaçak akım değeri elde edildiği okunmaktadır. Aynı grafik üzerinde termal oksit ince film bulunan (pasivasyon olan örnek) aygıt için 180V beslemede kaçak akım değerinin 6 nA olduğu görülmektedir. Bu değerler bir fotodedektör için yukarıda bahsedilen simülasyon kurgusu nedeniyle gerçekten uzak olma ihtimali barındırmakla birlikte, ortaya çıkan veriler kendi içinde değerlendirildiğinde termal oksit filminin karanlık akımda iki kat mertebesinde iyileşme sağladığı görülmüştür.

Bu aşamadan sonra dielektrik ince filmlerin pasivasyon performanslarının optimizasyonuna yönelik simülasyon çalışmaları uygulanmıştır. Bu simülasyon çalışmaları fotodedektör modelleri üzerinden karanlık akım hesaplamaları yoluyla değil Bölüm 2.2.2'de (Dielektrik İnce Filmlerin Pasivasyon Amacıyla Kullanılması) ele alındığı şekilde CV ölçüm tekniğiyle yapılmıştır. Buradaki temel amaç karanlık akım parametresinin yalnızca dielektrik kalitesini ortaya çıkaran değil bütün bir fotodedektör yapısını ilgilendiren nihai bir parametre olması ve bilgisayar sistemleri için birkaç günü bulabilen uzun simülasyon zamanlarını gerektirmesidir. Bu doğrultuda CV tekniğiyle dielektrik filmlerin farklı özellikler altında kapasitans – voltaj hesaplamaları yapılarak simülasyon çalışmaları ilerletilmiş ve pasivasyon performanslarının optimizasyonu hedeflenmiştir.

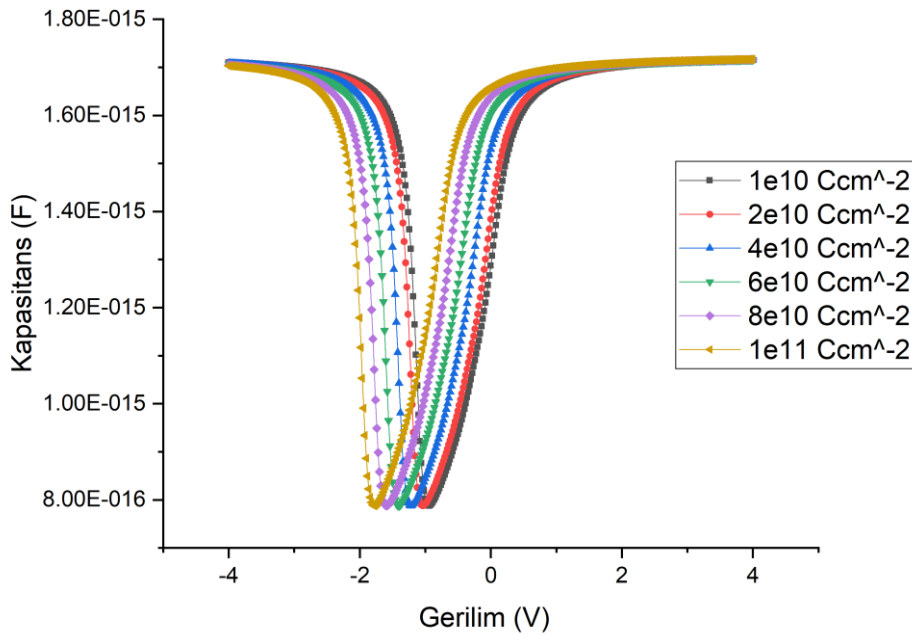
Silisyum tabanlı fotodedektörler, sabit bir besleme voltajı altında sabit bir kapasitif etki gösterirler. Esasında bu kapasitans değeri dedektörün performans parametrelerinden biri olarak değerlendirilerek ölçülür ve dedektörün özelliklerinden biri olarak ele alınır. Burada ele alınan ve simülasyonları yapılan kapasitans ise dedektörün elektriksel kontakları üzerinden ölçülen kapasitans değil, dielektrik ince filmin pasivasyon performansının karakterizasyonu için dielektrik film üzerinden ölçülen bir niceliktir. Bu ölçümün amacı doğrudan dedektörü karakterize etmek

değil, silisyum yüzeyi üzerine büyütülmüş olan dielektrik ince filmi karakterize etmektedir.

5.2.1 Arayüzey Yük Yoğunluğunun Etkisi

Bölüm 2.2.2 “Dielektrik İnce Filmlerin Pasivasyon Amacıyla Kullanılması” kısmında CV ölçüm tekniğinin dielektrik pasivasyon kalitesinin belirlenmesi noktasındaki kullanımıyla ilgili literatür araştırmaları sonucunda elde edilen bilgilere yer verilmiş ve tipik bir CV grafiğinin incelenmesi üzerinden gidilerek bir MOS yapısının farklı voltaj beslemesi altındaki davranışı incelenmiştir. Dielektrik – yarıiletken arayüzeyindeki yük yoğunluğunun CV grafiğini etkilediği ve bu etkiden hareketle CV ölçümü ile arayüzey yük yoğunluğunun tespit edilebildiğinden bahsedilmiştir.

Simülasyon çalışmalarının ilk evresinde arayüzey yük yoğunluğunun CV grafiğini ne yönde etkilediği anlaşılmaya çalışılmıştır. Bu maksatla; dielektrik – yarıiletken arayüzeyine, büyüklük değeri bilinen yük yoğunlukları tanımlanarak kapasitans simülasyonları yapılmış ve CV grafikleri oluşturulmuştur. Arayüzey yük yoğunluğunun incelendiği ve hedef parametre olarak belirlendiği bu simülasyonlarda, birbirinden farklı yük yoğunlukları için oluşturulan tüm CV eğrileri aynı grafikte çizdirilerek karşılaştırılmıştır.



Şekil 5-9 Farklı arayüzey yük yoğunlukları için yapılan simülasyonlar sonucunda çizilen CV grafikleri.

Şekil 5-9'da sonuçları verilen çalışmada sırasıyla 1×10^{10} , 2×10^{10} , 4×10^{10} , 6×10^{10} , 8×10^{10} ve 1×10^{10} ($C_{cm^{-2}}$) arayüzey yük değerleri kullanılmıştır. Bu değer skalası içerisinde CV grafiğinde meydana gelen değişimlere, Bölüm 2.2.2'de verilen literatür özeti dahilindeki terimler ve kıstaslar üzerinden bakıldığında ilk dikkat çeken noktanın V_T voltajındaki değişim olduğu görülür. C_{maks} ve C_{min} gibi kapasitans değerlerinin arayüzey yük yoğunluğundan etkilenmediği görülmektedir.

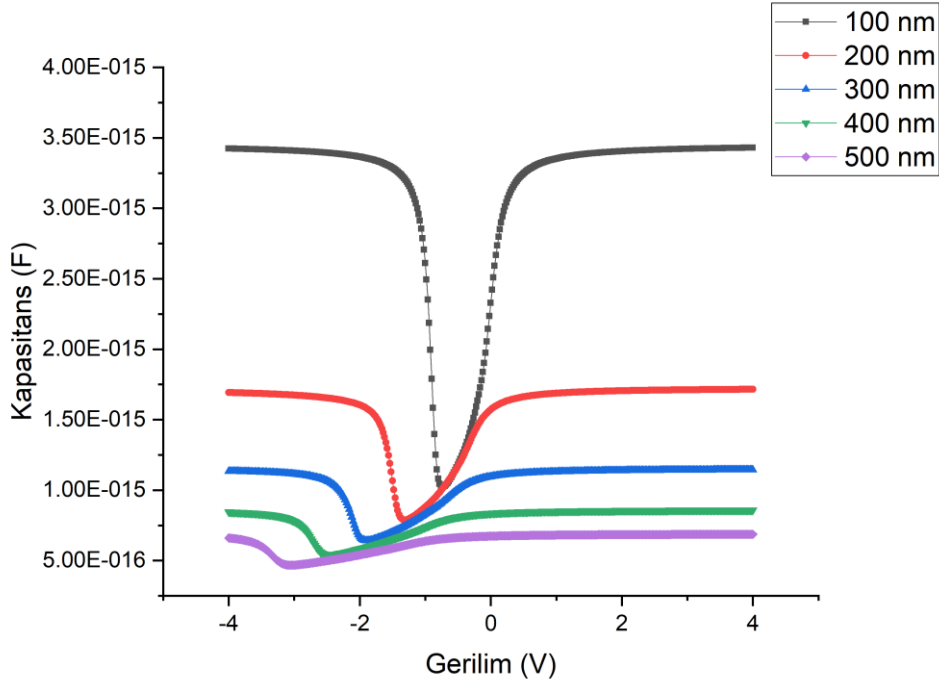
Dielektrik kapasitansının en düşük değerine ulaştığı ve yarıiletken yüzeyinde oluşan (+) yüklü iyonize donörlerle, n tipi alttaştaki serbest (-) yüklerin dengeye ulaştıkları nokta olan V_T noktasının arayüzey yük yoğunluğunun artmasıyla birlikte sola kaydığı görülmektedir. Bu durum, literatür özetinde verildiği şekliyle bir MOS yapısındaki kapasitans ölçüm mantığı çerçevesinde bakıldığında beklenen ve tahmin edilebilir bir durumdur. Arayüzey yük yoğunluğu arttıkça serbest (-) yük yoğunluğu artmakta ve dengenin sağlanması için daha fazla (+) yüklü iyonize donör atomuna ihtiyaç oluşmaktadır. (+) yüklü iyonize donör yoğunluğunun artışı ise daha büyük ters voltaj beslemesi altında oluşmaktadır. Bu fiziksel gereklilik nedeniyle arayüzey yük yoğunluğu arttıkça CV grafiği, kapasitans değerleri değişmeyecek şekilde sola kaymakta V_T voltaj değeri grafiğin (-) bölgesinde artmakta, V_{FB} voltajı ise + bölgede azalmaktadır.

Bu çalışma ile birlikte arayüzey yük yoğunluğu ile CV grafiğinde meydana gelen değişim anlaşılmış, bunun yarıiletken fiziği çerçevesindeki teknik yorumu yapılmış ve deneysel süreçler için birbirinden farklı dielektrik ince filmler üzerinde yapılacak olan CV ölçümlerinin karşılaştırılması yoluyla filmlerin pasivasyon kalitelerinin karşılaştırılmasının önü açılmıştır.

5.2.2 Dielektrik Kalınlığının Etkisi

Arayüzey yük yoğunluğunun CV grafiği üzerindeki etkisi incelendikten sonra Dielektrik kalınlığının etkisi üzerine yoğunlaşmış ve simülasyon çalışmaları ilettilmiştir. Farklı dielektriklerin CV grafiklerinin karşılaştırılması noktasında deneysel süreçlerde karşımıza çıkabilecek en olası farklılardan bir tanesi dielektrik kalınlığıdır. Farklı kalınlıklardaki dielektriklerin CV grafikleri yorumlanırken kalınlığın getireceği etkilerin bilinmesi, arayüzey yük yoğunluğu ve dolayısıyla pasivasyon kalitesi için yapılabilecek çıkarımların hatadan arındırılması noktasında önemlidir.

Bu kapsamda parametrik kalınlık simülasyonları yapılmış ve karşılaştırmalı eğrilerden oluşan grafik çizilmiştir ve Şekil 5-10'da verilmiştir.



Şekil 5-10 Farklı kalınlıklardaki dielektrikler için yapılan simülasyonlar sonucunda oluşturulan CV grafikleri.

Bölüm 2.2.2'de verilen literatür özeti ve yapılan teorik yorumlar çerçevesinde kapasitif etkinin dielektrik ince film aracılığıyla oluştuğu ve üst yüzeydeki metal ile yarıiletken arasında oluşan yük dağılımı neticesinde kapasitans ölçülebildiğinden bahsedilmiştir. Bu nedenle dielektrik kalınlığında meydana gelecek değişimin, indüklenen yükler arasındaki uzaklığın değişmesi sebebiyle kapasitans değerinde değişime yol açacağı öngörülebilir. Şekil 5-10'da sonuçları verilen çalışmada görüldüğü şekilde dielektrik kalınlığı ile C_{maks} ve C_{min} gibi kapasitans değerleri ters orantılıdır. Kalınlıkta meydana gelen azalma kapasitans değerlerinde yükselmeye neden olmaktadır.

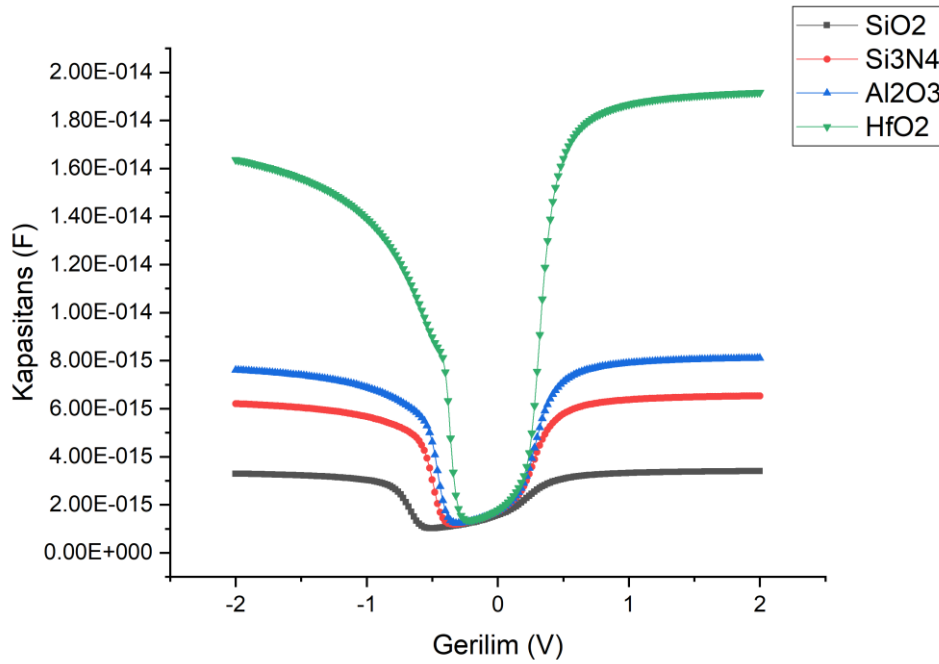
Şekil 5-10'daki çalışmada kalınlığın değişmesiyle beraber V_T ve V_{FB} voltaj değerlerinin de farklılaştığı görülmektedir. Dielektrik kalınlığının azalması indüktif etkileşimi artırmakta ve bunun bir sonucu olarak serbest (-) yükler ile (+) donör

atomlarının denge noktası daha düşük negatif voltaj değerlerinde sağlanabilmektedir.

5.2.3 Dielektrik Materyalinin Etkisi

Arayüzey yük yoğunluğu ve dielektrik kalınlığının CV ölçümlerine etkisinin incelenmesinden sonra dielektrik sabitleri, kimyasal bağ yapıları, atomik ve moleküler düzenlenimleri ve kristal yapıları farklı olan dolayısıyla yarıiletken alttaş ile oluşturdukları arayüzey koşullarının ve elektriksel özelliklerinin farklılaştığı dielektrik malzemelerinin CV grafikleri gözlenmek istenmiştir.

Simülasyonda kullanılan model önceki çalışmalarda kullanılan modellerle aynı tutulmuş sadece dielektrik materyalleri değiştirilmiştir. Voltaj hesaplamaları -2/+2 V aralığında yapılmış ve eğriler aynı grafik üzerinde çizdirilmiştir.



Şekil 5-11 SiO₂, Si₃N₄, Al₂O₃ ve HfO₂ dielektrik malzemelerinin -2 / +2 V değer aralığındaki kapasitans – voltaj grafikleri.

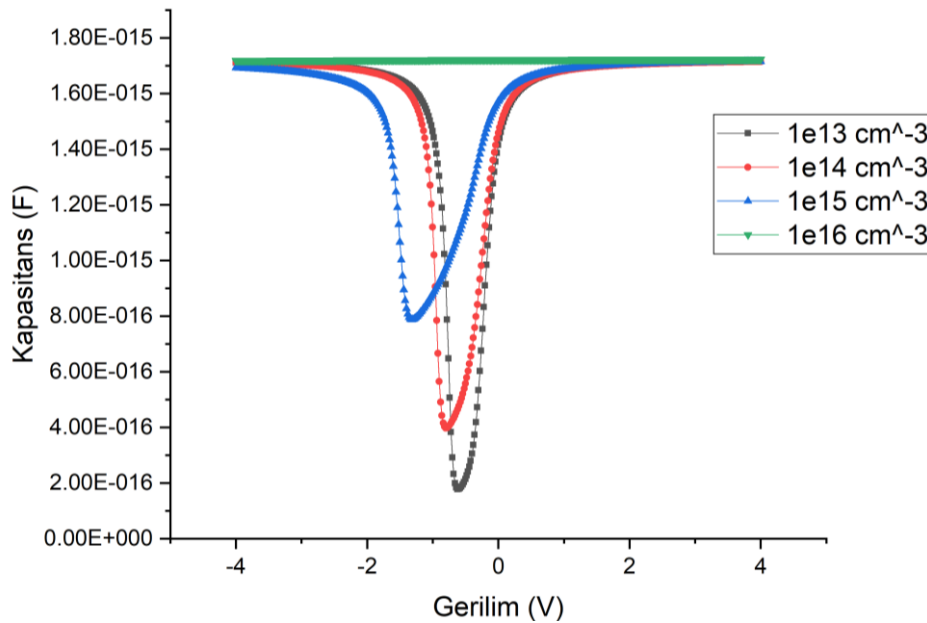
Simülasyonda tüm dielektrikler için kalınlık değeri 100 nm olarak sabit alınmıştır. Şekil 5-11’de sonuçları verilen çalışmada SiO₂ (Silisyum dioksit), Si₃N₄ (Silisyum

nitrür), Al_2O_3 (Alüminyum oksit) ve HfO_2 (Hafniyum oksit) malzemelerine, silisyum simülasyon modelinde dielektrik pasivasyon tabakası olarak yer verilmiş ve CV grafikleri çizilmiştir. Bu simülasyon çalışması sonucunda sabit bir arayüzey yük yoğunluğu belirlense dahi dielektrik kimyasının getirdiği kapasitans farklılıkları olduğu görülmüştür.

5.2.4 Yapılan Diğer Parametrik Simülasyonlar ve Çalışma Özeti

Dielektrik ince filmlerin pasivasyon performanslarının anlaşılması noktasında literatürde önemli bir ölçüm yöntemi olarak yer edinen CV tekniğinin daha iyi anlaşılması, dielektrik özelliklerinin haricinde ölçüm için hazırlanan örneğin taşıdığı diğer özelliklerin ölçüm sonuçlarına olası etkilerinin bilinmesi ve hatalı olabilecek yorumların yapılmasının önlenmesi amacıyla simülasyon çalışmaları daha farklı parametreler üzerinden ilerletilmiştir. Yapılan ekstra simülasyon çalışmaları bu başlık altında incelenmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır.

Mercek altına alınan ilk parametre alttaş arkaplan konsantrasyonu olmuştur. CV grafiğinde V_T voltajının (+) yüklü donör atomları ile alttaş içerisinde serbest elektron yoğunluğunun dengeye geldiği nokta olduğu Bölüm 2.2.2'de incelenmişti. Arka plan konsantrasyonunun serbest elektron yoğunluğunu belirlediği bilinmektedir. Bu doğrultuda arka plan konsantrasyonu farklılaştırılmış olan n tipi Silisyum alttaşlar üzerinde parametrik simülasyonlar yapılarak CV grafikleri oluşturulmuştur.



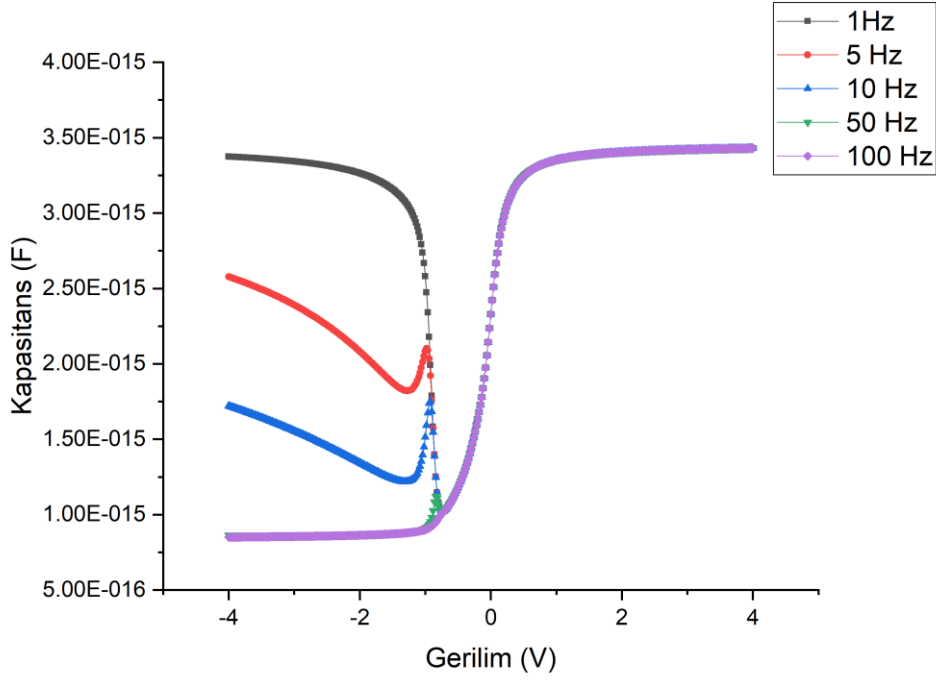
Şekil 5-12 Farklı n tipi arka plan konsantrasyon değerleri için yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen CV grafikleri.

Şekil 5-12 incelendiğinde alttaş arka plan konsantrasyonunun Dielektrik karakterizasyonu amacıyla yapılan CV grafiğini baskın şekilde etkilediği görülmektedir. Öyle ki; arka plan konsantrasyonu belli bir limitin üzerinde olan bir alttaş ile yapılacak çalışmada tükenme (depletion) bölgesinin kaybedildiğini ve arayüzey yük yoğunluğunu tespit etmek üzere tahlil edilen V_T voltaj değerinin oluşmadığını görmekteyiz. Bu simülasyon neticesinde, deneysel süreçleri geliştirme öncesinde doğru tip alttaşın seçilmesi noktasında bir farkındalık kazanılmıştır.

Arka plan konsantrasyonunun yüksek olması yarıiletkendeki serbest elektron yoğunluğunun yüksek olması anlamına gelmektedir. Bu durum belli bir limitin üzerine çıktığında ise (+) yüklü donör atomları hiçbir zaman serbest elektronlarla dengeye ulaşacak seviyeye çıkmamakta ve kapasitansta düşme görülememektedir. Konsantrasyon azaldıkça CV grafiğindeki tipik tükenme bölgesi davranışı gözlenmektedir.

Alttaş gibi deneysel sürecin inşasında kullanılan fiziksel parametrelerin haricinde kapasitans ölçümleri sırasında ölçüm düzeneğinde kullanılan parametrelerden bir tanesi frekans olmaktadır. Şu ana kadar yapılan simülasyon çalışmalarında tüm hesaplamalar sürekli doğrusal akım koşulu altında gerçekleştirilmiştir. Ancak CV grafiğinin farklı frekanslara olan tepkiselliği de literatürde sıklıkla inceleme altına alınan bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu doğrultuda oluşturulan simülasyon modeli tamamıyla sabit tutularak farklı frekans değerleri altında CV grafiklerinin hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve oluşturulan eğriler aynı grafik üzerinde çizdirilmiştir.



Şekil 5-13 Farklı frekans değerleri için yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen CV grafikleri.

Şekil 5-13'te frekans parametresinin CV grafiğindeki değerlerin değişmesine yol açmadığı yalnızca terslenme (inversion) bölgesini etkileyerek bu bölgedeki elektriksel davranışı ortadan kaldırdığı görülmektedir. Besleme frekansının yükselmesiyle birlikte bu bölgenin kaybolmasının temel sebebi arayüzeyde (+) yüklerin oluşabilmesi ve dengenin kurulabilmesi şartının bu seviyedeki yüksek frekanslar için gerçekleşmemesidir. Frekans yükseldikçe, terslenim bölgesinin görülebilmesi için gerekli arayüzey yüklerinin frekansı takip edemediği anlaşılmaktadır. Bu sebepten belli bir limitin üzerindeki frekanslarda yapılan deneysel ölçümlerde terslenme bölgesinin görülemeyeceği anlaşılmıştır.

Dielektrik ince filmlerin pasivasyon karakterizasyonları için yapılan CV ölçüm tekniğinin yeterli düzeyde anlaşılması, parametrik simülasyonlar neticesinde ölçüm dinamiklerini etkileyen faktörlerin ortaya çıkarılması ve deneysel süreçlere zemin hazırlanması amacıyla yürütülen bir dizi simülasyon çalışması aracılığıyla hedeflenen noktaya gelinmiştir. Tez çalışması kapsamında ortaya çıkarılan ve literatürü destekleyici nitelikte olan parametrik ilişkiler neticesinde deneysel

alışmalar için destekleyici bilgiler edinilmiştir. Birbirinden farklı dielektriklerin pasivasyon kalitelerinin karşılaştırılması veya optimizasyon faaliyetleri sonucunda iyileştirilen bir dielektriğin CV grafiklerinin yorumlanması için gerekli olan teorik bilgi altyapısı oluşturulmuştur.

6. Deneysel Çalışmalar

Tez kapsamında yürütülen deneysel çalışmalar, dielektrik filmlerin 4" Silisyum alttaşlar üzerinde farklı teknikler kullanılarak büyütülmesi/kaplanması ve sonrasında karakterizasyon ölçümlerinin yapılması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sırasında kullanılan Silisyum alttaşların teknik özellikleri Çizelge 6-1'de listelenmiştir:

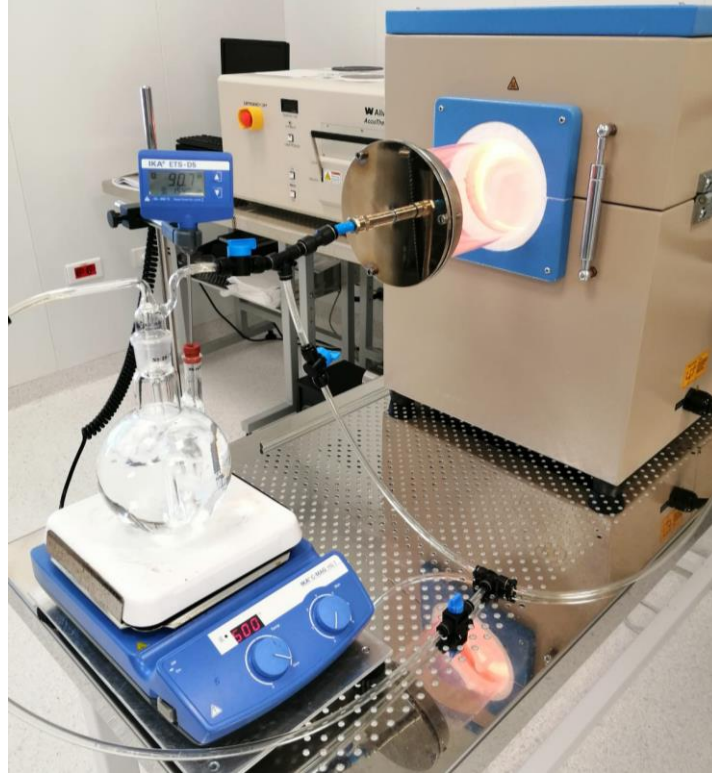
Nitelik	Değer
Çap:	4"
Katkılama:	Katkısız (Intrinsic)
Kristal Yönelimi:	$\langle 111 \rangle \pm 0.5^\circ$
Direnç:	$>20,000$ ohm-cm
Kalınlık:	$500 \pm 25 \mu\text{m}$
Parlatma:	Çift taraflı
Toplam Kalınlık Değişimi (TTV):	$<10 \mu\text{m}$
Eğrilik (Bow/Warp):	$<30 \mu\text{m}$

Çizelge 6-1 Deneysel çalışmalarda kullanılan Silisyum alttaşların teknik özellikleri.

Bu alttaşlar üzerinde uygulanan farklı dielektrik büyütme çalışmaları sonucunda örnek setleri oluşturulmuş ve karakterize edilmiştir. Örnek setlerinin oluşturulması süreci, uygulanan prosese bağlı olarak ayrı ayrı olarak ele alınmış ve örneklerin gruplandırılması ve grup isimlendirmeleri yine proseslere bağlı olarak düzenlenmiştir.

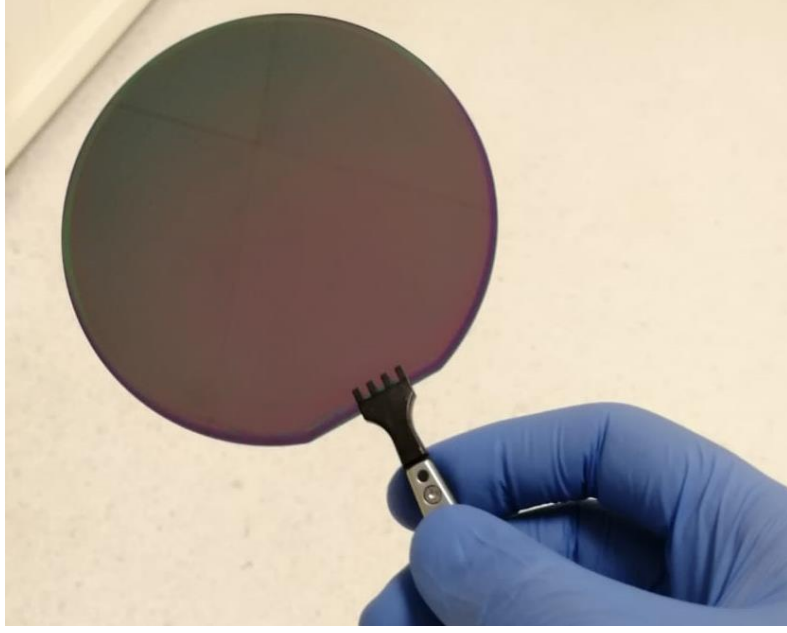
6.1 Islak Termal Oksit Kaplama Prosesleri (Grup A Örnekleri)

Islak termal oksit kaplama prosesi Bölüm 3.2.2 "Islak Termal Oksit Büyütme" başlığı altında incelenen teknik arka plan çerçevesinde gerçekleştirilmiş ve örnekler hazırlanmıştır.



Şekil 6-1 Islak termal oksit kaplama prosesinin deney düzeneğinden bir görüntü.

Oksidasyon fırını 1100°C 'ye ($\pm 10^{\circ}\text{C}$) ısıtılırken fırın içerisine 2 l/dk akış hızıyla azot gazı verilmiştir. Fırının 1100°C sıcaklığa gelmesinin ardından 5.5 l/dk akış hızıyla 8 dk süreyle kuru oksijen verilerek alttaşlar üzerinde ilk oksit tabakasının kuru oksidasyon ile oluşması sağlanmıştır. Daha sonrasında sıcak yüzey (hotplate) üzerinde ısıtılan DI su içerisinden 2 l/dk akış hızıyla azot gazı geçirilerek su buharıyla oksidasyon işlemine 4 saat 30 dakika süreyle devam edilmiştir. Bu sürenin sonunda fırın halen 1100°C sıcaklıktayken 5 dk süreyle 2 l/dk akış hızıyla azot ve bu işlemin ardından 5.5 l/dk akış hızıyla 8 dk süreyle oksijen gazı verilmiştir. Bu işlemin amacı fırın tüpü içerisindeki su buharını tamamıyla uzaklaştırmak ve büyütmeyi kuru oksidasyon metoduyla sonlandırmaktır. Son olarak oksijen akışı kesilerek $5^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ hızla azot gazı akışı altında fırın soğumaya bırakılmış ve proses sonlandırılmıştır.



Şekil 6-2 Islak termal oksidasyon prosesinden çıkan 4" Silisyum alttaşın görüntüsü.

Elipsometre sisteminde yapılan ölçümde kırma indisi 1.56 ve kalınlık 1250 nm olarak ölçülmüştür.

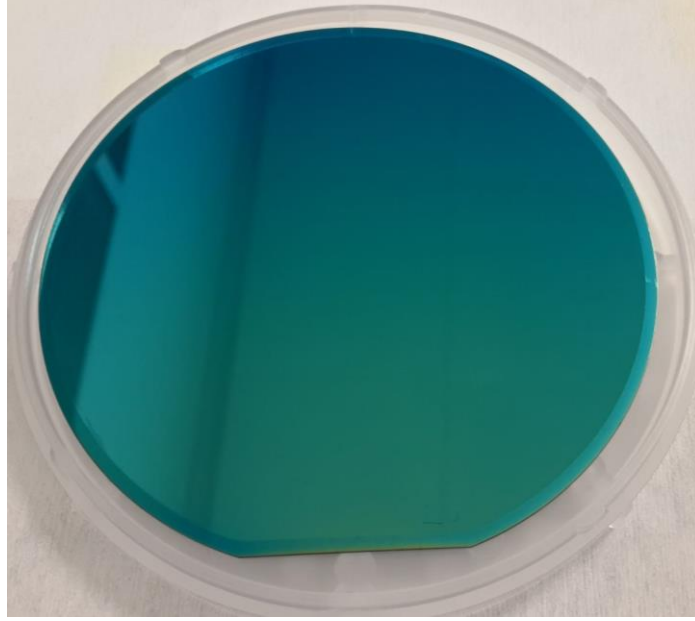
6.2 PECVD Kaplama Prosesleri (Grup B Örnekleri)

Islak termal oksit kaplama prosesi Bölüm 3.2.1 "Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme (PECVD)" başlığı altında incelenen teknik arka plan çerçevesinde gerçekleştirilmiş ve örnekler Samco PECVD PD220-NL sistemi kullanılarak hazırlanmıştır.

Kaplama prosesleri aynı alttaşlar üzerinde SiO_2 ve Si_3N_4 dielektrik olmak üzere iki ayrı çalışma ile gerçekleştirilmiştir.

6.2.1 SiO_2 Kaplama Prosesleri (Grup B-1 Örnekleri)

SiO_2 kaplama prosesi; 300 sccm N_2O , 270 sccm Silan (SiH_4) gaz akışlarıyla, 80 Pa proses basıncında, 50 W RF gücünde ve 250°C proses sıcaklığında 10 dakika süren plazma süresiyle uygulanmıştır.



Şekil 6-3 PECVD SiO₂ kaplama prosesi sonrasında silisyum alttaşın görüntüsü.

Elipsometre sisteminde yapılan ölçümde SiO₂'nin kırma indisi 1,49 ve kalınlığı 400 nm olarak ölçülmüştür.

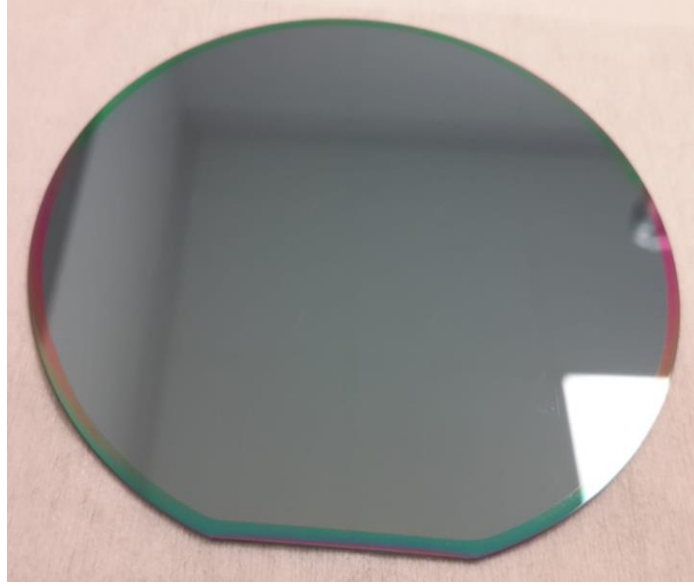
6.2.2 Si₃N₄ Kaplama Prosesleri (Grup B-2 Örnekleri)

Birinci seri Si₃N₄ kaplama prosesi; 500 sccm Azot (N₂), 160 sccm Silan (SiH₄) ve 12 sccm Amonyak (NH₃) gazları akış hızlarında 75 Pa proses basıncında, 130 W RF gücünde ve 275°C proses sıcaklığında 4 dakika süren plazma süresiyle uygulanmıştır.

Elipsometre sisteminde yapılan ölçümde kırma indisi 1,87 ve kalınlık 135 nm olarak ölçülmüştür.

İkinci seri Si₃N₄ kaplama prosesinde yüksek kırma indisli dielektrik uygulanması hedeflenmiştir. Bu çerçevede 250 sccm N₂, 160 sccm Silan (SiH₄) ve 4 sccm NH₃ gazları akışı altında, 75 Pa proses basıncında, 130 W RF gücünde ve 275°C proses sıcaklığında 4 dakika süren plazma süresiyle uygulanmıştır.

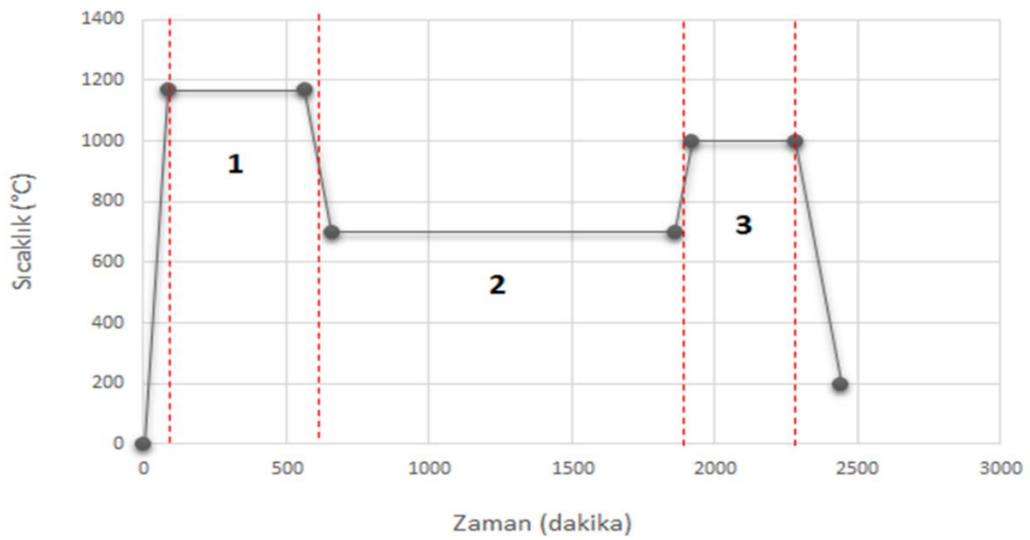
Elipsometre sisteminde yapılan ölçümde Si₃N₄'ün kırma indisi 2,36 ve kalınlığı 135 nm olarak ölçülmüştür.



Şekil 6-4 PECVD Si₃N₄ kaplama prosesi sonrasında silisyum altaşın görüntüsü. (n=1,87 / 135 nm)

6.3 Arındırma Kuru Termal Oksit Kaplama Prosesleri (Grup C Örnekleri)

Arındırma (İng. gettering) kuru termal oksit kaplama prosesi, ıslak termal oksit kaplama prosesinin uygulandığı fırında, herhangi bir ıslak işlem olmadan doğrudan doğruya kuru oksijen gazı kullanılarak uygulanmıştır. Şekil 6-5'te 3 aşamadan oluşan prosesin sıcaklık dağılım grafiği verilmiştir.



Şekil 6-5 Arındırma kuru termal oksit kaplama prosesinde zamana bağlı uygulanan sıcaklık profili grafiği.

Bu proseste üç aşamalı yüksek sıcaklık prosesi uygulanmıştır. Şekil 6-5'te görülen aşamalar detaylandırılırsa;

1. **Aşama:** Bu aşamada tüp içerisine 2 l/dk akış hızıyla oksijen verilmiştir. 1170°C'de gerçekleştirilen birinci aşamada, yeniden düzenlenimle kristal kusur yoğunluğu artırılmakta ve kristal içerisine doymuş oksijen difüz ettirilmektedir.
2. **Aşama:** Bu aşamada tüp içerisine 2 l/dk akış hızıyla azot verilmiştir. Birinci aşama sonundaki soğuma evresinde ve 700°C'deki ikinci aşamada doymuş oksijenin çökmesi sağlanarak etrafında giderek büyüyen bir kusur kümesi oluşturulmaktadır.
3. **Aşama:** Bu aşamada tüp içerisine 2 l/dk akış hızıyla azot verilmiştir. 1000°C'deki üçüncü aşamada safsızlıkların kristal içerisindeki hareket kabiliyetleri yüksek sıcaklık etkisiyle yeniden artırılmakta ve bu safsızlıkların ikinci aşama sırasında oluşturulmuş olan kusur kümeleri içerisine bağlanmaları sağlanmaktadır.

Toplam 40 saat süren kontrollü proses sonucunda arındırma kuru termal oksit kaplama prosesi tamamlanmış ve alttaş fırın içerisinden alınmıştır. Elipsometre sisteminde yapılan ölçümde kırma indisi 1.56 ve kalınlık 500 nm olarak ölçülmüştür.

6.4 Hızlı Isıl İşlem (Tavlama) ile Yüzey İyileştirme Prosesleri

Dielektrik – yarıiletken arayüzeyindeki kopuk bağların doyurulması, kovalent bağların yeniden düzenlenerek kristal kusurlarının giderilmesi ve elektriksel iyileşmenin sağlanması amacıyla hızlı ısıl işlem uygulaması literatürde karşılaşılan bir proses olarak karşımıza çıkmaktadır [58]. Bu doğrultuda her gruptan örneklerin birer parçası tavlama prosesine tabi tutularak karakterize edilmiştir.

Tavlama prosesleri Allwin AW-810 sisteminde 450°C sıcaklıkta 30 dakika süre ile kök gazı (forming) (%95 Azot : %5 Hidrojen) atmosferinde gerçekleştirilmiştir.



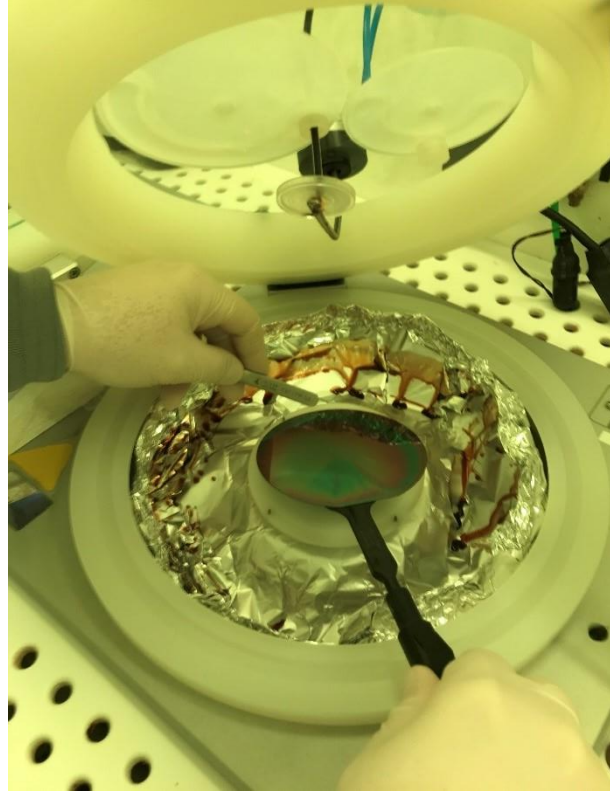
Şekil 6-6 Hızlı ısıtma işlemlerinin gerçekleştirildiği Allwin AW-810 sistemi.

6.5 Kapasitans – Voltaj Ölçümleri İçin Elektriksel Kontak Oluşturma Prosesleri

Literatür özetine ve teknik arka planına Bölüm 4.2’de yer verilen CV ölçümlerinin gerçekleştirilebilmesi için dielektrik üzerine desenlendirilmiş metal kontak kaplaması yapılması gerekmektedir. Bu proses için öncelikle fotolitografi ile yüzey desenlenmeli ardından bu yüzeyin metal kaplama prosesine tabi tutulması gerekmektedir. Kaplama prosesi sonrasında kaldırma yapılarak fotorezist tabakanın yüzeyden uzaklaştırılması yolu ile desenlendirilmiş kontak kaplama prosesi tamamlanmış olur.

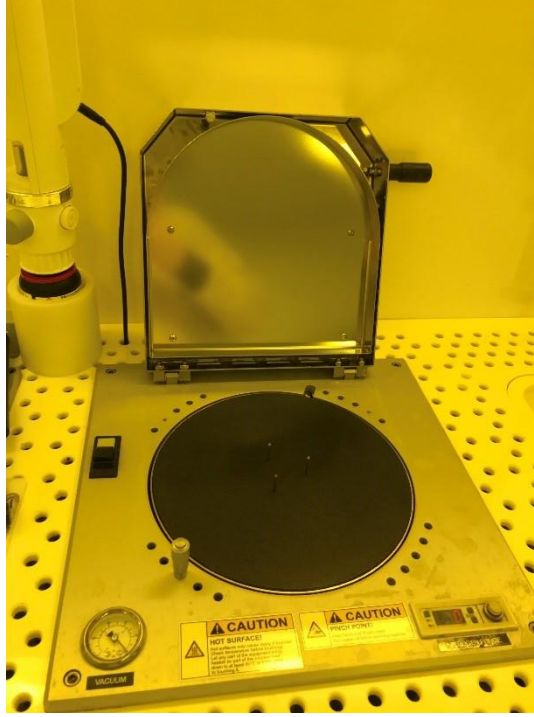
6.5.1 Fotolitografi ile Desenleme Prosesleri

Metal kaplama prosesleri için örnek yüzeylerinin desenlenmesi amacıyla Microchemicals firmasının TI35ESX resisti kullanılarak ters fotolitografi işlemi uygulanmıştır. Alttaşırlara öncelikle ışığa duyarlı polimer bir malzeme olan fotorezist serilmiştir.



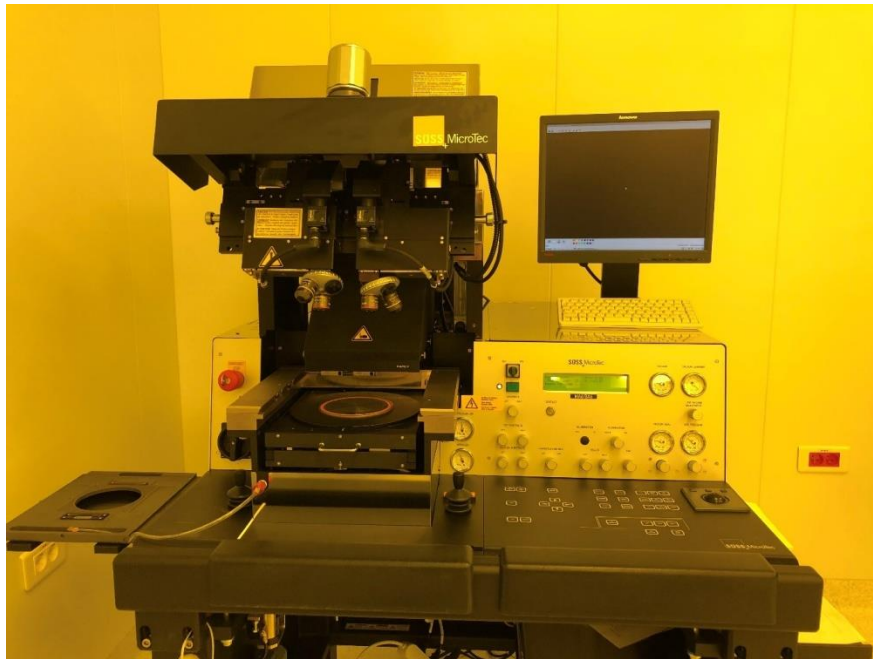
Şekil 6-7 Döndürücü sisteminde örneğin üst yüzeyinin fotorezist malzeme ile kaplanması.

Şekil 6-7’de yer verilen döndürücü sisteminin tutucu platformuna alttaş yerleştirilmiş ve şırınga yardımıyla yaklaşık 4 ml fotorezist damlatılarak 4000 rpm açısal hızında platformun döndürülmesiyle fotorezist kaplama işlemi 40 s sürede gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemi tamamlandıktan sonra örnek birinci kurutma işlemi için sıcak tabla üzerine alınmıştır.

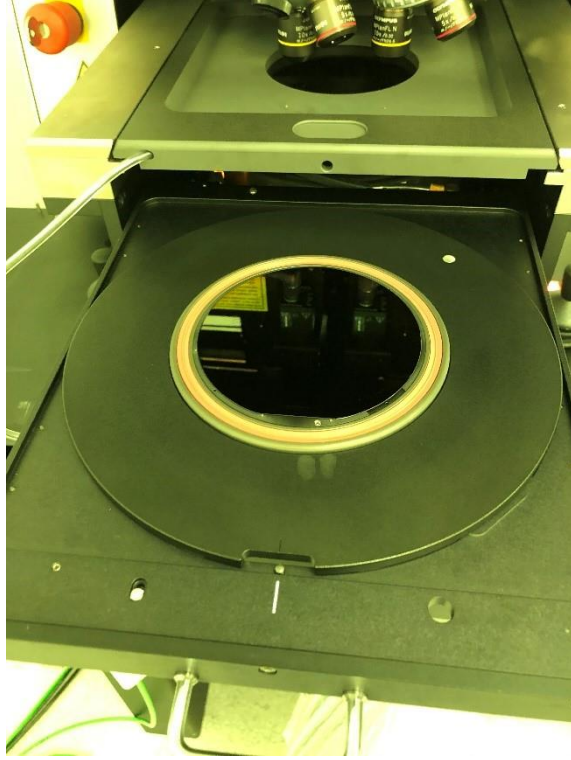


Şekil 6-8 Fotorezist kurutma işlemlerinin yapıldığı sıcak tabla.

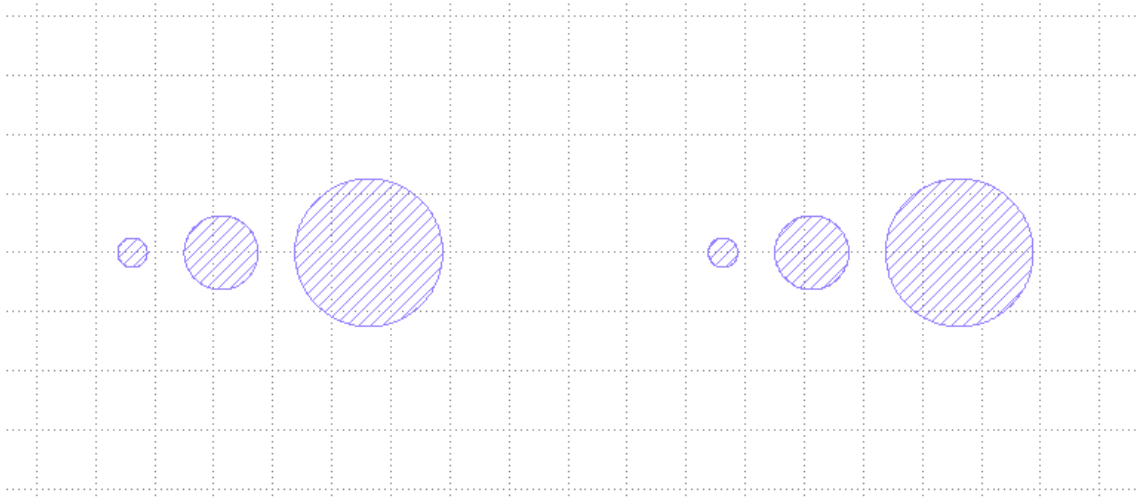
Fotorezist kaplama sonrasında Şekil 6-8'de görülen sistemde örnekler 100°C'de 3 dakika süreyle kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem sonrasında örnekler UV ışık ile pozlamaya hazır hale gelmiştir.



Şekil 6-9 Hizalama ve UV ışık ile pozlama işlemlerinin yapıldığı MA6 sistemi.



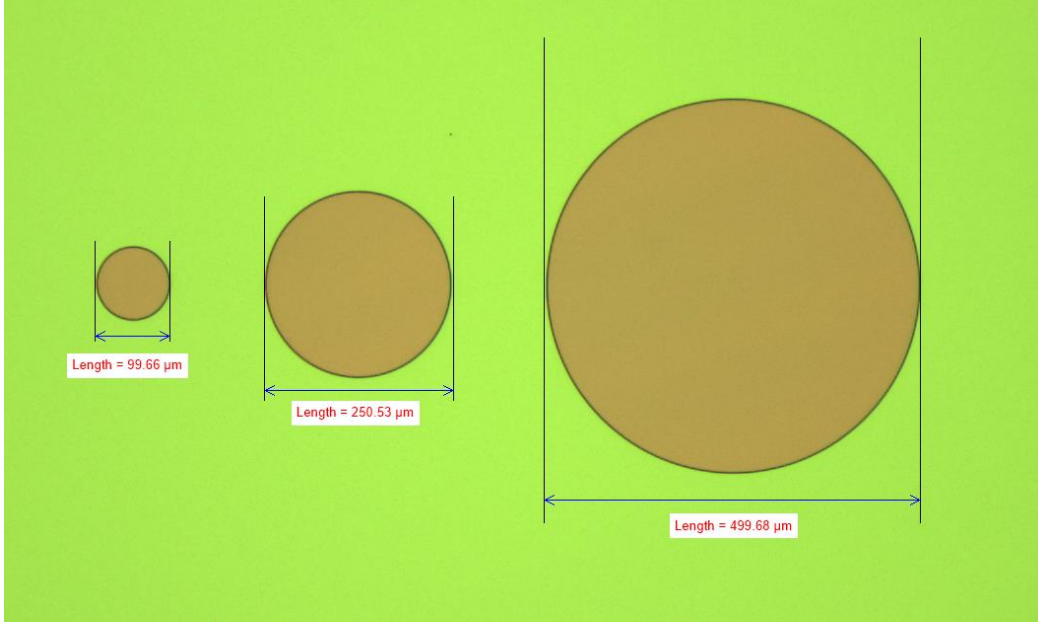
Şekil 6-10 MA6 sistemine yüklenen örneğin görüntüsü.



Şekil 6-11 MA6 sisteminde kullanılan fotolitografi maskesindeki CV kontak desenleri. (Çap büyüklükleri soldan sağa: 100, 250 ve 500 μm 'dir.)

Örnekler MA6 sistemine yüklenerek hizalama işlemi yapılmış ve ardından 16 mW optik güçte 10 saniye süreyle pozlanmıştır. Ters litografi proses mantığının bir gerekliliği olarak pozlama sonrasında 135°C sıcaklıkta 2 dakika süreyle kurutma

işlemi uygulanmış ve ardından özel çözücü kimyasal içerisinde 5 dakika süreyle uygulanan banyolama işleminin ardından fotolitografi işlemi tamamlanmıştır.



Şekil 6-12 Fotolitografi sonrasında CV ölçümü için atılan kontak açıklıklarının optik mikroskop görüntüsü.

6.5.2 Metal Kaplama Prosesleri

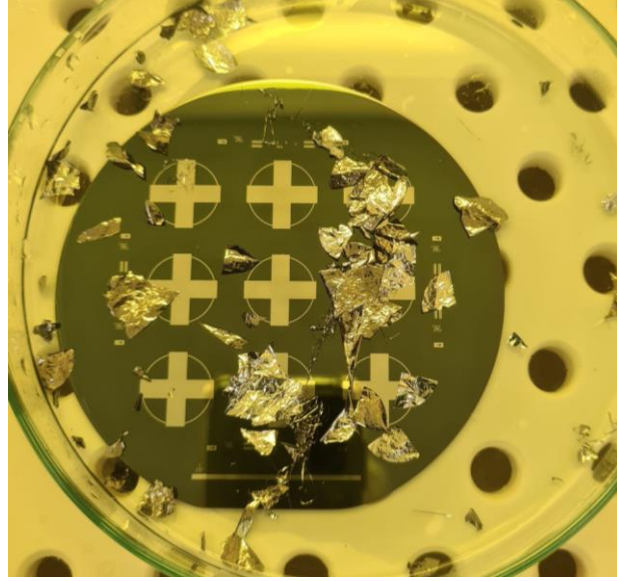
Fotolitografi işlemleri tamamlanan ve yüzeyinde metal kaplama yapılmak istenen bölgelerin açık, diğer bölgelerin ise fotorezist malzemeyle kapatılmış olan örnekler metal kaplama proseslerine alınmıştır.



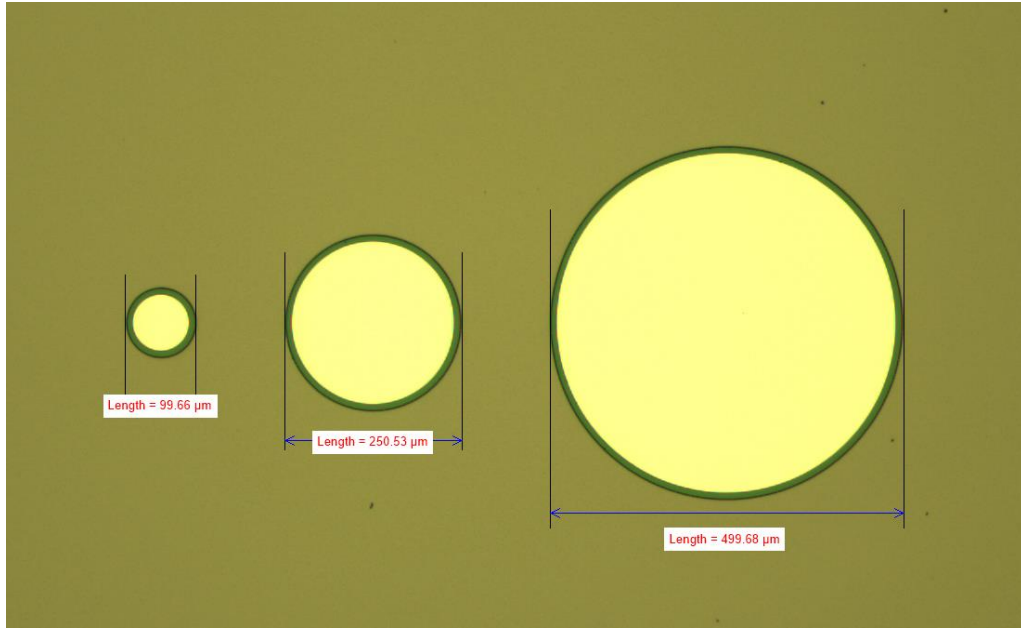
Şekil 6-13 Kontak metali kaplama proseslerinin gerçekleştirildiği fiziksel buhar biriktirme sistemi.

Örneklerin metal kaplama prosesleri Şekil 6-13'te yer verilen sistemde 300 nm kalınlığında Alüminyum metali buharlaştırılarak gerçekleştirilmiştir. Örnekler yüklendikten sonra reaksiyon kazanında yüksek vakum için yaklaşık 1 saat süreyle beklenmiştir. Kazan basıncı 1×10^{-6} mbar değerinin altına düştükten sonra kaplama işlemine başlanmıştır. 0,2 nm/s kaplama hızında gerçekleştirilen kaplama hızı in-situ sensörler üzerinden okunan toplam kalınlık değerinin 300 nm'ye ulaştığının görülmesiyle birlikte sonlandırılmıştır.

Kaplama işlemi sonrasında aseton içerisinde daldırılan örneklere fotorezist kaldırma prosesi uygulanmış ve fotorezist katmanı üzerindeki metalle birlikte kaldırılmıştır. Bu işlem sonrasında işaretlenen alanlardaki metaller korunmuş ve kaplama prosesleri sonlandırılmıştır.



Şekil 6-14 Aseton içerisinde yapılmaya devam eden fotorezist kaldırma işleminden bir görüntü.



Şekil 6-15 Metalizasyon ve kaldırma işlemi sonrasında CV ölçümü için oluşturulan alüminyum kontakların optik mikroskop görüntüsü.

7. Karakterizasyon Ölçümleri ve Deneysel Sonuçlar

Termal oksitleme yöntemini temel alan ıslak ve kuru SiO₂ büyütmelemleri ile PECVD yöntemiyle kaplanan SiO₂ ve Si₃N₄ örneklerinin karakteristik özelliklerine, karakterizasyon sonuçlarının derli toplu aktarılabilmesi amacıyla Çizelge 7-1’de özetlenmiştir:

Grup	Örnek Numarası	Kırma İndisi	Kalınlık (nm)	Hızlı Isıl İşlem
A	1	1.56	1250	-
	2	1.56	1250	450°C – 30dk.
B-1	3	1.49	400	-
	4	1.49	400	450°C – 30dk.
B-2	5	1.87	135	-
	6	1.87	135	450°C – 30dk.
	7	2.36	135	-
	8	2.36	135	450°C – 30dk.
C	9	1.56	500	-
	10	1.56	500	450°C – 30dk.

Çizelge 7-1 Karakteristik özelliklerine göre sınıflandırılan örneklerin kırma indisi, kalınlık ve tavlama proseslerine tabi tutulma durumlarını gösteren çizelge.

7.1 Sanki Kararlı Durum Fotoiletkenlik Ölçümleri

Fotoiletkenlik ölçümleri Sinton firmasının WCT-120 model numaralı sisteminde gerçekleştirilmiştir. Sözü edilen sistem Bölüm 4.3’te “Sanki Kararlı Durum Fotoiletkenlik Ölçümü” başlığı altında incelenen teknik arka plan dahilinde çalışmakta ve taşıyıcı ömür süresi ölçümü yapmaktadır. Bu ölçümde doğru sonuçlara ulaşabilmek adına kullanılan silisyum alttäşlar Çizelge 6-1’de de verildiği gibi özellikle yüksek dirençli olarak seçilmiş ve alttäş kristal yapıdaki taşıyıcı ömür süresinin arayüzey dielektrik karakterizasyonunu engellemeyecek kadar yüksek olması amaçlanmıştır. >20,000 ohm-cm yığın direnci olan bir alttäştaki azınlık

taşıyıcı ömrü 1 ms'nin üzerindedir [59]. Yarıiletkendeki taşıyıcıların etkin ömür süreleri yığın ve yüzeydeki azınlık taşıyıcı ömür sürelerine bağlıdır.

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_b} + \frac{1}{\tau_s} \quad (7-1)$$

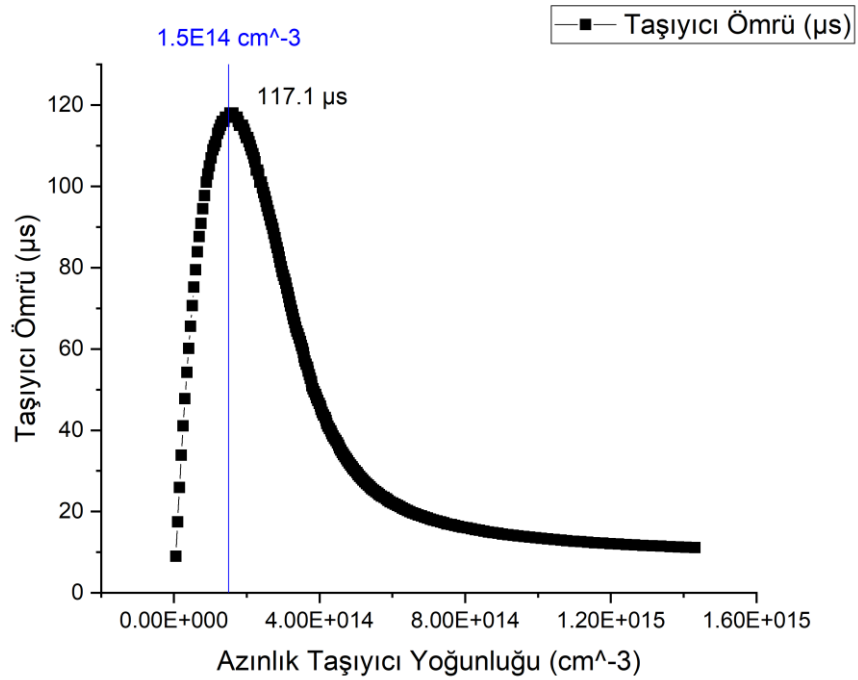
Denklem 7-1'de τ_{eff} değeri sistemde ölçülen etkin taşıyıcı ömrü değeridir. Bu değer esasında τ_b alttaş içerisindeki yığın taşıyıcı ömrü ile τ_s yüzey taşıyıcı ömrünün terslerinin toplamının bir ifadesidir. Alttaş taşıyıcı ömrü yüzeye karşılaştırılabilir büyüklükte bir değer olduğunda yüzey için gerçekçi ve doğrudan bir ölçüm sonucu elde edilememektedir. Bu sebepten silisyum alttaşlar Denklem 7-1'de verilen $1/\tau_b$ ifadesinin ihmal edilebilecek ölçüde küçük kalmasını sağlayacak kadar yüksek öz dirençli seçilmiştir.



Şekil 7-1 Sinton WCT-120 sisteminin ölçüm tablasına alttaş yerleştirilmiş durumdaki görünümü.

Sinton taşıyıcı ömrü karakterizasyon sistemine Çizelge 6-2'deki örnekler teker teker yüklenmiş ve sistemin tüm ölçüm parametreleri aynı tutularak karşılaştırmaya olanak tanıyacak şekilde parametrik bir karakterizasyon işlemi uygulanmıştır. Ölçümler sırasında alttaşların yerleştirildiği platform, kontrollü şekilde 25°C sıcaklıkta sabit tutulmuştur.

Sistemde örneğin yerleştirildiği platformun üzerinde kalan ışığın anlık olarak yanmasıyla birlikte örnekte taşıyıcı yükler oluşturulmakta ve bu taşıyıcıların yoğunluğu platform üzerinde yaratılan akımla ölçülmektedir. Taşıyıcıların zamana bağlı olarak yok olması akımda meydana gelen değişimle anlaşılmaktadır. Taşıyıcıların ortalama ömrü bu şekilde tayin edilmektedir. Taşıyıcı ömrü, tez çalışmasının literatür özeti kısmında da incelendiği üzere dielektrik – yarıiletken arayüzey pasivasyon kalitesi ile doğrudan ilişkili bir parametredir.



Şekil 7-2 Sinton ölçüm sisteminden elde edilen tipik bir grafik.

Sinton ölçüm sisteminden elde edilen tipik bir grafiğin örneği Şekil 7-2'de verilmiştir. Burada azınlık taşıyıcı yoğunluğuna bağlı olarak taşıyıcı ömürleri görülmektedir. Sistem, taşıyıcı ömrü parametresini taşıyıcı yoğunluğuna bağlı olarak oluşturmaktadır. Burada taşıyıcı ömrü için kabul edilecek bir değer, diğer tüm örnekler için de karşılaştırmalı şekilde bir veri setinin oluşturulmasına olanak

sağlayacaktır. Dolayısıyla ölçümün bu ilk aşamasında silisyum tabanlı örnekler için uygun olacağı değerlendirilen ve taşıyıcı ömrünün en yüksek değerine ulaştığı $1.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ değeri referans değer kabul edilmiştir.

Grup	Örnek Numarası	Taşıyıcı Ömrü (μs) (@ $1.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$)
A	1	108
	2	585
B-1	3	140
	4	2870
B-2	5	67
	6	60
	7	70
	8	46
C	9	2895
	10	3388

Çizelge 7-2 Sinton fotoiletkenlik ölçüm sisteminde $1.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ taşıyıcı yoğunluğunda elde edilen karşılaştırılabilir taşıyıcı ömrü değerleri.

Çizelge 7-2 tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen çalışmaların önemli bir sonucunu barındırmaktadır. Verilerin değerlendirilmesi işleminin dielektrik materyallerinin tekil olarak ele alınmasıyla yapılmasının daha uygun olacağı düşünülmüştür. Bu kapsamda SiO_2 dielektrik içeren ve büyütme teknikleriyle birbirinden ayrılan A, B-1 ve C grubu örnekleri (sırasıyla; ıslak termal difüzyon, PECVD ve kuru termal difüzyon) ile PECVD tekniğiyle büyütülen farklı kırma indislerine sahip Si_3N_4 dielektriklerin karşılaştırılması mümkün olan sonuçlara ulaşılmıştır. Ayrıyeten her örnek için tavlama işlemi sonrasındaki taşıyıcı ömrü değerleri de elde edilmiştir.

Sonuçlar SiO_2 dielektrikler için incelendiğinde tavlama öncesindeki durum için en iyi taşıyıcı ömrüne sahip olan büyütme tekniğinin arındırma ile kuru termal oksidasyon yöntemi olduğu görülmektedir. Bu örnek için ölçülen 2895 μs değeri tavlama işlemi

uygulanmamış örnekler arasındaki en yüksek değerdir. Islak termal oksidasyon (108 μ s) ve PECVD (140 μ s) büyütme teknikleri arasında anlamlı bir fark görülmemiştir.

Tavlama işlemi incelendiğinde ise yapılabilecek yorum; tavlama işleminin tüm SiO₂ büyütme tipleri için taşıyıcı ömrünü uzatan, dolayısıyla pasivasyon kalitesini artıran bir etkiye sahip olduğu olmuştur. Tavlama uygulanan örnekler özel olarak incelendiğinde ise ıslak termal oksidasyon örneğinde 585 μ s ve PECVD örneğinde ise 2870 μ s ölçülmüştür. Tavlama öncesinde bu iki örnek arasında her ne kadar anlamlı bir fark görülemedi olsa da tavlama sonrasında ciddi bir fark olduğu görülmüştür. PECVD örneğinde kuru termal oksidasyon örneğinin taşıyıcı ömrüyle karşılaştırılabilir ölçüde bir yükselme kaydedilmiştir. Islak termal oksidasyon örneği ise bu seviyelere ulaşamamıştır. Tavlama ile SiO₂ amorf kümelerinin yeniden düzenlendiği bilinmektedir [60]. Islak termal oksidasyon ile PECVD örnekleri arasında tavlama neticesinde oluşan bu farkın, dielektrik saflığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Islak termal oksidasyon yönteminde dielektrik içerisinde görülen yüksek yoğunluktaki H atomları, tavlama esnasındaki moleküler yeniden düzenlenim sırasında kristalin yeterince sıkı paketlenmesine izin vermemektedir [61]. Yüksek vakum ortamında ve reaktif radikallerle yapılan PECVD tekniğinde ise her ne kadar başta amorf SiO₂ kümeleri arasında büyük kristal boşlukları olsa da tavlama sırasındaki moleküler yeniden düzenlenim ile sıkı paketlenmiş yüksek yoğunluklu bir polikristal yapının elde edildiği düşünülmektedir.

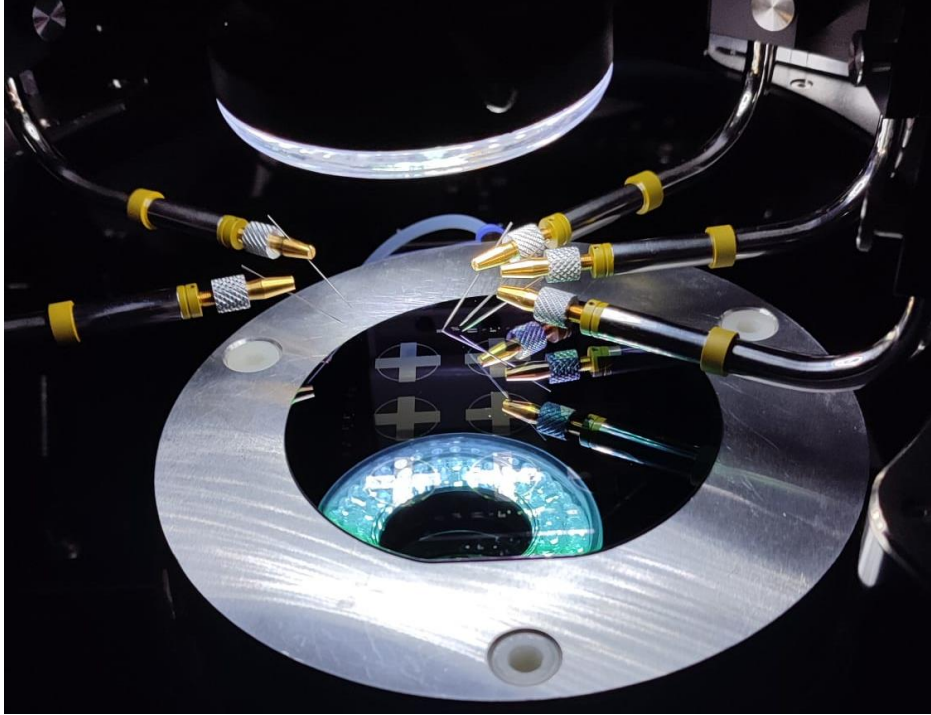
Arındırma ile kuru termal oksidasyon tekniğiyle büyütülen SiO₂ dielektriğe sahip olan örnekte ise tavlama işleminin anlamlı bir fark yaratmadığı, zaten yeterince yüksek seviyede olan taşıyıcı ömrünü biraz daha yüksek bir seviyeye taşıyabildiği görülmüştür.

PECVD Si₃N₄ dielektrikler için ise hem kırma indisinin hem de tavlama işleminin taşıyıcı ömrü üzerinde anlamlı bir fark yaratmadığı görülmüştür. Dolayısıyla tez kapsamında yürütülen çalışmalar neticesinde PECVD tekniğiyle büyütülen Si₃N₄ dielektriğin silisyum tabanlı aygıtlar için SiO₂ dielektriklere kıyasla başarılı bir pasivasyon katmanı oluşturamadığı değerlendirilmiştir [62].

7.2 Kapasitans – Voltaj (CV) Ölçümleri

Kapasitans – Voltaj ölçümü, Bölüm 2.2.2’de verilen literatür özeti ve 5.2’de gerçekleştirilen geniş simülasyon çalışmaları çerçevesinde belli bir olgunluk seviyesine ulaştırılmış olan karakterizasyon tekniğidir. Tez çalışmaları kapsamında üretilen örneklerin parametrik bir yaklaşımla kapasitans ölçümleri yapılmış ve karşılıklı mukayese yoluyla fotoiletkenlik ölçümleri sonucunda elde edilen veri setleriyle oluşan uyumlulukları incelenmiştir.

PECVD ve termal oksidasyon gibi farklı büyütme teknikleriyle oluşturulan dielektrikler üzerinde oluşturulan desenlendirilmiş metal kontaklar aracılığıyla MOS yapılar oluşturulmuş ve örnekler elektriksel prob istasyonu ölçümleri için hazır hale getirilmiştir.

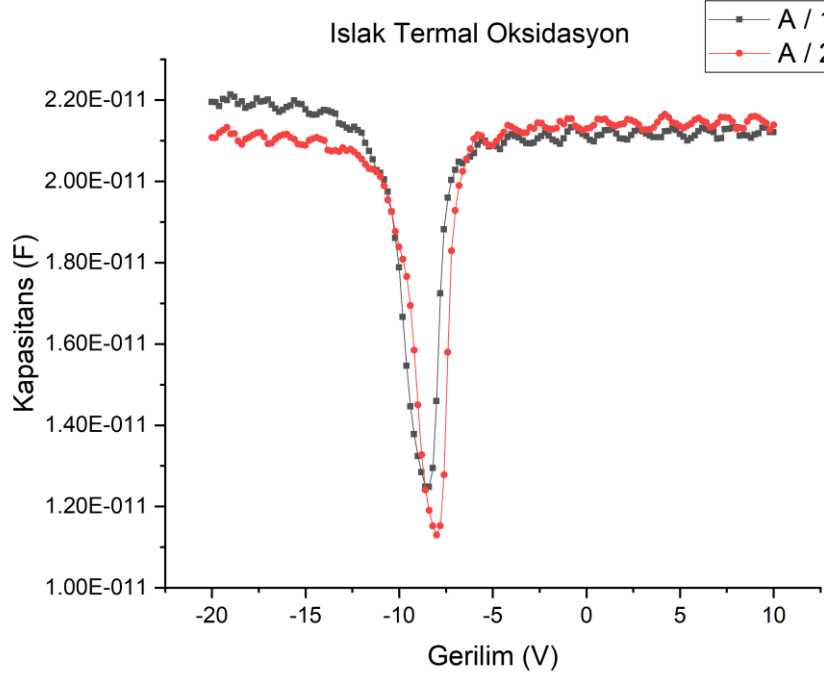


Şekil 7-3 Prob istasyonunda yapılan Kapasitans – Voltaj ölçümü esnasında çekilmiş fotoğraf.

Ölçümlerde her bir büyütme tekniği için tavlama uygulanmış ve uygulanmamış olmak üzere tekil ölçümler yapılmış ve karşılaştırmalı grafikler çizdirilmiştir. Yapılan parametrik simülasyonlarda dielektrik kalınlığı ve materyalinin baskın etkisinin olduğunun görülmesi üzerine karşılaştırmalı ölçümler benzer büyütme tekniği için

tavlama prosesinin karakterize edilmesi ve fotoiletkenlik sonuçlarıyla uyumluluğunun incelenmesine yönelik gerçekleştirilmiştir.

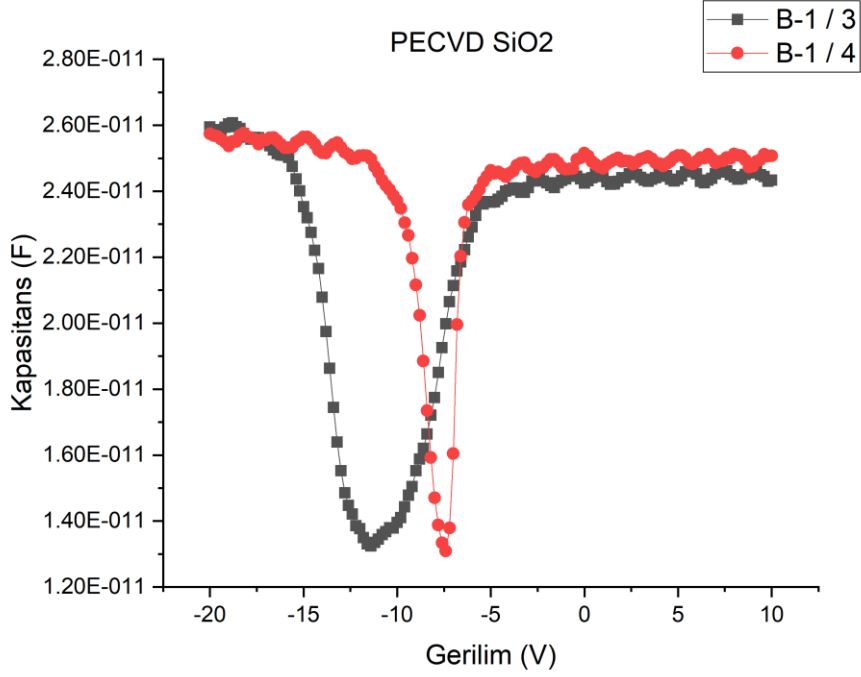
Bu kapsamda ilk olarak ıslak termal oksidasyon tekniğiyle büyütülmüş dielektriklere sahip olan A / 1 ve A / 2 örneklerinin ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7-4 Islak termal oksidasyon (A/1 ve A/2) örneklerinin 1kHz frekansta kapasitans – voltaj ölçüm grafikleri.

Şekil 7-4 incelendiğinde A/1 ve A/2 örneklerinin saturasyon kapasitansları arasında büyük bir fark olmadığı görülmektedir. Dolayısıyla tavlama prosesinin dielektrik kalınlığında bir farklılık yaratmadığı değerlendirilmiştir. Diğer taraftan A/2 örneğinin eşik gerilim değerinin 1V mertebesinde sağa kaydığı görülmektedir. Simülasyon çalışmaları neticesinde edinilen deneyim çerçevesinde değerlendirildiğinde dielektrik – yarıiletken arayüzey yük yoğunluğu arttıkça eşik voltajı büyümekte dolayısıyla sola kaymaktadır. Bunun sonucunda tavlama işlemi sonrasında pasivasyon kalitesinin yükselmiş olduğu yorumu yapılabilir.

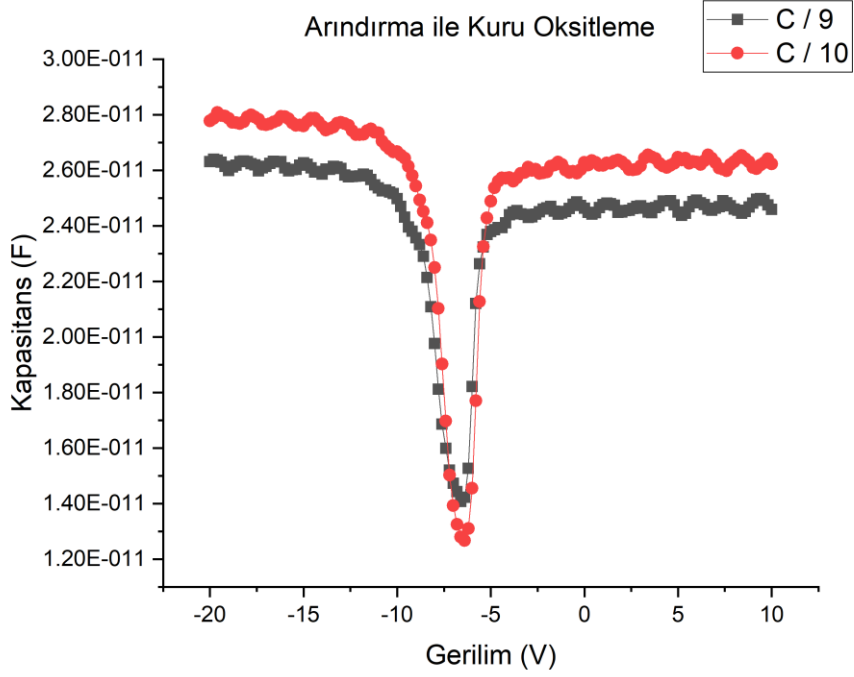
İkinci olarak PECVD kaplama tekniğiyle büyütülmüş dielektriklere sahip olan B-1 / 3 ve B-1 / 4 örneklerinin ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7-5 PECVD (B-1 / 3 ve B-1 / 4) örneklerinin kapasitans – voltaj ölçüm grafikleri.

Şekil 7-5 incelendiğinde örnekler arasında eşik voltajları arasında 4V mertebesinde fark olduğu görülmektedir. Bu fark tavlama örneği ile arasındaki fotoiletkenlik ölçümleri neticesinde elde edilmiş taşıyıcı ömrü değerleri arasında görülen farkla birlikte değerlendirildiğinde anlam kazanmaktadır. Ölçüm sonuçlarının paralel olarak birbirlerini doğrular nitelikte olduğu görülmektedir. Tavlama prosesi sonrasında arayüzey yük yoğunluğunun azalmış olduğu ve ilk duruma göre pasivasyon kalitesinin yükselmiş olduğu yorumu yapılabilir.

Son olarak arındırma ile kuru oksidasyon tekniğiyle büyütülmüş dielektriklere sahip olan C / 9 ve C / 10 örneklerinin ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7-6 Arındırma ile kuru oksidasyon (C / 9 ve C / 10) örneklerinin kapasitans – voltaj ölçüm grafikleri.

Şekil 7-6 incelendiğinde örneklerin eşik voltaj değerleri arasında bir fark görülmemiştir. Fotoiletkenlik ölçümlerinde de tavlama uygulanan ve uygulanmayan örneklerin taşıyıcı ömürleri, yüksek ve benzer seviyelerde ölçülmüştü. Bu açıdan değerlendirildiğinde her iki ölçüm sonucu arasında uyumluluk görülmüştür. Başka bir deyişle: tavlama işleminin fotoiletkenlik ölçümlerinde fark yaratmıyor oluşu, bu ölçümde eşik voltajları arasında da fark görülmemesi sonucu ile uyumludur.

8. Sonuç

Yapılan çalışma kapsamında silisyum tabanlı fotodedektörlerin performans parametrelerini iyileştirmeye yönelik olarak dielektrik ince filmlerin rolü incelenmiş ve parametrik yaklaşımlarla bilgisayar destekli simülasyonlar ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ortaya çıkan sonuçlar, fotodedektör teknolojisindeki yerleşmiş yaklaşımlar çerçevesinde fotocevap ve karanlık akım olmak üzere iki temel performans parametresi ekseninde mercek altına alınmıştır. Fotocevap performansının iyileştirilmesine yönelik dielektrik ince filmlerden beklenen temel nitelik yüksek yansıtma olurluk, karanlık akım için yüksek pasivasyon kalitesi olmuştur.

Yansıtma özelliğinin araştırılması noktasında temel yarıiletken fiziğinde yerleşmiş formülasyonlar ekseninde yapılan hesaplamaların bilgisayar ortamında karmaşık simülasyon modelleriyle testleri gerçekleştirilmiş ve parametrik karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu kapsamda ayrı ayrı olarak ele alınan kırma indisi, kalınlık ve malzeme türü gibi başlıklar altında uygun özelliklere sahip dielektriklerle ön yüz yansımalarının aygıt isterine özel hedef dalgaboyu için %40'lardan %1'lere indirilebileceği gösterilmiştir.

Dielektrik – yarıiletken arayüzey pasivasyon kalitesinin fotodedektör karanlık akımının düşürülmesi noktasında önemli katkılar sunabileceği irdelenmiş ve bu alanda hem simülasyon hem de deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Simülasyon çalışmaları, karakterizasyon yöntemlerinin doğrulanması ve ileri düzeyde anlaşılması hedefiyle gerçekleştirilmiştir. Karakterizasyon sonuçları, simülasyon çalışmaları neticesinde elde edilen tecrübe ışığında karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Yapılan deneyler fotoiletkenlik ve kapasitans - voltaj olmak üzere iki farklı metot ile gerçekleştirilmiş ve sonuçların birbiriyle karşılaştırılması imkânı yakalanmıştır.

Silisyum tabanlı fotodedektörlerin dielektrik optimizasyonlarına yönelik yapılan bu çalışmada oluşturulan bilgisayar destekli simülasyon temeli üzerine deneysel çalışmalar, farklı metotlarla karşılaştırmalı olarak yapılmıştır.

Çalışmanın ileriki safhalarında arındırma ile kuru oksitleme tekniğinin barındırdığı 3 aşamalı prosesin iyileştirilmesi yoluyla pasivasyon kalitesi artırılmış dielektriklerin elde edilmesi yönünde çalışmalar yapılması planlanmaktadır. Bu dielektrik büyütme

tekninin getirdiği arayüzey etkilerinin iyileştirilmesinin yanı sıra, yığın kristal içerisindeki safsızlık düzenlemelerinin etkin kullanımıyla birlikte, fotodedektör karanlık akım seviyelerinin uluslararası muadillerle kıyaslanabilecek aygıtlar geliştirmeye olanak sağlayabilecek potansiyelde olduğu öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] W. N. Ye, and Y. Xiong, "Review of silicon photonics: history and recent advances," *Journal of Modern Optics*, vol. 60, no. 16, pp. 1299-1320, **2013**.
- [2] Y. Qin, S. Long, H. Dong *et al.*, "Review of deep ultraviolet photodetector based on gallium oxide," *Chinese Physics B*, vol. 28, no. 1, pp. 018501, **2019**.
- [3] S. M. Sze, Y. Li, and K. K. Ng, *Physics of semiconductor devices*: John Wiley & sons, **2021**.
- [4] R. Potter, and W. Eisenman, "Infrared photodetectors: a review of operational detectors," *Applied Optics*, vol. 1, no. 5, pp. 567-574, **1962**.
- [5] J. Berkowitz, *Photoabsorption, photoionization, and photoelectron spectroscopy*: Academic Press, **2012**.
- [6] S. O. Kasap, *Optoelectronics and photonics*: Pearson Education UK, 2013.
- [7] C. Hu, *Modern semiconductor devices for integrated circuits*: Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, **2010**.
- [8] E. S. Yang, *Microelectronic devices*: McGraw-Hill New York, **1988**.
- [9] J. Wilson, and J. F. Hawkes, "Optoelectronics-an introduction," *Optoelectronics-An introduction (2nd edition)*, **1989**.
- [10] S. W. Jones, "Diffusion in silicon," *IC Knowledge LLC*, pp. 23-61, **2008**.
- [11] R. Soref, "The past, present, and future of silicon photonics," *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, vol. 12, no. 6, pp. 1678-1687, **2006**.
- [12] I. Massiot, "Design and fabrication of nanostructures for light-trapping in ultra-thin solar cells," Université Paris Sud-Paris XI, **2013**.
- [13] R. P. Smith, A. A.-C. Hwang, T. Beetz *et al.*, "Introduction to semiconductor processing: Fabrication and characterization of pn junction silicon solar cells," *American Journal of Physics*, vol. 86, no. 10, pp. 740-746, **2018**.
- [14] R. Korde, and J. Geist, "Quantum efficiency stability of silicon photodiodes," *Applied Optics*, vol. 26, no. 24, pp. 5284-5290, **1987**.
- [15] D. Chauhan, A. Perera, L. Li *et al.*, "Dark current and photoresponse characteristics of extended wavelength infrared photodetectors," *Journal of Applied Physics*, vol. 122, no. 2, pp. 024501, **2017**.

- [16] S. Mahmood, and M. Kabir, "Modeling of transient and steady-state dark current in amorphous silicon p–i–n photodiodes," *Current Applied Physics*, vol. 9, no. 6, pp. 1393-1396, **2009**.
- [17] B. Sopori, and W. Chen, "Influence of distributed defects on the photoelectric characteristics of a large-area device," *Journal of crystal growth*, vol. 210, no. 1-3, pp. 375-378, **2000**.
- [18] P. R. YP, P. KC, and G. P. AP, "Novel methods to reduce leakage current in Si PIN photodiodes designed and fabricated with different dielectrics," *Indian Journal of Pure & Applied Physics (IJPAP)*, vol. 52, no. 9, pp. 637-644, **2015**.
- [19] S. Okhonin, M. Gureev, D. Sallin *et al.*, "A dynamic operation of a PIN photodiode," *Applied Physics Letters*, vol. 106, no. 3, pp. 031115, **2015**.
- [20] R. H. Hamstra, and P. Wendland, "Noise and frequency response of silicon photodiode operational amplifier combination," *Applied optics*, vol. 11, no. 7, pp. 1539-1547, **1972**.
- [21] "Surface Texturing," <https://www.pveducation.org/pvcdrom/design-of-silicon-cells/surface-texturing>, Erişim Tarihi: Kasım, **2021**.
- [22] R. Sharma, "Silicon nitride as antireflection coating to enhance the conversion efficiency of silicon solar cells," *Turkish Journal of Physics*, vol. 42, no. 4, pp. 350-355, **2018**.
- [23] J. Hofstetter, C. Del Canizo, S. Ponce-Alcantara *et al.*, "Optimisation of SiNx:H anti-reflection coatings for silicon solar cells." pp. 131-134, **2007**.
- [24] X.-J. Jia, C.-L. Zhou, J.-J. Zhu *et al.*, "Effect of PECVD SiNx/SiOyNx–Si interface property on surface passivation of silicon wafer," *Chinese Physics B*, vol. 25, no. 12, pp. 127301, **2016**.
- [25] S. Duttagupta, F. Lin, M. Wilson *et al.*, "Extremely low surface recombination velocities on low-resistivity n-type and p-type crystalline silicon using dynamically deposited remote plasma silicon nitride films," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 22, no. 6, pp. 641-647, **2014**.
- [26] H. Zimmermann, B. Muller, A. Hammer *et al.*, "Large-area lateral pin photodiode on SOI," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 49, no. 2, pp. 334-336, **2002**.
- [27] N. Maity, A. Kumar, R. Maity *et al.*, "Analysis of flatband voltage for MOS devices using high-K dielectric materials," *Procedia Materials Science*, vol. 5, pp. 1198-1204, **2014**.

- [28] B. E. Deal, "The current understanding of charges in the thermally oxidized silicon structure," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 121, no. 6, pp. 198C, **1974**.
- [29] K. J. Yang, and C. Hu, "MOS capacitance measurements for high-leakage thin dielectrics," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 46, no. 7, pp. 1500-1501, **1999**.
- [30] D. W. Hess, and K. F. Jensen, "Microelectronics processing," ACS Publications, **1989**.
- [31] M. Miyamura, K. Masuzaki, H. Watanabe *et al.*, "Origin of flatband voltage shift in poly-Si/Hf-based high-k gate dielectrics and flatband voltage dependence on gate stack structure," *Japanese journal of applied physics*, vol. 43, no. 11S, pp. 7843, **2004**.
- [32] A. Tsirimpis, "Investigation of Implanted Boron in 4H-SiC and Iron in 3C-SiC and Experimental/Theoretical Analysis of the Depletion Zone in 4H-SiC MOS Capacitors," Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), **2018**.
- [33] P. Van Zant, *Microchip fabrication*: McGraw-Hill Education, **2014**.
- [34] M. Rothschild, T. M. Bloomstein, T. H. Fedynyshyn *et al.*, "Recent trends in optical lithography," *Lincoln Laboratory Journal*, vol. 14, no. 2, pp. 221-236, **2003**.
- [35] S. Franssila, *Introduction to microfabrication*: John Wiley & Sons, **2010**.
- [36] G.-T. Chiu, and J. M. Shaw, "Optical lithography: introduction," *IBM Journal of Research and Development*, vol. 41, no. 1.2, pp. 3-6, **1997**.
- [37] R. Zaouk, B. Y. Park, and M. J. Madou, "Introduction to microfabrication techniques," *Microfluidic Techniques*, pp. 5-15: Springer, **2006**.
- [38] N. Negishi, H. Takesue, M. Sumiya *et al.*, "Deposition control for reduction of 193 nm photoresist degradation in dielectric etching," *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, vol. 23, no. 1, pp. 217-223, **2005**.
- [39] J. Venables, *Introduction to surface and thin film processes*: Cambridge University Press, **2000**.
- [40] "Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD)," <https://plasma.oxinst.com/technology/pecvd>, Erişim Tarihi: Kasım, **2021**.

- [41] D. Liu, X. Chen, Y. Yan *et al.*, "Conformal hexagonal-boron nitride dielectric interface for tungsten diselenide devices with improved mobility and thermal dissipation," *Nature communications*, vol. 10, no. 1, pp. 1-11, **2019**.
- [42] C.-H. Lin, "Oxidation (of Silicon)," *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*, D. Li, ed., pp. 1584-1584, Boston, MA: Springer US, **2008**.
- [43] "Oxidation: Fabrication of oxide layers," <https://www.halbleiter.org/en/oxidation/oxidation/>, Erişim Tarihi: Kasım, **2021**.
- [44] N. Mott, S. Rigo, F. Rochet *et al.*, "Oxidation of silicon," *Philosophical Magazine B*, vol. 60, no. 2, pp. 189-212, **1989**.
- [45] A. Fargeix, G. Ghibaudo, and G. Kamarinos, "A revised analysis of dry oxidation of silicon," *Journal of Applied Physics*, vol. 54, no. 5, pp. 2878-2880, **1983**.
- [46] M. Uematsu, H. Kageshima, and K. Shiraishi, "Simulation of wet oxidation of silicon based on the interfacial silicon emission model and comparison with dry oxidation," *Journal of Applied Physics*, vol. 89, no. 3, pp. 1948-1953, **2001**.
- [47] J. ii Will, "Development and evaluation of an intrinsic gettering process for fabrication of integrated circuits," **2000**.
- [48] O. Ueda, K. Nauka, J. Lagowski *et al.*, "On the Mechanism of Intrinsic Gettering by Butterfly-Type Defects in Silicon," *MRS Online Proceedings Library*, vol. 71, no. 1, pp. 21-26, **1986**.
- [49] A. M. Hasan, I. Raifuku, N. Amin *et al.*, "Air-stable perovskite photovoltaic cells with low temperature deposited NiOx as an efficient hole-transporting material," *Optical Materials Express*, vol. 10, no. 8, pp. 1801-1816, **2020**.
- [50] A. C. MICROTECHTM, "Advanced On-Wafer Device Characterization Using the Summit 10500," **2001**.
- [51] "Schematic of NIST Single Nanowire Manipulation System," <https://www.nist.gov/image/singlenanowireschematicjpg>, Erişim Tarihi: Kasım, **2021**.
- [52] B. F. Rajab, "Investigation of Crystalline Silicon Surface Passivation for Solar Cells Using HfO₂," Masdar Institute of Science and Technology, **2018**.
- [53] R. Sauer, J. Weber, J. Stolz *et al.*, "Dislocation-related photoluminescence in silicon," *Applied Physics A*, vol. 36, no. 1, pp. 1-13, **1985**.

- [54] P. Drummond, D. Bhatia, and J. Ruzyllo, "Measurement of effective carrier lifetime at the semiconductor–dielectric interface by Photoconductive Decay (PCD) Method," *Solid-state electronics*, vol. 81, pp. 130-134, **2013**.
- [55] D. Kiliani, G. Micard, B. Steuer *et al.*, "Minority charge carrier lifetime mapping of crystalline silicon wafers by time-resolved photoluminescence imaging," *Journal of Applied Physics*, vol. 110, no. 5, pp. 054508, **2011**.
- [56] "Quasi-Steady-State Lifetime Measurements," <https://www.pveducation.org/pvcdrom/characterisation/quasi-steady-state-lifetime-measurements>, Erişim Tarihi: Kasım 2021, **2021**.
- [57] H. Haug, "New methods for investigation of surface passivation layers for crystalline silicon solar cells," **2014**.
- [58] S. Helland, "Electrical characterization of amorphous silicon nitride passivation layers for crystalline silicon solar cells," Institutt for materialteknologi, **2011**.
- [59] A. Cuevas, and D. Macdonald, "Measuring and interpreting the lifetime of silicon wafers," *Solar Energy*, vol. 76, no. 1-3, pp. 255-262, **2004**.
- [60] S. Miyazaki, "Characterization of high-k gate dielectric/silicon interfaces," *Applied surface science*, vol. 190, no. 1-4, pp. 66-74, **2002**.
- [61] S. Mani, and T. Saif, "Stress development in plasma-deposited silicon dioxide thin-films due to hydrogen evolution," *Thin Solid Films*, vol. 515, no. 5, pp. 3120-3125, **2007**.
- [62] S. Glunz, A. Grohe, M. Hermle *et al.*, "Comparison of different dielectric passivation layers application in industrially feasible high efficiency crystalline silicon solar cells." p. 10, **2005**.