

**YÜKSEK SICAKLIK PROSESLERİNİN, SİLİSYUM  
TABANLI FOTODEDEKTÖR AYGIT PERFORMANSINA  
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF HIGH  
TEMPERATURE PROCESSES ON SILICON BASED  
PHOTODETECTOR DEVICE PERFORMANCE**

**CEM ALİBEYOĞLU**

**PROF. DR. ABDULLAH CEYLAN**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim - Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

NANOTEKNOLOJİ VE NANOTIP Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2021

## ÖZET

# YÜKSEK SICAKLIK PROSELERİNİN, SİLİSYUM TABANLI FOTODEDEKTÖR AYGIT PERFORMANSINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

**Cem ALİBEYOĞLU**

**Yüksek Lisans, Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Abdullah CEYLAN**

**Aralık 2021, 72 sayfa**

Yürütülen bu tez çalışmasında, Silisyum alttaşlar ile P-I-N yapılı fotodedektörler üretilip, bu dedektörlerin üretim basamaklarından termal oksidasyon ve katkılama yüksek sıcaklık mikrofabrikasyon adımlarının aygıt performansına olan etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Mikrofabrikasyon işlemlerinin daha verimli gerçekleştirilmesi amacıyla, öncesinde simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kuru ve ıslak termal oksidasyon prosesleri ile ayrı ayrı fotodedektör üretimi gerçekleştirilmiş, kuru işlem için arındırma yöntemi tercih edilmiştir. Katkılama işlemleri için ise 1000 °C ve 1100 °C olmak üzere iki farklı sıcaklıkta p-tipi ön yüzey bor difüzyon prosesi gerçekleştirilmiştir. Bahsedilen yüksek sıcaklık prosesleri için 1200 °C sıcaklığa çıkabilen programlanabilir fırınlar kullanılmıştır. Fotodedektör üretimindeki dielektrik kaplamaları için plazma destekli kimyasal buhar biriktirme yöntemi, tüm desenlerin şekillendirilmesi için fotolitografi yöntemi, kuru aşındırmalar için plazma destekli kuru aşındırma sistemi ve metalizasyon adımları için elektron demeti ile buharlaştırma sistemi kullanılmıştır. Fotodedektör üretiminin ardından dedektör karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Katkılama profil analizleri için elektrokimyasal C-V ölçümleri alınmış, prob istasyonu üzerinde ise dedektörlerin; I-V, karanlık akım ve duyarlılık ölçümleri tamamlanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, katkılama sıcaklığının düşürülmesi ile difüzyon profili sığlaştırılmış ve bu yöntemle üretilen fotodedektörlerde %7,8 duyarlılık performans artışı ölçülmüştür. Arındırma yöntemi ile gerçekleştirilen kuru oksidasyon prosesi ile

Üretilen fotodedektörlerde ise %69,2 oranında daha düşük karanlık akım yoğunluğu hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Fotodedektör, Silisyum, P-I-N, Difüzyon, Katkılama, P-tipi, N-tipi, Oksidasyon, Termal, Yüksek Sıcaklık, Mikrofabrikasyon, Silisyum Dioksit (SiO<sub>2</sub>), Duyarlılık, Karanlık Akım

## **ABSTRACT**

# **INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF HIGH TEMPERATURE PROCESSES ON SILICON BASED PHOTODETECTOR DEVICE PERFORMANCE**

**Cem ALİBEYOĞLU**

**Master of Science, Department of Nanotechnology and Nanomedicine**

**Supervisor: Prof. Dr. Abdullah CEYLAN**

**December 2021, 72 pages**

The goal of this thesis work is to produce photodetectors in P-I-N form by silicon substrate and to investigate effect of thermal oxidation and doping high temperature microfabrication steps of manufacturing levels of these detectors on device performance. Simulation studies were performed priorly to increase efficiency microfabrication process. Photodetector manufacturing was performed separately by wet and dry thermal oxidation process. Gettering method was chosen for dry process. Two different p-type front surface bor diffusion process with temperature 1000 °C and 1100 °C was accomplished for doping. Adjustable ovens which could heaten up to 1200 °C were used for mentioned high temperature processes. Plasma enhanced chemical vapor deposition method for dielectric coatings in photodetector production, photolithography method for shaping all patterns, plasma enhanced dry etching system for dry etching and electron beam evaporation system for metallization steps were used. Detector characterization was studied after photodetector producing. Electrochemical C-V was measured to analyze doping profiles furthermore I-V dark current and responsivity measurements of detectors were completed on prob station. According to examination of results, the diffusion profile was shallower by reducing the doping temperature and %7.8 higher responsivity performance was detected in the photodetectors produced by this method. On the other hand, %69.2 lower dark current noise density was calculated

in photodetectors produced by the dry oxidation process performed with the gettering oxidation method.

**Key Words:** Photodetector, Silicon, P-I-N, Diffusion, Doping, P-type, N-type, Oxidation, Thermal, High Temperature, Microfabrication, Silicone dioxide ( $\text{SiO}_2$ ), Responsivity, Dark Current

## TEŞEKKÜR

Bu tezin oluşması için gereken her türlü desteği veren ve yardımını esirgemeyen danışmanım sayın Prof. Dr. Abdullah CEYLAN'a

Çalışmalar için kullanılan tüm imkanları sağlayan Bilkent Üniversitesi NANOTAM direktörü sayın Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY'a

Tasarım, deneysel işlemler ve tüm karakterizasyon yöntemleri için bilgi birikimini benden esirgemeyen müdürüm sayın Dr. M. Cihan ÇAKIR'a

Deneysel yöntemler ve simülasyon çalışmalarında tüm desteğini içtenlikle veren iş arkadaşım ve 12 yıllık dostum Levent ÖZKARAYEL'e

Karakterizasyon ölçümleri için her ihtiyaç duyduğumda yardımcı olan çalışma arkadaşım Ferhat UÇAR'a

Tavlama, dielektrik kaplama ve kuru aşındırma proseslerinde bana destek olan iş arkadaşlarım Tolga SEMİZ'e ve Hakan YAKUPOĞLU'na

İçtenlikle hep yanımda olan Gülşah ÇELİK ve tüm NANOTAM ailesine

Bugünlere gelmemi sağlayan sevgili annem Ayşe Gül ALİBEYOĞLU ve babam Tahir ALİBEYOĞLU'na

Kardeşten öte kuzenlerim Sahir NALÇACI ve Nazlı NALÇACI'ya

Ev arkadaşım PESTOŞ'a

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Cem ALİBEYOĞLU

Aralık 2021, Ankara

# İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER.....	ix
ŞEKİLLER .....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Silisyum Tabanlı Fotodedektörler.....	3
2.1.1 Silisyum Tabanlı P-I-N Fotodedektörlerin Yapısı .....	3
2.1.2 Silisyum Tabanlı P-I-N Fotodedektörlerin Çalışma Prensibi .....	4
2.2 Silisyum Tabanlı Fotodedektörlerin Performansını Tanımlamakta Kullanılan Temel Nicelikler.....	7
2.2.1 Kuantum Verimliliği .....	7
2.2.2 Duyarlılık.....	7
2.2.3 Tepki Süresi .....	8
2.2.4 Gürültü .....	8
2.3 Silisyum Tabanlı Fotodedektör Üretiminde Kullanılan Mikrofabrikasyon Teknikleri.....	9
2.3.1 Altaş Temizliği.....	9
2.3.2 Termal Oksidasyon .....	11
2.3.3 Fotolitografi .....	12
2.3.4 Aşındırma .....	13

2.3.5 Katkılama .....	15
2.3.6 Yansıma Önleyici Katman Kaplaması .....	17
2.3.7 Metalizasyon .....	18
2.4 Silisyum Tabanlı Fotodedektörlerin Karakterizasyon Teknikleri .....	20
2.4.1 Prob İstasyonu ile Elektriksel Ölçümler .....	21
2.4.2 Reflektometre Dielektrik Kalınlık Ölçümleri .....	21
2.4.3 Profilometre ile Derinlik Ölçümleri .....	22
2.4.4 Elektrokimyasal Kapasitans-Gerilim (C-V) Ölçümleri .....	23
3. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARİ.....	25
3.1 Arka Yüzey Katkılama Derinliğine Bağlı Fotoakım Simülasyon Çalışmaları .....	26
3.2 Ön Yüzey Katkılama Derinliğine Bağlı Fotoakım Simülasyon Çalışmaları	28
3.3 Ön Yüzey Katkılama Sıcaklığına Bağlı Fotoakım Simülasyon Çalışmaları .....	29
3.4 Ön Yüzey Katkılama Süresine Bağlı Fotoakım Simülasyon Çalışmaları..	29
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	31
4.1 Temizlik.....	33
4.2 Oksidasyon .....	34
4.2.1 Islak Termal Oksidasyon.....	35
4.2.2 Kuru Termal Oksidasyon .....	37
4.3 N Tipi Fosfor Katkılama Adımı Öncesi Arka Yüzey SiO <sub>2</sub> Aşındırma.....	38
4.4 Arka Yüzey N Tipi Fosfor Katkılama .....	39
4.5 Arka Yüzey Katkılama Sonrası oluşan Fosfor-Cam Tabakasının Aşındırılması .....	40
4.6 Arka Yüzey Koruma Kaplaması .....	41
4.7 Ön Yüzey Şekillendirme Fotolitografisi.....	42
4.8 Ön Yüzey Şekillendirme Kuru Aşındırması .....	43
4.9 Ön yüzey P Tipi Bor Katkılama .....	45



4.10 Ön Yüzey Katkılama Sonrası oluşan Bor-cam Tabakasının Islak Aşındırılması .....	46
4.11 Ön Yüzey Yansıma Önleyici Tabakanın Kaplanması .....	46
4.12 Ön Yüzey Yansıma Önleyici Tabakanın Şekillendirme Fotolitografisi .....	47
4.13 Ön Yüzey Yansıma Önleyici Tabakanın Şekillendirme Islak Aşındırması .	48
4.14 Ön Yüzey Metalizasyon Şekillendirilme Fotolitografisi .....	49
4.15 Ön Yüzey Metalizasyonu.....	51
4.16 Arka Yüzey SiO <sub>2</sub> Koruma Kaplamasının Aşındırılması .....	52
4.17 Ön Yüzey Metalizasyon Tavlama .....	52
4.18 Arka Yüzey Metalizasyonu .....	53
5. DENEYSEL SONUÇLAR .....	55
5.1 Ön Yüzey Katkılama ECV Ölçümleri .....	55
5.2 Arka Yüzey Katkılama ECV Ölçümleri .....	57
5.3 I-V Ölçümleri .....	58
5.4 Duyarlılık Ölçümleri .....	63
6. SONUÇLAR .....	67
KAYNAKLAR .....	69

## ÇİZELGELER

Çizelge 4-1	Deneysel varyasyon detayı.....	31
Çizelge 4-2	Alttaş teknik özellikleri.....	31
Çizelge 5-1	A3 alttaşı üzerindeki fotodedektörlerin karanlık akım ölçüm sonuçları.....	61
Çizelge 5-2	A1 alttaşı üzerindeki fotodedektörlerin karanlık akım ölçüm sonuçları.....	62
Çizelge 5-3	A3 ve A1 alttaşlarının tüm dedektörler üzerinden ortalama karanlık akım ve birim alan başına karanlık akım yoğunlukları.....	62

## ŞEKİLLER

Şekil 2-1	Silisyum tabanlı P-I-N yapılı bir fotodedektörün genel yapısı.....	4
Şekil 2-2	P-N eklem yapısı.....	4
Şekil 2-3	Ters besleme uygulanmış P-N eklem yapısı.....	5
Şekil 2-4	Ters besleme uygulanmış P-N eklem yapısı, yük dağılımları ve elektrik alan dağılımı.....	6
Şekil 2-5	Silisyum tabanlı fotodetektör ile ideal bir dedektörün spektral duyarlılık eğrileri [6].....	8
Şekil 2-6	RCA temizlik akış şeması.....	10
Şekil 2-7	Termal SiO <sub>2</sub> oluşma yapısı.....	11
Şekil 2-8	Negatif ve pozitif litografi çeşitlerinin şematik gösterimi.....	13
Şekil 2-9	Plazma destekli reaktif iyon aşındırma sisteminin şematik gösterimi [13].....	14
Şekil 2-10	İzotropik ve İzotropik olmayan ıslak aşındırma yapıları.....	14
Şekil 2-11	Katkılama işlemi yapılmış Silisyum alttaş kesit görseli.....	15
Şekil 2-12	Silisyum içerisine P tipi ve N tipi katkılama bağ yapıları.....	16
Şekil 2-13	Katı kaynak yüksek sıcaklık difüzyon sistemi şematığı.....	17
Şekil 2-14	Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme sistem şematığı [20].....	18
Şekil 2-15	Elektron demeti ile buharlaştırma tekniğinin şematik gösterimi [22].....	19
Şekil 2-16	Omik ve Schottky kontak dirençleri I-V eğrisi [25].....	20
Şekil 2-17	Örnek bir prob istasyonu görüntüsü [28].....	21

Şekil 2-18	Dalganın girişi şematik gösterim [30].....	22
Şekil 2-19	Kontak tipi profilometrenin şematik gösterimi [32].....	23
Şekil 2-20	Elektrokimyasal Kapasitans-Gerilim ölçüm cihazı şematik gösterimi [33].....	24
Şekil 3-1	Safsızlık profili, arka plan konsantrasyonu ve kesişim derinliği ilişkisi [36].....	26
Şekil 3-2	N tipi fosfor katkılı difüzyon derinliğinin 1 µm, 5 µm ve 10 µm derinlikler için dalga boyuna bağlı fotoakım grafiği.....	27
Şekil 3-3	P tipi fosfor katkılı difüzyon derinliğinin 1-10 arası µm derinlikler için spektral dalga boyuna bağlı fotoakım grafiği.....	28
Şekil 3-4	Difüzyon sıcaklığına bağlı olarak derinlik-konsantrasyon eğrisi.....	29
Şekil 3-5	Difüzyon süresine bağlı olarak derinlik-konsantrasyon eğrisi.....	30
Şekil 4-1	Silisyum tabanlı P-I-N fotodedektör temel mikrofabrikasyon adımları.....	32
Şekil 4-2	Fotolitografi proseslerinde kullanılan a) katkılama b) yansıma önleyici tabaka c) metalizasyon fotomaskeleri.....	33
Şekil 4-3	RCA temizlik proses görüntüsü.....	34
Şekil 4-4	Oksidasyon işlemi sonrası aygıtların kesit görüntüsü.....	35
Şekil 4-5	Islak termal oksitleme sisteminde bulunan a) yüksek sıcaklık fırını b) bubbler c) ısıtıcı d) sıcaklık probu e) gaz hattı.....	35
Şekil 4-6	FILMETRICS cihazında termal SiO <sub>2</sub> film kalınlığı ölçümü.....	36
Şekil 4-7	Arındırma tekniği ile gerçekleştirilen kuru termal oksidasyonun sıcaklık-zaman grafiği.....	37
Şekil 4-8	a) Arka yüzey SiO <sub>2</sub> aşındırma işlemi öncesi alttaşın örnek tutucuya yerleştirilmesi b) kapağın vidalanması sonrası görüntüsü.....	38

Şekil 4-9	Arka yüzey SiO <sub>2</sub> aşındırma sonrası a) aygıt kesit görüntüsü b) alttaş arka yüzey görüntüsü.....	39
Şekil 4-10	Arka yüzey N tipi katkılama öncesi alttaşların kuvarz kayığa yerleştirilmesi.....	40
Şekil 4-11	Arka yüzey katkılama sonrası oluşan fosfor-cam tabakanın aşındırılması.....	41
Şekil 4-12	Arka yüzey katkılama ve fosfor-cam tabaka aşındırılması sonrası aygıtın kesit görüntüsü.....	41
Şekil 4-13	Arka yüzey PECVD SiO <sub>2</sub> koruma kaplama a) öncesi b) sonrası.....	42
Şekil 4-14	Ön yüzey şekillendirme fotolitografisi maske tasarım görüntüsü.....	43
Şekil 4-15	a) ön yüzey şekillendirme aşındırma sonrası aygıtın kesit görüntüsü b) alttaşın ICP-RIE cihazı üzerindeki görüntüsü.....	44
Şekil 4-16	a) 3 bölgeli ön yüz bor katkılama fırınının termoelektrik çiftleri b) termal blok c) alttaşların bulunduğu kuvarz kayık.....	45
Şekil 4-17	Ön yüzey katkılama ve bor-cam tabaka aşındırılması sonrası aygıtın kesit görüntüsü.....	46
Şekil 4-18	Yansıma önleyici tabakanın kaplanması sonrası alttaş görüntüsü...	47
Şekil 4-19	a) yansıma önleyici fotomaske tasarımı b) alttaşın pozlama işlemi esnasında cihaz üzerindeki görüntüsü.....	48
Şekil 4-20	a) Aşındırma sonrası aygıt kesit görüntüsü b) aşındırma öncesi optik mikroskop görüntüsü c) aşındırma sonrası optik mikroskop görüntüsü.....	49
Şekil 4-21	a) metalizasyon fotomaske tasarımı b) alttaşlarda bulunan bir aygıtın metalizasyon şekillendirme sonrası optik mikroskop görüntüsü.....	50
Şekil 4-22	Metalizasyon sonrası; a) aygıt kesit görüntüsü b) aygıt optik mikroskop görüntüsü.....	51
Şekil 4-23	Alttaşın tavlama işlemi sonrası cihaz üzerindeki görüntüsü.....	52
Şekil 4-24	Alttaşların tavlama işlemindeki zamana bağlı sıcaklık eğrisi.....	53

Şekil 4-25	Fabrikasyon sonrası a) aygıt kesit görüntüsü b) alttaş ön yüzey görüntüsü c) alttaş arka yüzey görüntüsü.....	54
Şekil 5-1	Fotodedektör numaraları.....	55
Şekil 5-2	Alttaşın ECV ölçüm cihazı üzerindeki görüntüsü.....	56
Şekil 5-3	A1 ve A2 alttaşlarının derinliğe bağlı bor konsantrasyon eğrileri.....	57
Şekil 5-4	A2 aygıtının derinliğe bağlı fosfor konsantrasyon eğrisi.....	58
Şekil 5-5	Alttaşın prob istasyonu üzerinde I-V ve karanlık akım ölçülürken görüntüsü.....	59
Şekil 5-6	A3 alttaşı 6. fotodedektör 0 – (-100) V I-V eğrisi.....	60
Şekil 5-7	A1 alttaşı 6. fotodedektör 0 – (-100) V I-V eğrisi.....	60
Şekil 5-8	Fotodedektörlerin duyarlılık ölçümü esnasında ölçüm sistemi üzerindeki görüntüsü.....	63
Şekil 5-9	Duyarlılık ölçüm sisteminde bulunan monokromatör, ışık kaynağı ve program görüntüsü.....	64
Şekil 5-10	Duyarlılık ölçüm sistem şematiği.....	65
Şekil 5-11	Duyarlılık ölçümü kalibrasyon örneği görüntüsü.....	65
Şekil 5-12	A1 ve A2 alttaşlarında bulunan 6. aygıtların dalga boyuna bağlı duyarlılık eğrileri.....	66

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$h\nu$	Foton enerjisi
$E_g$	Yasak bant enerjisi
$h^+$	Hol
$e^-$	Elektron
$E$	Elektrik alan
$V_r$	Ters besleme
$I_{ph}$	Fotoakım
$W$	Tüketim bölgesi
$p(x)$	Yük yoğunluğu
$eN_a$	Akseptör taşıyıcı konsantrasyonu
$eN_d$	Donör taşıyıcı konsantrasyonu
$R$	Duyarlılık
$i_{n-d}$	Karanlık atış gürültü akımı
$i_d$	Karanlık akım
$i_{n-q}$	Kuantum gürültü akımı
$i_n$	Atış gürültü akımı
$B$	Frekans bantgeniřliđi
$D$	Difüzivite
$D_0$	Difüzyon sabiti
$E_a$	Aktivasyon enerjisi
$C$	Katkı konsantrasyonu
$k$	Boltzman sabiti
$F$	Difüzyon akısı

## Kısaltmalar

Si	Silisyum
SiO <sub>2</sub>	Silisyum dioksit
nm	Nanometre
µm	Mikrometre
NH <sub>4</sub> OH	Amonyum hidroksit
HCl	Hidroklorik asit
DIS	Deiyonize su
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Hidrojen peroksit
UV	Ultraviyole
RF	Radio frekans
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Silisyum nitrür
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alüminyum oksit
TiO <sub>2</sub>	Titanyum dioksit
PECVD	Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme
CVD	Kimyasal buhar biriktirme
PVD	Fiziksel buhar biriktirme
RTP	Hızlı termal proses
ECV	Elektro kimyasal kapasitans-gerilim
mm	Milimetre
SiH <sub>4</sub>	Silan
N <sub>2</sub> O	Nitrür oksit
NaOH	Sodyum hidroksit
IPA	İzopropil alkol
Ti	Titanyum
Al	Alüminyum
V <sub>b</sub>	Kırılma gerilimi
Xe	Ksenon
SMU	Kaynak ölçüm birimi



# 1. GİRİŞ

Silisyum tabanlı fotodedektörler elektromanyetik spektrumda; mor ötesi, görünür ışık ve kızılötesi dalgaboylarını algılayan ve bu sinyalleri elektrik akımına dönüştüren aygıtlar olarak bilinir. Yüksek hızda çalışmaları, görece küçük boyutlara sahip olmaları, düşük gürültülü ve yüksek duyarlılıkta performans göstermeleri sebebiyle hem askeri hem de sivil uygulamalarda, oldukça geniş çapta uzun yıllardır kullanılmakta ve güncelliğini korumaktadır [1].

Bu dedektörlerin kullanım amacına göre farklı tipleri olmasının yanı sıra üretim işlemleri için de çok farklı bilimsel yöntem bulunmaktadır. Günümüzde gelişen teknolojik uygulamalar ile, bu uygulamalar ile entegre şekilde kullanılan Silisyum tabanlı fotodedektörler de çalışma performansı açısından gelişime ihtiyaç duymaktadır.

Yürütülen tez çalışmasında, Silisyum alttaşlar ile baştan sona P-I-N yapılı fotodedektörler üretilerek, dedektör üretimi için gerçekleştirilen katkılama ve oksidasyon proseslerinde kullanılan yüksek sıcaklık (800 °C -1150 °C) etkisinin dedektör performansına olan etkileri incelenmiştir. Tüm yüksek sıcaklık prosesleri için 1200 °C sıcaklığa çıkabilen programlanabilir yüksek sıcaklık fırınları kullanılmıştır. Tez çalışması sonunda, katkılama işlemlerindeki sıcaklık etkisi ile fotodedektör tepkiselliğinin artırılması, oksidasyon işlemi ile birlikte de fotodedektör gürültüsünün azaltılarak daha yüksek verimle çalışan aygıtlar üretilmesi planlanmaktadır.

Tezin 2. bölümünde Silisyum tabanlı fotodedektörlerin çeşitleri, aygıt yapısı, performansını tanımlayan parametreler, üretim ve karakterizasyon yöntemlerinden bahsedilmiştir.

3. bölümde fotodedektör üretimi öncesi, yöntemlerin belirlenmesi amacı ile gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları aktarılmıştır.

4. bölümde ise Silisyum tabanlı fotodedektörler için temizlik aşamasından metalizasyon aşamasına kadar gerçekleştirilen tüm bir mikrofabrikasyon detayları verilmiştir.

5. bölümde üretilen fotodetektörlerin, tez amacı kapsamında elektriksel ölçüm ve karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir, sonrasında literatür bilgilerine dayanarak yorumlanmıştır.

6. ve son bölümde ise tez çalışma sonuçları aktarılmıştır.

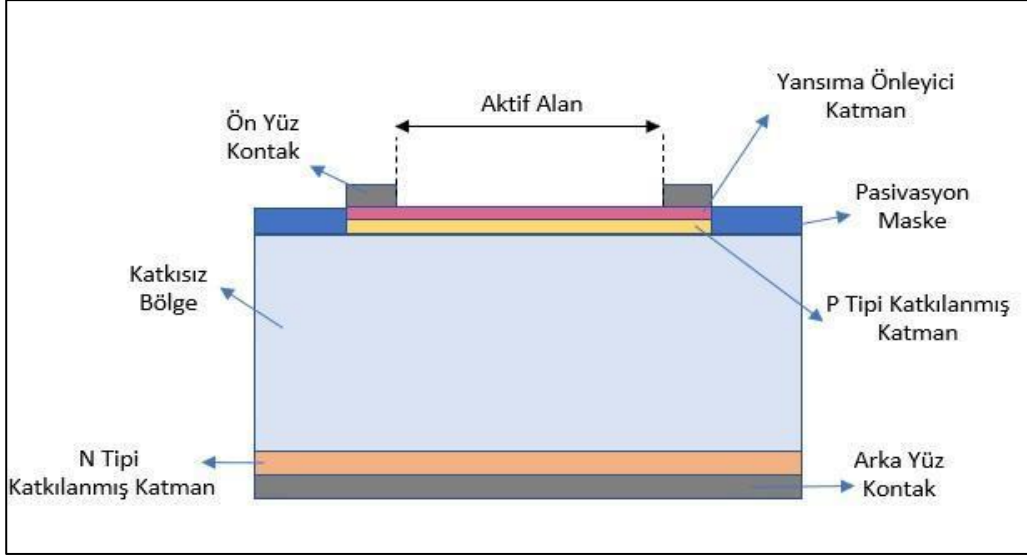
## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1 Silisyum Tabanlı Fotodedektörler

P-N yapılı, P-I-N yapılı ve çağlayan fotodedektörler temel fotodedektör çeşitleridir. Günümüz koşullarında pek tercih edilmese de P-N yapılı fotodedektörler geliştirilen ilk fotodedektör tipleridir ve fotodiyot olarak da adlandırılır. P-I-N yapılı fotodedektörler ise P-N yapılı fotodedektörlerin performansını arttırmak için geliştirilmiş ve günümüzde hala kullanılmaktadır. Aradaki fark birleşik P-N eklem yapısının aksine arada katkısız bir bölge bırakılmasıdır [2]. P-I-N fotodedektörlerde gelen bir foton, bir elektron-hol çifti oluştururken, çağlayan fotodedektörlerde oluşan elektron-hol çiftleri de yüksek gerilim ile hızlandırılarak iyonize etki ile alttaşı içerisinde katlanarak artan sayıda elektron-hol çifti oluşur [3].

#### 2.1.1 Silisyum Tabanlı P-I-N Fotodedektörlerin Yapısı

Standart bir P-I-N fotodiyotun yapısı şekil 2.1'de gösterilmektedir. Yapıyı oluşturan en önemli noktalarından biri, gelen ışığın maksimum şekilde aktif alana ulaşması ve yapının içerisine girmesinin sağlanmasıdır. Bu nedenle yeterli ışığın içeride toplanması için ince olan N tipi ve P tipi katmana göre oldukça kalın bir katkısız ya da çok az katkılı bir tabaka tercih edilmelidir. Oluşan elektron ve holleri toplayacak ve aygıtı besleyecek ön yüz metal kontaklar aktif bölgeyi kapatmayacak şekilde aygıt kenarlarına yerleştirilmeli, gelen ışığın yansımalarını engellemek için ise yansıma önleyici bir tabaka aktif alan üzerinde oluşturulmalıdır. Ayrıca P tipi katkılama işlemi yapılırken yüzeyi maskeleyecek  $\text{SiO}_2$  pasivasyon maskesi de aygıt ön yüzeyinde kenarda yer almaktadır [4].



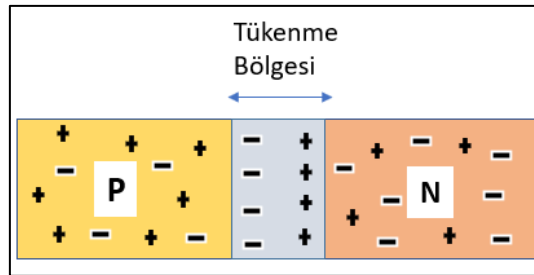
Şekil 2-1 Silisyum tabanlı P-I-N yapı bir fotodedektörün genel yapısı.

## 2.1.2 Silisyum Tabanlı P-I-N Fotodedektörlerin Çalışma Prensipleri

Silisyum tabanlı P-I-N fotodedektörler temelde bir P-N eklem yapısıdır. Ayrıştırılabilir daha verimli çalışması için iki eklem arasında kalın bir katkısız tabaka yerleştirilerek P-I-N yapısı oluşturulur. Bu sebeple, Silisyum tabanlı P-I-N yapı bir fotodedektörün çalışma prensibi ilk olarak P-N eklem yapısı ve sonrasında P-I-N yapı fotodedektörlerin çalışma prensibi şeklinde iki alt başlıkta incelenecektir.

### 2.1.2.1 P-N Eklem Yapısı

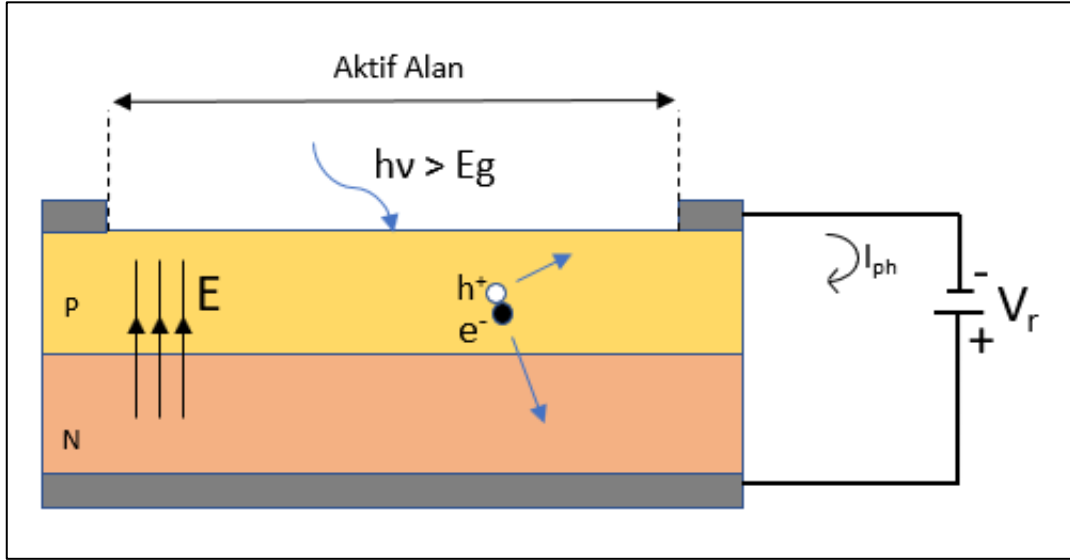
P-N eklem yapısı, tek bir yarı iletken kristal içerisinde bir tarafı N tipi diğer tarafı P tipi iki yarıiletken çeşidinin bir sınır ile yer aldığı yapılardır. Eklem yapısı Şekil 2.2'de gösterilmiştir. P tipi yarı iletkenler, içerisinde pozitif yüklü hollerin sayısının, negatif yüklü elektronların sayısından çok olduğu; N tipi yarıiletkenler ise içerisindeki negatif yüklü elektronların sayısının pozitif yüklü hollerin sayısından fazla olduğu yarıiletken tipleri olarak adlandırılır. İki tip yarı iletken tabakanın kesişiminde, serbest olmayan donör ve akseptör yüklerin bulunduğu kesişim bölgesine tükenme bölgesi denir [5].



Şekil 2-2 P-N eklem yapısı.

N tipi yarı iletkenler içerisindeki iletkenlik bandına katkıda bulunan atomlara donör (verici) denir. P tipi yarıiletken içerisindeki değerlik bandına katkıda bulunan atomlara ise akseptör (alıcı) denir.

Şekil 2.3'te görüldüğü üzere, yapının aktif alan bölgesine enerjisi, malzemenin yasak bant enerjisinden daha büyük bir foton düşürüldüğünde bu malzeme içerisinde bir elektron-hol çifti oluşur. Eğer bu P-N uçları, P tarafı negatif N tarafı pozitif olacak şekilde beslenirse (ters besleme) oluşan hol P tarafına, elektron ise N tarafının uç noktalarına sürüklenmeye başlar. Uygulanan gerilimden farklı olarak bu sürüklenmeden dolayı oluşan akıma fotoakım denir. Bu akımın büyüklüğü oluşan elektron-hol sayısına ve taşıyıcıların sürüklenme hızlarına bağlıdır [6].

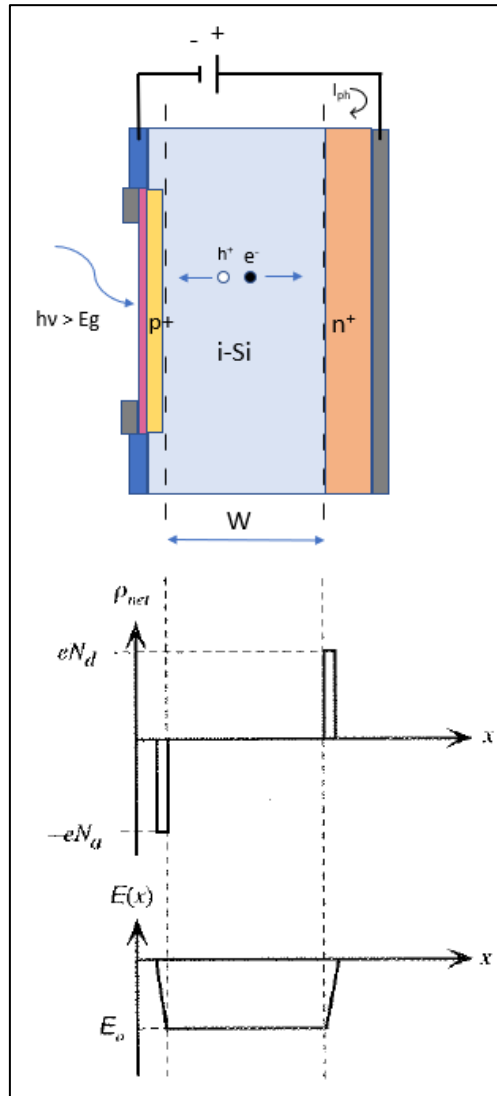


Şekil 2-3 Ters besleme uygulanmış P-N eklem yapısı.

P-N eklem yapısının üzerine gelen her foton, fotoakıma katkıda bulunacak elektron-hol çifti oluşturamaz. Oluşan bazı hol ve elektronlar eklem uç noktalarına ulaşmadan kristal kusurları tarafından tuzaklanır ya da yeniden birleşme denilen fiziksel olay meydana gelir. Yeniden birleşme olayında bir elektron enerjisini kaybederek değerlik bandına döner ve kararlı hale gelir. Değerlik bandına dönen elektron bir hol açığını kapatır ve yeniden birleşme oluşur. Yeniden birleşme olayında kaybolan bu enerji ısı, radyasyon ya da enerjinin başka bir elektrona aktarılması ile gerçekleşebilir [7].

### 2.1.2.2 P-I-N fotodedektörlerin çalışma prensibi

P-N eklem yapısı temel olarak küçük bir tüketim bölgesine sahip olduğu için yüksek kapasitans değerlerine sahiptir. Ayrıca yüksek dalga boylarının aygıt içerisine nüfuz etmemesi sebebiyle de oldukça verimsiz kalmaktadır. Malzeme yüzeylerinde oluşturulacak P ve N eklem kalınlıkları incelterek ya da daha kalın alttaşlar seçilerek P-N bölgelerinin arasında, katkısız ya da çok seyrek katkılı görece daha büyük bir bölge oluşturulur bu sorunların önüne geçilir. Şekil 2.4 'de görüleceği üzere aktif bölgeye ulaşan fotonlar, elektron-hol çifti yaratarak fotoakım meydana getirir. Yine bu şekilde ters beslenmiş P-N eklem yapısı, net uzay yüklerinin dağılımı ve elektrik alan dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 2-4 Ters besleme uygulanmış P-N eklem yapısı, yük dağılımları ve elektrik alan dağılımı.

Yarıiletken bir malzemenin üzerine gelen fotonu soğurabilmesi için bir dalgaboyu eşik değeri bulunur. Temeli, Planck'ın enerji-dalgaboyu ilişkisi olan bu formül Denklem 2.1'de verilmiştir.

$$\lambda_g(\mu m) = \frac{1.24}{E_g} \quad (2.1)$$

Denklemden Silisyum için yasak enerji aralığı 1.12 eV yerine yazıldığında  $\lambda_g=1.1 \mu m$  değeri hesaplanır. Yani Silisyum tabanlı bir dedektörün algılayabildiği maksimum dalga boyu 1100 nm'dir [6].

## 2.2 Silisyum Tabanlı Fotodedektörlerin Performansını Tanımlamakta Kullanılan Temel Nicelikler

Aygıt yapı çeşidinden bağımsız olarak Silisyum tabanlı fotodedektörlerin performansını değerlendirmekte kullanılan dört çeşit fiziksel kavram vardır. Bu bölümde, elektriksel ve optik yöntemler içeren bu karakterizasyon parametreleri anlatılmaktadır.

### 2.2.1 Kuantum Verimliliği

Bir fotodedektör, gelen tüm fotonları soğurarak onları elektron-hol çiftine çeviremez. Bu nedenle dedektörün performansını tanımlamada kullanılan en önemli kavram dedektörün kuantum verimliliğidir. Bu kavram gelen fotonların ne kadarının elektron-hol çifti oluşturduğunun yüzde cinsinden verimini tanımlar.

$$\eta = \frac{\text{üretilen ve toplanan elektron-hol çifti sayısı}}{\text{gelen foton sayısı}} \quad (2.2)$$

$I_{ph}$  fotoakım,  $P_0$  gelen ışığın optik gücü,  $e$  elektronun yükü ve  $h\nu$  gelen foton enerjisi olmak üzere kuantum verimliliği denklem 2.3'teki gibi ifade edilir [8].

$$\eta = \frac{I_{ph}/e}{P_0/h\nu} \quad (2.3)$$

### 2.2.2 Duyarlılık

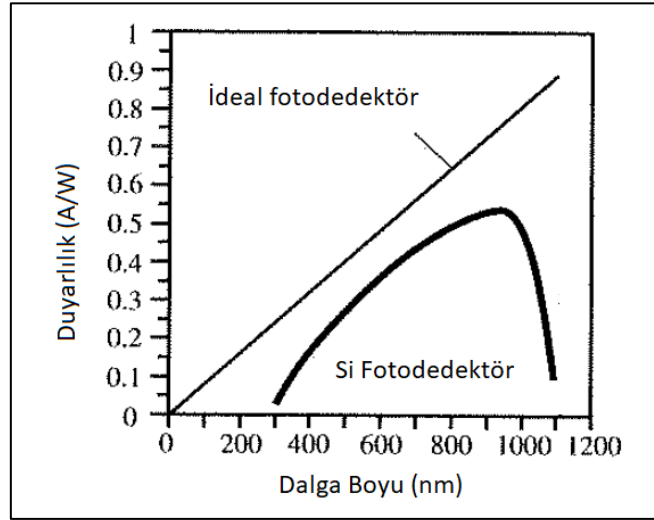
Duyarlılık, belirli dalga boyunda dedektöre gelen birim optik güç başına üretilen fotoakım miktarıdır. Denklem 2.4'te duyarlılık formülü yer almaktadır.

$$R = \frac{I_{ph} (A)}{P_0 (W)} \quad (2.4)$$

2.3 ve 2.4 bağıntıları birleştirildiğinde duyarlılık, kuantum verimliliği cinsinden denklem 2.5'teki gibi de yazılabilir.

$$R = \eta \frac{e}{h\nu} \quad (2.5)$$

Duyarlılık, gelen fotonun dalga boyuna önemli ölçüde bağlı olması sebebiyle genellikle spektral duyarlılık diye adlandırılır. Şekil 2.5'te ideal bir fotodedektör (%100 kuantum verimliliğine sahip) ve Silisyum bir fotodedektörün, dalga boyuna bağlı spektral duyarlılık grafiği gösterilmiştir.



Şekil 2-5 Silisyum tabanlı fotodedektör ile ideal bir dedektörün spektral duyarlılık eğrileri [6].

### 2.2.3 Tepki Süresi

Silisyum fotodedektörlerde tepki süresini, oluşan elektron-hol yüklerinin tüketim bölgesindeki sürüklenme hızları belirler. Daha önce de bahsedildiği gibi tüketim bölgesinin genişliğini arttırmak kuantum verimliliğini artırır fakat bu kez de taşıyıcıların sürüklenme süreleri uzayacağı için tepki süreleri artar. Denklem 2.6'da taşıyıcıların sürüklenme sürelerini veren bağıntı gösterilmiştir [6].

$$t_d = \frac{W}{v_d} \quad (2.6)$$

### 2.2.4 Gürültü

Elektromanyetik dalgalardan tamamen izole (örneğin: Faraday kafesi) bir ortamda bile dedektörler üzerinde çok düşük miktarda karanlık akım ( $i_d$ ) denilen kaçak akımlar mevcuttur. Bunlar genellikle elektron-hol çiftlerinin termal üretiminden, dedektör yüzeyinde ya da içerisinde bulunan safsızlıklardan veya tuzaklardan



meydana gelmektedir. Denklem 2.7'de gösterildiği üzere, karanlık akımın salınıminin karekökü ile "karanlık atış gürültü akımı ( $i_{n-d}$ )" denilen gürültü akım çeşidi oluşmaktadır. Denklemde B frekans bantgenişliğidir [6].

$$i_{n-d} = (2ei_d B)^{1/2} \quad (2.7)$$

Bir başka gürültü kaynağı ise kuantum gürültüsüdür. Bu gürültü çeşidi, fotonun doğası gereği, istatistiksel olarak rasgele salınımindan kaynaklanır. Denklem 2.8'de kuantum gürültü akımının ( $i_{n-q}$ ) bağıntısı verilmiştir.

$$i_{n-q} = (2ei_{ph} B)^{1/2} \quad (2.8)$$

Her iki gürültü de rasgele salınımlar olduğu için toplam atış gürültüsü hesaplanırken denklem 2.9'da olduğu gibi ortalama karekökleri alınır.

$$i_n^2 = i_{n-d}^2 + i_{n-q}^2 \quad (2.9)$$

Toplam atış gürültüsü için denklem 2.7 ve 2.8, 2.9'da yerine yazıldığında, 2.10'da verilen fotoakım ve karanlık akım kaynaklı toplam gürültü akımı bağıntısı elde edilir.

$$i_n = [2eB(i_{ph} + i_d)]^{1/2} \quad (2.10)$$

## 2.3 Silisyum Tabanlı Fotodedektör Üretiminde Kullanılan Mikrofabrikasyon Teknikleri

Silisyum tabanlı fotodedektör üretiminde; dedektör çeşidi, büyüklüğü, kullanım amacı gibi faktörlere göre tercih edilecek teknikler farklılık gösterebilir. Bu bölümde P-I-N yapıları bir Silisyum fotodedektör üretmek için kullanılan 8 temel üretim basamağı detaylandırılmaktadır.

### 2.3.1 Alttaş Temizliği

Yarıiletken Silisyum fotodedektör üretiminde kirlilik (safsızlıklar) ne kadar fazla ise dedektör performansına o kadar fazla olumsuz etki yapar. Bu nedenle alttaşların üretime başlamadan önce iyi şekilde temizlenmesi önemli bir adımdır.

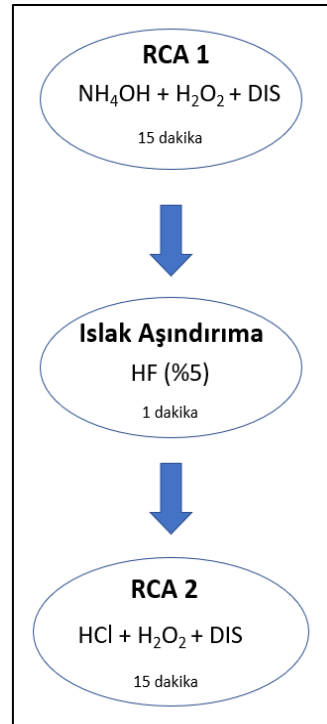
RCA temizliği, 1960'ların sonunda Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan RCA laboratuvarlarında Silisyum temizliği için geliştirilmiş bir işlemdir. 1 ve 2 olmak üzere

iki tip adımdan oluşmaktadır. Bunlardan ilki organik moleküllerin temizlendiği RCA1, ikincisi ise inorganik temizlik sağlayan RCA2 adımlarıdır.

RCA1; Amonyum Hidroksit ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), Hidrojen Peroksit ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ve Deiyonize Su'yun (DIS) 1:1:5 oranlarında karıştırılması ile elde edilir.

RCA2 ise; Hidroklorik asit (HCl), Hidrojen Peroksit ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ve Deiyonize Su'yun (DIS) 1:1:5 oranlarında karıştırılması ile elde edilir.

Her iki çözelti de hazırlanarak yaklaşık  $80^\circ\text{C}$  sıcaklıkta aktif edilir ve alıtışlar önce RCA1 sonra RCA2 çözeltisine sırayla konularak 15'er dakika içerisinde tutulur. RCA 1 sonrasında yüzeyde çok ince bir oksit tabakası oluşacağı için RCA1-RCA2 adımlarının arasında bu oksit tabakasını yüzeyden kaldıracak bir aşındırma işlemi konulmaktadır. DIS ile seyreltilmiş %5'lik HF (hidroflorik asit) çözeltisi bu işlem için uygundur. Alıtış bu çözelti içerisinde 1 dakika kadar tutulduğunda üzerindeki oksit tabakası aşınır. Oksit tabakasının tamamen aşındırıldığından emin olmak için alıtış su altına tutmak iyi bir yöntemdir çünkü Silisyum alıtışlar üzerinde herhangi bir tabaka yok ise hidrofobobiktir (suyu sevmeyen) [9]. Tüm bu adımlar Şekil 2-6'da akış şeması şeklinde gösterilmiştir.

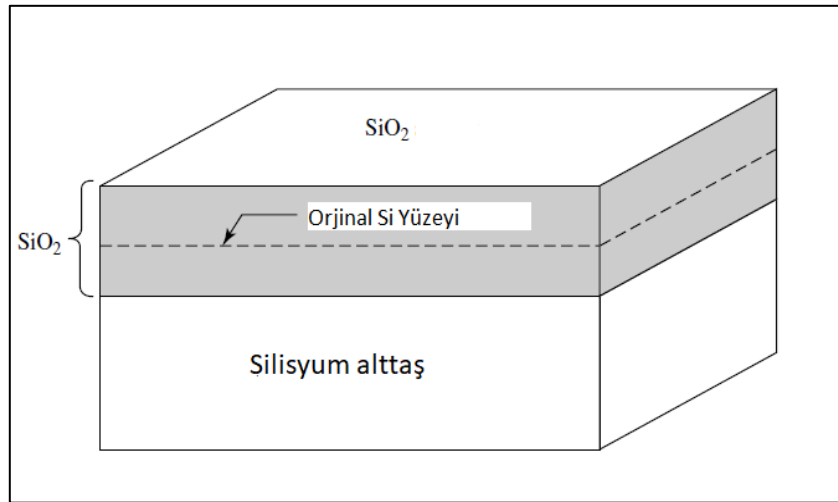


Şekil 2-6 RCA temizlik akış şeması.

### 2.3.2 Termal Oksidasyon

Pasivasyon tabakası, Silisyum fotodedektörlerde katkılama, aşındırma gibi mikrofabrikasyon adımlarında maske olarak kullanılmasının yanında, yarıiletken üzerine oluşturulduğu için alttaş yüzeyinde bulunan bağ kusurlarını da iyileştirmektedir. Pasivasyon tabakası olarak kullanılan oksitleri büyütme için plazma destekli kimyasal buhar biriktirme sistemleri, elektrokimyasal anodize işlemi ya da termal oksitleme yöntemleri kullanılmaktadır. Literatür çalışmalarında, hem alttaştan yiyerek büyüdüğü için kusurları kapatması hem de içerdiği safsızlık oranı diğer oksidasyon çeşitlerine göre daha düşük olması sebebiyle en kaliteli oksit çeşidi olarak termal oksidasyon olarak gösterilmektedir.

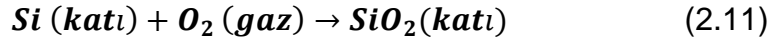
Termal oksidasyon işlemi genelde 1200°C'ye çıkabilen yüksek sıcaklık fırınlarında, 900-1200 °C arasında gerçekleştirilir. Diğer oksidasyon çeşitlerine baktığımızda alttaşın yüzeyinin hemen üstünde oluşmaya başladığı görülürken, termal oksidasyon yöntemi ile büyütülen SiO<sub>2</sub>, şekil 2.7'de de görüleceği üzere alttaştaki Silisyum 'dan yiyerek büyür. Oluşan SiO<sub>2</sub> tabakasının kalınlığının %44'ü Silisyum alttaştan alınır [10].



Şekil 2-7 Termal SiO<sub>2</sub> oluşma yapısı.

#### 2.3.2.1 Kuru Oksidasyon

Kuru termal oksidasyon, yüksek sıcaklık fırınında bir kuvarz tüpe yerleştirilen alttaş üzerine oksijen gazı gönderilmesi ile büyütülen termal oksidasyon yöntemidir. Denklem 2.11'de kuru yöntem ile SiO<sub>2</sub> oluşturulma bağıntısı verilmiştir.



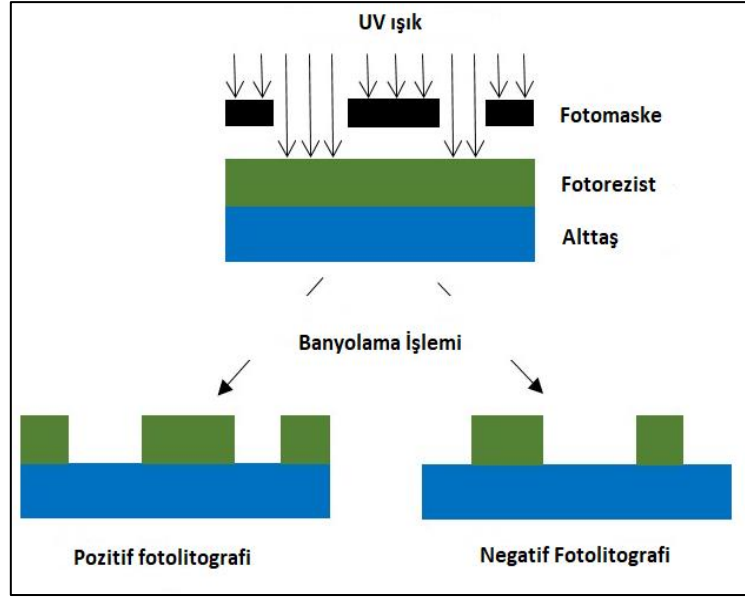
### 2.3.2.2 Islak Oksidasyon

Islak termal oksidasyon, yüksek sıcaklık fırınında bir kuvarz tüpe yerleştirilen alttaş üzerine su buharı gönderilmesiyle büyütülür. Kuru oksidasyon işlemine göre oksit büyüme hızı çok daha fazladır. Denklem 2.12 'de ıslak yöntem ile SiO<sub>2</sub> oluşturulma bağıntısı verilmiştir.



### 2.3.3 Fotolitografi

Yarıiletken aygıt mikrofabrikasyonunda, malzemeler üzerine istenilen geometrik şekilleri elde etmek için kullanılan yöntemdir. Fotorezist denilen ışığa duyarlı özel kimyasallar malzeme üzere serilir daha sonra vermek istenilen şekle ait bir maske, alttaş üzerine yerleştirilerek fotolitografi cihazları yardımıyla üzerine UV(ultraviyole) ışık düşürülür. İki çeşit fotolitografi yöntemi vardır. Şekil 2-8'de de görüleceği üzere birincisi olan pozitif fotolitografide üzerine ışık düşen bölgeler kaldırılarak şekillendirme yapılır, negatif fotolitografide ise tam tersi olarak ışık düşmeyen bölgeler kaldırılır. Bu farkı sağlayan nicelik kullanılan fotorezist çeşididir. Fotorezist serildikten ve uv ışık düşürüldükten sonra develop da denilen banyolama işlemi yapılır. Bu işlemin ardından çözünmeye hazır hale gelmiş pozitif ya da negatif fotorezist, aygıt üzerinden uzaklaştırılarak desenleme işlemi tamamlanmış olur. Fotolitografi işlemi, ince film kaplama, aşındırma ve katkılama gibi işlemlerden önce gerçekleştirilerek alttaş üzerinde sadece istenilen bölgelerin bu işlemlere maruz kalması sağlanır [11].



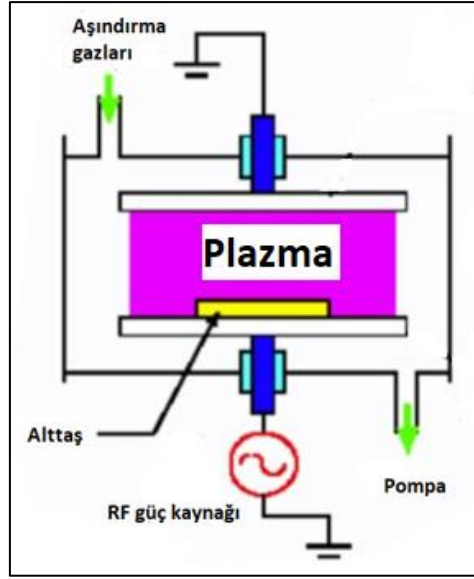
Şekil 2-8 Negatif ve pozitif litografi çeşitlerinin şematik gösterimi.

### 2.3.4 Aşındırma

Alttaş yüzeyinden katmanları fiziksel veya kimyasal olarak kaldırma yöntemidir. Silisyum fotodedektör fabrikasyonunun en önemli adımlarından biridir. Sadece alttaşın kendisi değil, ihtiyaç olursa üzerindeki ince filmler de aşındırılabilir. Kuru ve ıslak aşındırma olmak üzere iki temel metodu bulunur.

#### 2.3.4.1 Kuru Aşındırma

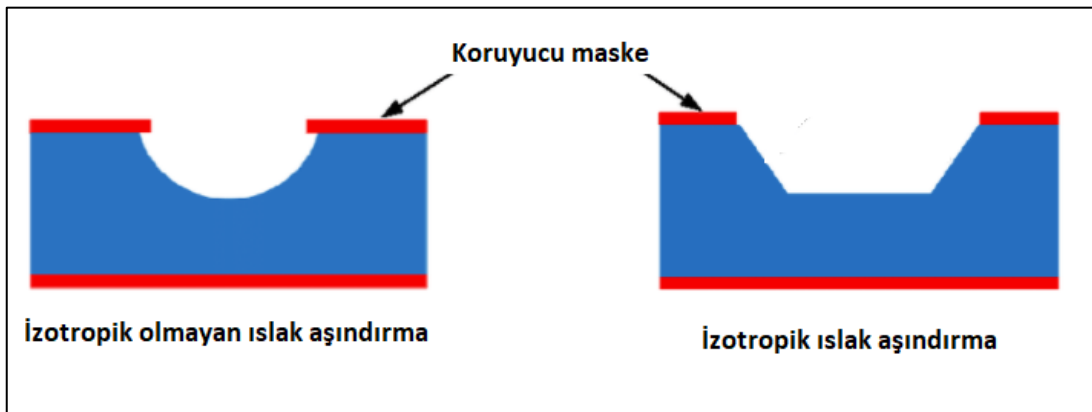
Reaktif iyon aşındırma yöntemini kullanan cihazlar ile gerçekleştirilir. Vakum ortamında kazana gönderilen gazlar RF (radyo frekans) sinyalleri ile iyonlaştırılır ve bu iyonlar hedef alttaş üzerine gönderilerek fiziksel ve kimyasal olarak aşındırma işlemi sağlanır. Kuru aşındırma, hedef alttaş seçiliği, aşındırma hızının daha kontrollü ve istenilen profilde olması gibi etkenler göz önüne alındığında ıslak aşındırmaya göre daha başarılı bir aşındırma yöntemidir. Şekil 2-9'da plazma destekli reaktif iyon aşındırma sisteminin çalışma prensibi gösterilmiştir [12].



Şekil 2-9 Plazma destekli reaktif iyon aşındırma sisteminin şematik gösterimi [13].

### 2.3.4.2 Islak Aşındırma

Silisyum altaşların ıslak aşındırma işlemleri izotropik ve izotropik olmayan şeklinde iki yöntem ile gerçekleştirilir. İzotropik aşındırma HF (hidroforik asit) asit çözeltileri ile sağlanırken izotropik olmayan aşındırma işlemleri KOH (potasyum hidroksit) kimyasalı ile gerçekleştirilir. Şekil 2-10'da iki ıslak aşındırma yönteminin de profili gösterilmiştir. Islak aşındırma, kuru aşındırmaya göre daha az maliyetli daha hızlı bir teknik olmasına rağmen işlem güvenliği daha düşüktür [14].

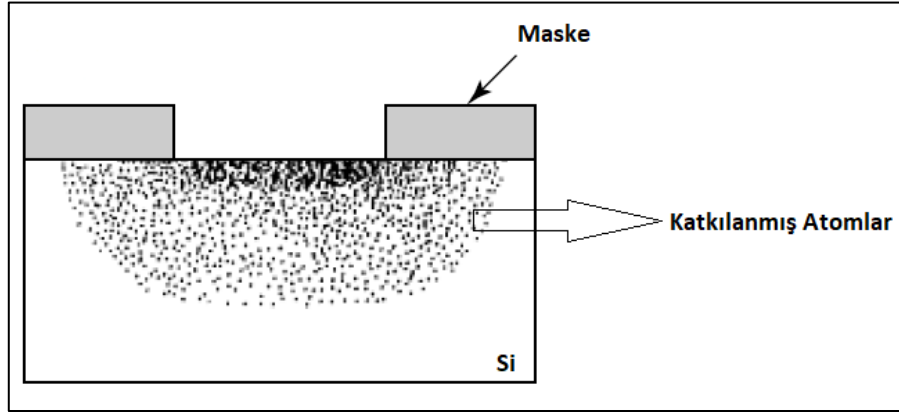


Şekil 2-10 İzotropik ve İzotropik olmayan ıslak aşındırma yapıları.

Islak aşındırma işlemleri sadece Silisyum alttaşı aşındırmak için değil, alttaşı üzerinde bulunan  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (Silisyum Nitrür) ve bazı metallerin aşındırılması için de gerçekleştirilebilir. Seyreltilmiş HF asidi bu işlemler için uygundur. Silisyum'un kendisini izotropik olarak aşındırmak için HF asidine ek olarak Nitrik asit ve Asetik asit gibi kimyasallar ile belirli oranlarda karıştırılması gerekir [15].

### 2.3.5 Katkılama

Silisyum katkılama prosesleri, termal oksidasyonda olduğu gibi yüksek sıcaklık fırınlarında quartz tüplerin içerisinde ya da iyon implantasyon denen cihazlarda gerçekleştirilen mikrofabrikasyon adımlarıdır. Şekil 2-11'de katkılama işlemi yapılmış bir alttaşı örnek görüntüsü gösterilmiştir.

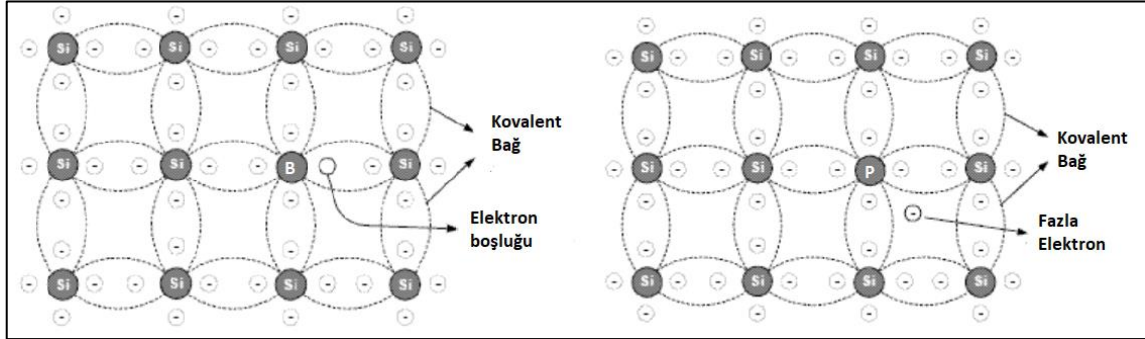


Şekil 2-11 Katkılama işlemi yapılmış Silisyum alttaşı kesit görseli.

P tipi katkılama periyodik cetvelde Bor (B) ve Alüminyum (Al) gibi 3A grubu elementleriyle sağlanır. Dört bağ yapan Silisyum atomunun üç değerlik elektronu bor atomlarının üç değerlik elektronu ile kovalent bağ yaparken Silisyum'un bir elektronu bağ yapamaz ve burada hol denilen boşluk meydana gelir. Bu şekilde katkılanmış Silisyum atomu p tipi katkılı yarı iletken olmuş olur.

N tipi katkılama periyodik cetvelde Fosfor (P) ve Arsenik (As) gibi 5A grubu elementleriyle sağlanır. Dört bağ yapan Silisyum atomunun dört değerlik elektronu da fosfor atomlarının dört değerlik elektronu ile kovalent bağ yaparken fosfor atomunun bir elektronu bağ yapamaz, boşta kalmış olur ve iletkenliğe katkıda bulunur. Bu şekilde katkılanmış Silisyum atomu n tipi katkılı yarı iletken olmuş olur.

Şekil 2-12'de her iki tip yarı iletken için de kovalent bağların oluşma yapısı gösterilmiştir [16].



Şekil 2-12 Silisyum içersine P tipi ve N tipi katkılama bağ yapıları.

Difüzyon da denilen katkılama işlemi, katkı atomlarının yarıiletken kristal örgüsü içerisinde boşluk ya da arayer denilen yapılarda atomik seviyede hareketiyle oluşur. D difüzyon katsayısı, C birim hacim başına katkılayıcı konsantrasyonu olmak üzere F difüzyon akısı (birim zamanda, birim alana geçen katkılayıcı atom sayısı) denklem 2.13 ile ifade edilir. Bu yasa Fick'in ilk yasası olarak bilinir ve kararlı halde difüzyon akısı-konsantrasyon ilişkisini açıklar.

$$F = -D \frac{dC}{dx} \quad (2.13)$$

Konsantrasyonun zaman içerisinde değişme durumunu ise denklem 2.14'te gösterilen Fick'in ikinci yasası açıklar.

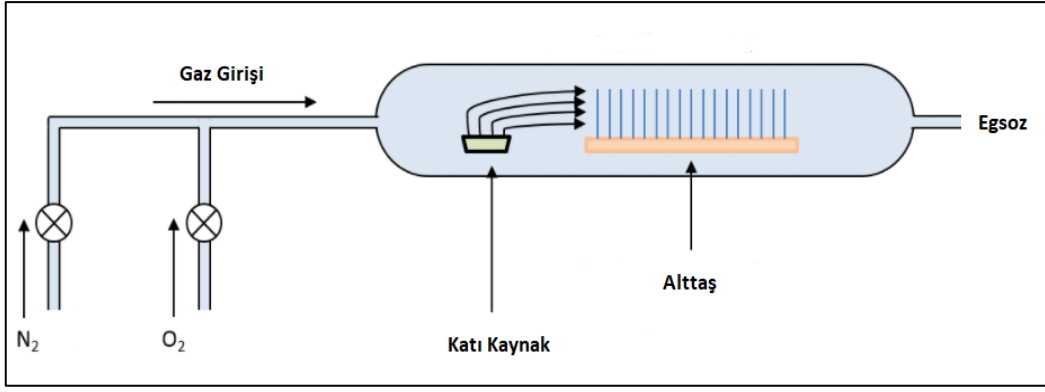
$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dx^2} \quad (2.14)$$

Difüzyon katsayısı, diğer adıyla difüzivite dediğimiz katsayı (D) ise sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Difüzivite;  $D_0$  difüzyon sabiti,  $E_a$  aktivasyon enerjisi, k boltzman sabiti ve T sıcaklık olmak üzere denklem 2.15'te verilmiştir [10].

$$D = D_0 \exp\left\{\frac{-E_a}{kT}\right\} \quad (2.15)$$

Yüksek sıcaklık difüzyon işlemi farklı katkılayıcı kaynaklar ile yapılabilir. Şekil 2-13'te katı kaynak kullanılan bir difüzyon sisteminin şematik gösterimi verilmektedir.



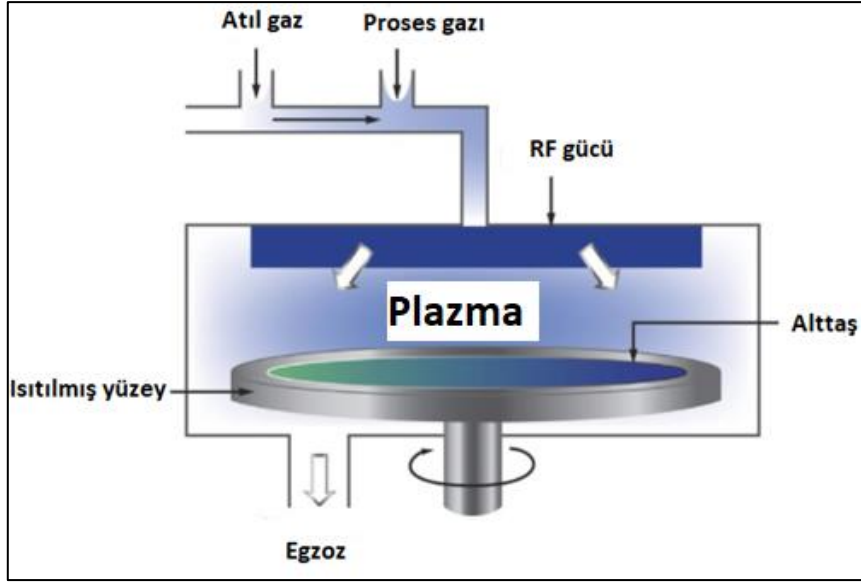


Şekil 2-13 Katı kaynak yüksek sıcaklık difüzyon sistemi şematiği.

### 2.3.6 Yansıma Önleyici Katman Kaplaması

Bölüm 2.2.1'de açıklanan performans parametrelerinden kuantum verimliliği, dedektör üzerine gelen fotonların hangi oranda fotoakıma katkı sağladığını gösterir. Bahsedilen kuantum verimliliğini arttırmak için gelen fotonlar olabildiğince yüksek oranda dedektör içerisinde soğrularak fotoakıma katkı sağlamalıdır ve bu sebeple aygıt üzerine gelen fotonları kaybetmemek büyük önem taşımaktadır. Bu oranın yükseltilmesi için dedektör üzerine bir yansıma önleyici tabaka yerleştirilir.

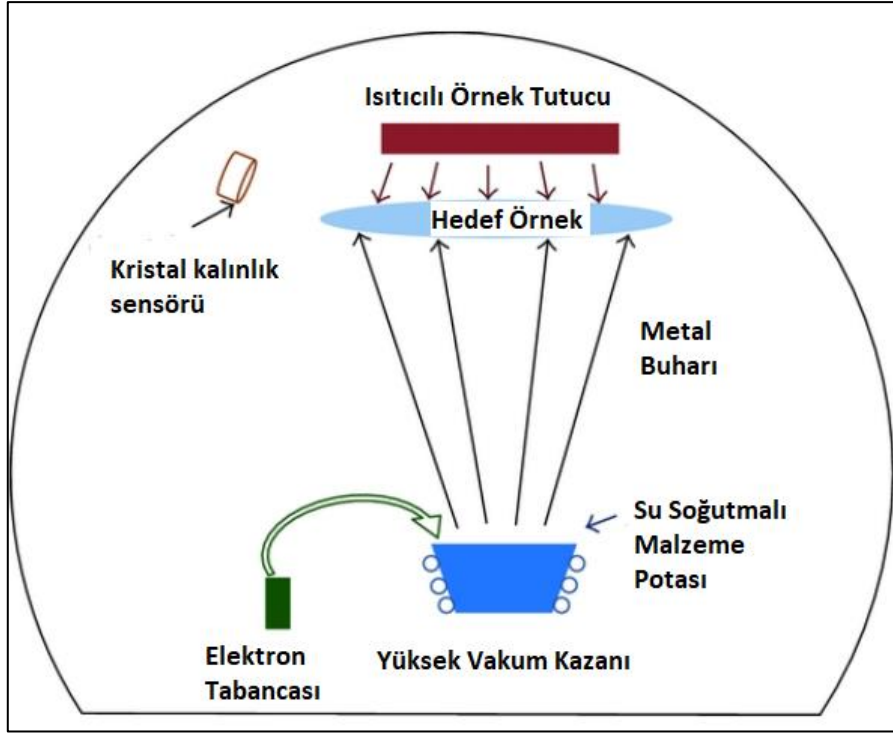
Yansıma önleyici tabakalar için Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [17], Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alüminyum oksit) [18] ve TiO<sub>2</sub> (titanyum dioksit) gibi dielektrik yapıları kullanılmaktadır. Bu yapılar CVD (kimyasal buhar biriktirme) veya PECVD (plazma destekli kimyasal buhar biriktirme) gibi cihazlarda kaplanmaktadır. Bu cihazlar, kaplanacak malzemenin gaz fazında cihaz kazanının içine gönderildiği, daha sonra cihazın çalışma prensibine göre (plazma destekli ya da değil) bu gazların kimyasal reaksiyona girmesi sonucu elektrotlar yardımıyla hedef alttaş üzerinde biriktirildiği sistemlerdir. Şekil 2-14'te bir PECVD cihazının çalışma prensibi şematik olarak gösterilmiştir [19].



Şekil 2-14 Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme sistem şematiği [20].

### 2.3.7 Metalizasyon

Silisyum tabanlı fotodedektör aygıt mikrofabrikasyonunun bir sonraki basamağı, aygıtların ön ve arka yüzeylerine metal kaplama işleminin gerçekleştirilmesidir. Bu mikrofabrikasyon adımı, oluşan elektron-hol çiftlerinin toplanması ve dedektörün beslenmesi için uygulanır. Metalizasyon işlemi, fiziksel buhar biriktirme (PVD) sistemlerinde gerçekleştirilir. Elektron demeti ile buharlaştırıcı cihazlar (e-beam) ve magnetron kopartma sistemleri (Sputter), PVD sistemlerine örnek olarak gösterilebilir [9]. Şekil 2-15'te elektron demeti ile buharlaştırıcı tipte bir fiziksel buhar biriktirme sisteminin şematiği gösterilmiştir. Metalizasyon işlemi, yüksek vakum seviyesindeki bir kazanın içerisinde gerçekleştirilir. Kaplanmak istenen metaller uygun potaların içerisine konularak üzerine elektron demeti gönderilir ve buharlaştırılır. Kaplama işlemi esnasında bir kalınlık sensörü, buharlaşma miktarını kontrol eder ve sisteme geri bildirim verir. Böylece istenilen kalınlık seviyesinde metal kaplama işlemi gerçekleştirilmiş olur. Kaplama esnasında elektron demetinin akımı ayarlanarak kaplama hızı da belirlenebilir [21].



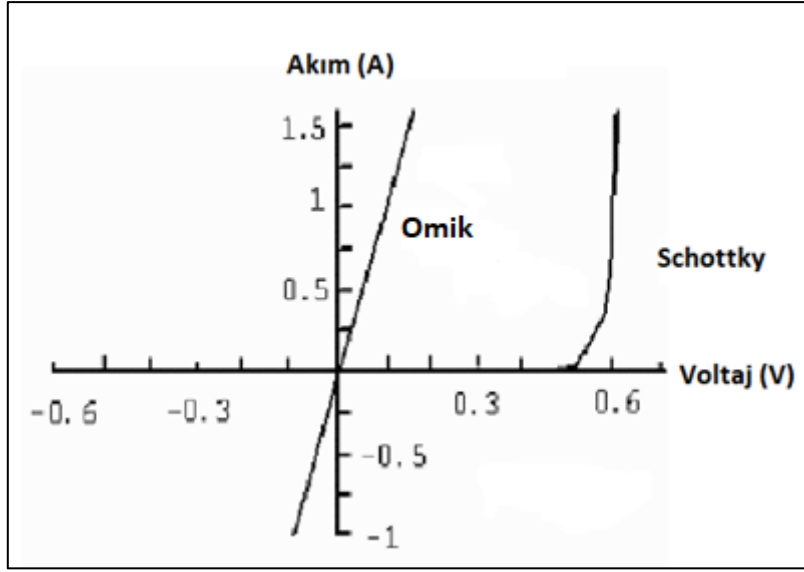
Şekil 2-15 Elektron demeti ile buharlaştırma tekniğinin şematik gösterimi [22].

### 2.3.8 Tavlama

Mikrofabrikasyon işleminin son basamağı, aygıt üzerine kaplanan metallerin tavlama işlemidir. Aygıt üzerine kaplanan metal, alttaş ile omik kontak oluşturmaktadır. Aygıtın metal kaplanan yüzeyinin hemen altındaki konsantrasyon seviyesi de bu omik kontak ilişkisini etkiler. [23] Kaplanan metalin kontak direnci mümkün olduğunca düşük ve denklem 2.16'da gösterilen Ohm Yasasına uygun olmalıdır.

$$V = I \cdot R \quad (2.16)$$

Şekil 2-16'da Omik ve Schottky davranış gösteren iki kontak tipinin akım-gerilim grafiği gösterilmiştir. Omik bir kontakın akım gerilim eğrisi doğrusal olmalıdır [24].



Şekil 2-16 Omik ve Schottky kontak dirençleri I-V eğrisi [25].

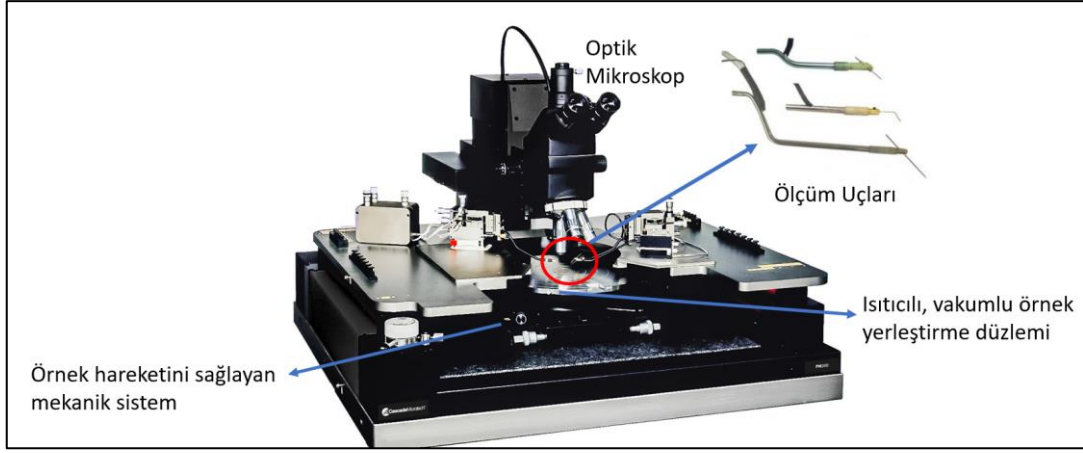
Bir metal-yarıiletken birleşimini omik yapmak için tavlama işlemi denilen mikrofabrikasyon adımı uygulanması gerekebilir. Metal-Yarıiletken arayüzeyindeki kusurlar ve tuzaklar tavlama yolu ile uzaklaştırılır. Tavlama işlemi ayrıca metalizasyon işlemi kaynaklı hasarları da iyileştirip, metalin yüzeye yapışmasını güçlendirir. Altaşların yüksek sıcaklığa uzun süreler maruz kalması hem metalleri eritip kontak yapısını bozacağı için hem de katkılama profilini değiştireceği için, bu yüksek sıcaklık tavlama işlemleri RTP (hızlı termal proses) adı verilen cihazlarda gerçekleştirilir. Bu cihazlar yüksek sıcaklıklara çok hızlı şekilde çıkan ve yapılan ayarlamalara göre bu sıcaklıklarda belirli sürelerde bekleyip tekrar soğuyan sistemlerdir [26].

#### 2.4 Silisyum Tabanlı Fotodedektörlerin Karakterizasyon Teknikleri

Bu bölümde, Silisyum tabanlı fotodedektörlerin performansını gösteren, bölüm 2.2.1'de detaylandırılmış performans parametrelerinin ölçüm işlemlerinin gerçekleştiren ve mikrofabrikasyon tekniklerinden; metalizasyon, ince film kaplamaları, aşındırma, katkılama adımlarının karakterizasyonunu sağlayan sistemler anlatılacaktır.

### 2.4.1 Prob İstasyonu ile Elektriksel Ölçümler

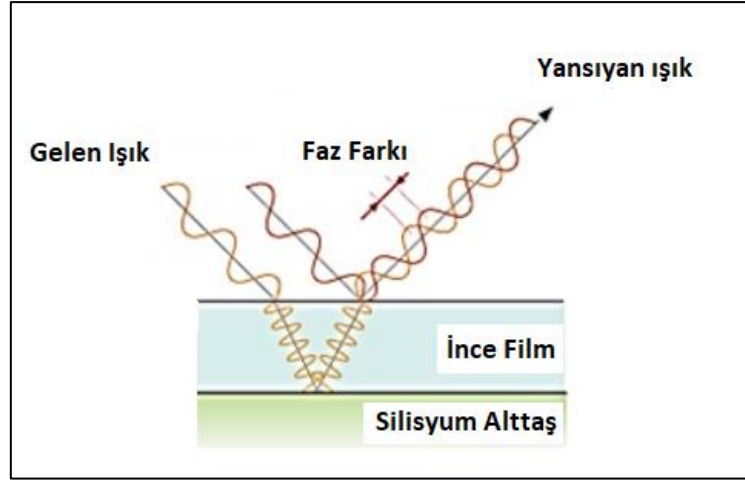
Prob istasyonları farklı çeşitte uygulamalar için test ve karakterizasyon işlemlerini gerçekleştiren sistemlerdir. Bunlardan biri de ışıkla etkileşime girip, elektrik sinyalleri şeklinde çıkış veren optoelektronik sistemlerdir. Bu tarz ölçüm sistemleri genellikle yapılacak işleme özel olarak üretilse de genel yapısı Şekil 2-17'deki gibidir. Akım gerilim kaynağına bağlanan sistemler, aygıt metallerine temas eden uçlar yardımıyla elektriksel etkileşime sokulup istenilen ölçümleri gerçekleştirilmektedir. Karanlık akım, kuantum verimliliği, duyarlılık, metal kontak direnci gibi dedektör performansını tanımlayan veya etkileyen nicelikler bu ölçüm sistemlerinde ölçülmektedir [27].



Şekil 2-17 Örnek bir prob istasyonu görüntüsü [28].

### 2.4.2 Reflektometre Dielektrik Kalınlık Ölçümleri

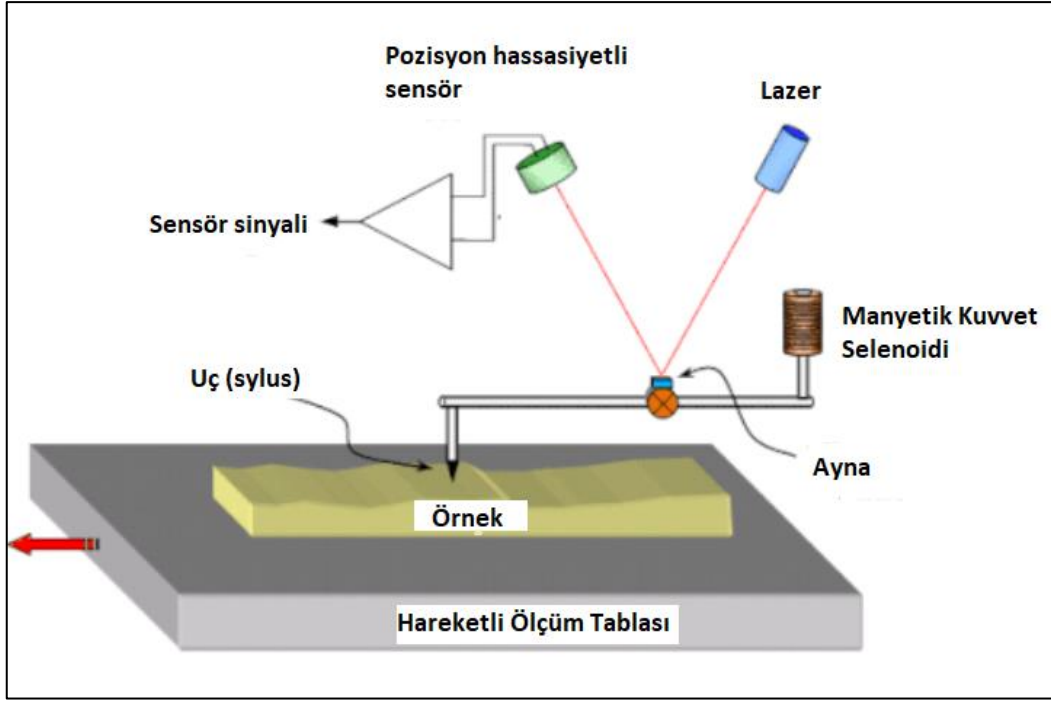
Silisyum üzerine kaplanmış olan  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  gibi dielektrik yapıların film kalınlığını ve kırma indislerini ölçmeye yarayan sistemlerdir. Cihaz, alttaş üzerine gönderilen bir ışığın geçen ve yansıyan miktarlarını kullanarak ölçüm işlemini gerçekleştirir. Cihazın bu ölçümleri gerçekleştirmesini sağlayan, dalganın girişimi şematik gösterimi Şekil 2-18'de gösterilmiştir. Alttaş ve ince film yapısına göre kullanılan ışık kaynakları değişiklik gösterir. Silisyum alttaş ve Silisyum içeren filmler için UV ışık kaynağı yeterlidir [29].



Şekil 2-18 Dalganın girişimi şematik gösterim [30].

### 2.4.3 Profilometre ile Derinlik Ölçümleri

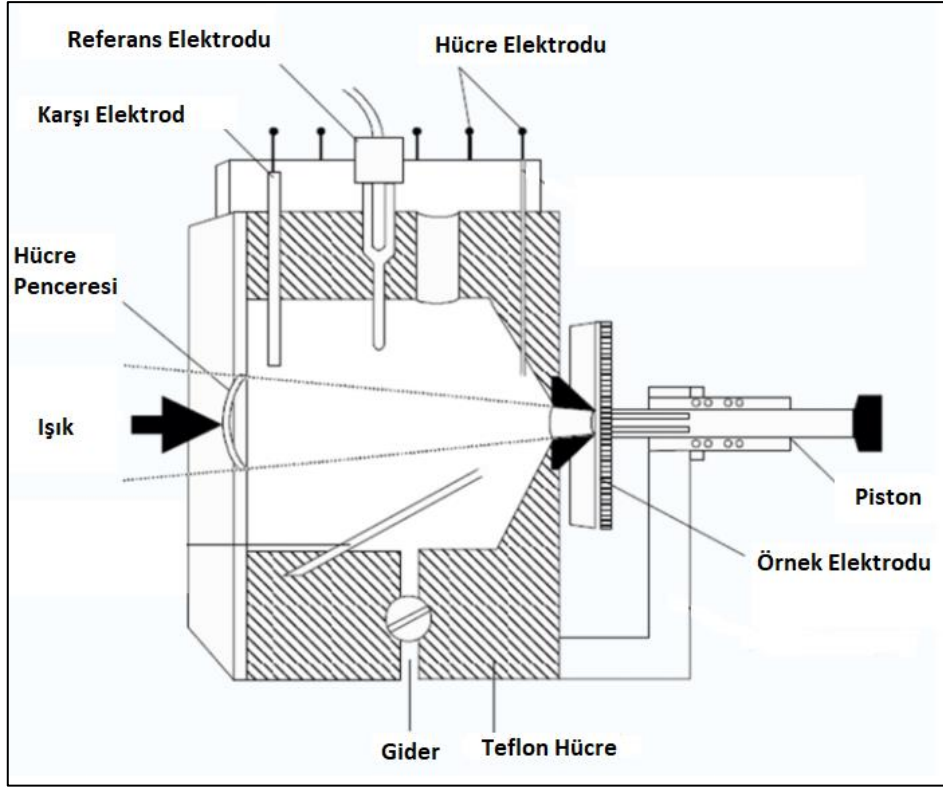
Bir yüzey üzerindeki tüm girinti çıkıntıların derinliklerini, fiziksel bir uç ya da ışık kullanarak ölçen sistemlerdir. Silisyum üzerinde biriktirilen metaller, ince filmler, aşındırılan derinliklerin miktarları bu sistemler ile ölçülebilir. Fiziksel uç kullanılan sistemlerde genellikle örnek ile temas oluşur. Düşey olan z ekseninde oldukça hassas çalışan bu sistemler yumuşak yapılara karşı duyarlıdır ya da hafif örneklerde yapıyı sürükleyebilir. Sistem, yüzey ile uç arasındaki kuvvet nedeni ile yukarı aşağı bir hareket gerçekleştirir ve bu hareket bir sensör tarafından algılanarak dijital olarak çıktı alınır. Fiziksel uç kullanan profilometreler, kontak tipi profilometre olarak adlandırılır. Kontak tipi bir profilometrenin şematik gösterimi Şekil-19'da görülmektedir [31].



Şekil 2-19 Kontak tipi profilometrenin şematik gösterimi [32].

#### 2.4.4 Elektrokimyasal Kapasitans-Gerilim (C-V) Ölçümleri

Yarıiletkenler içerisindeki aktif taşıyıcıların konsantrasyon bilgisini derinliğe bağlı olarak gösteren sistemlerdir. Alttaş, malzeme cinsine uygun kimyasal ile ıslak olarak aşındırılarak her derinlik için kapasitans-gerilim ölçümü yapılır ve daha sonra derinliğe bağlı konsantrasyon profili oluşturulur. Şekil 2-20'de ECV (elektrokimyasal kapasitans-gerilim) cihazının şematik yapısı gösterilmiştir. Işık kaynağı hol oluşumu için gereklidir. Bu nedenle n tipi örnekler için kullanılırken p tipi örnekler için sadece kimyasal kullanmak yeterlidir [33].



Şekil 2-20 Elektrokimyasal Kapasitans-Gerilim ölçüm cihazı şematik gösterimi [33].



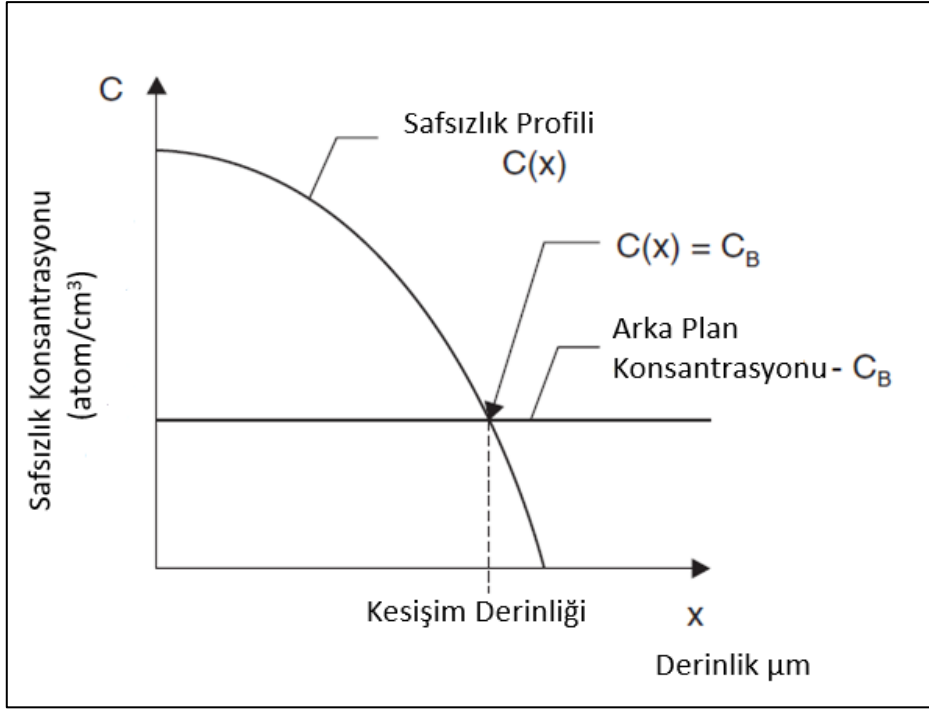
### 3. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Bu bölümde, Silisyum tabanlı fotodedektörlerin arka ve ön yüzeylerine yapılan katkılama derinliğinin üretilen fotoakıma etkisini anlamak amacıyla yapılan simülasyon çalışmalarından bahsedilecektir. Simülasyon çalışmaları için SILVACO yazılımı kullanılmıştır. SILVACO yazılımı, ışığın bir girdi ya da çıktı olduğu optoelektronik alanındaki yarıiletken lazerler, güneş pilleri, fotodedektörler gibi fiziksel yapıların detaylı şekilde simüle edilebildiği bir yazılım programıdır. Alttaş malzemesi ile soğurulan ya da üretilen ışık arasındaki etkileşimi simüle ederek üretilmek istenen yapıların detaylı analizleri yapılabilir. [34].

Bölüm 3.1 ve 3.2'de, sırasıyla dedektör arka yüzeyinin ve ön yüzeyinin katkılama derinliğinin dedektör fotoakım miktarına etkisi simüle edilmiştir. Bölüm 3.1'de arka yüzey N tipi katkılama derinliğinin fotoakımı değiştirmedeği görülmüş ve simülasyon çalışmalarına 3.3'de bulunan ön yüzey katkılama sıcaklığının katkılama derinliğine etkisi ve 3.4'de bulunan ön yüzey katkılama süresinin katkılama derinliğine etkisi ile devam edilmiştir.

Silisyum alttaşların termal katkılama işlemleri 800 °C -1150 °C arası sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilir. Burada alt limiti katkı atomlarının aktif hale gelip Silisyum içerisine girmesi belirlerken üst limiti Silisyum erime sıcaklığına (1400 °C) yaklaştıkça kristal yapının bozulması belirler. Yapılan simülasyon çalışmalarında bu sıcaklık aralığındaki değerler kullanılmıştır [35].

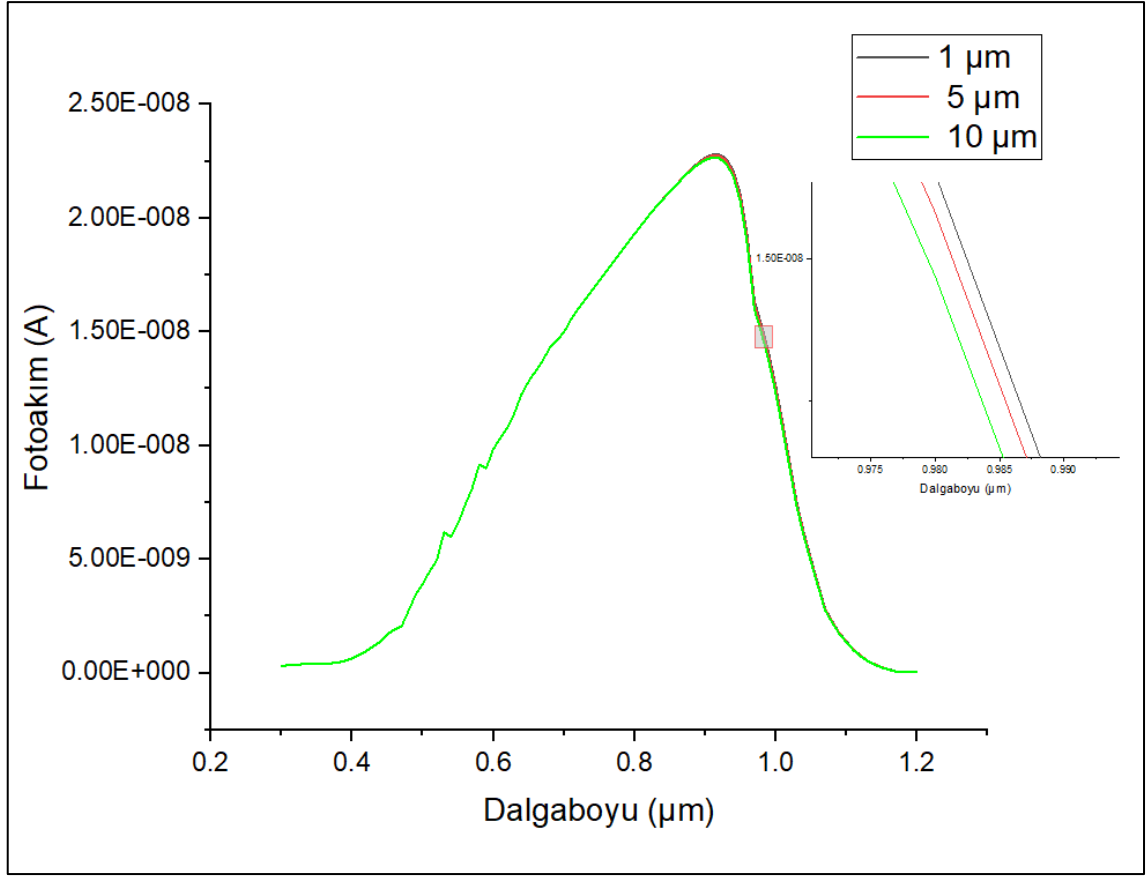
Katkılama proseslerinde katkılanacak alttaşların, belirli sıcaklıklar için çözebileceği madde konsantrasyonunun bir limiti vardır. Buna katı çözünebilirlik limiti denir. Her alttaş ve katkı maddesi için bu limit değişir. Bu limit sebebi ile, maksimum sıcaklıklarda bile bir alttaş daha fazla katkı maddesini çözemez. Katkılama konsantrasyonu yüzeyde maksimum miktarda bulunurken alttaş içerisinde derinlik arttıkça düşmeye başlar. Şekil 3-1'de görüldüğü gibi de, bir noktada alttaş konsantrasyonu yani arka plan konsantrasyonu ile kesişir. Buna kesişim derinliği adı verilir. Katkılama derinliğini belirleyen önemli bir faktör de katkılanacak alttaşın arka plan konsantrasyonudur. Simülasyon çalışmalarında, deneysel çalışmalarda da kullanılacak arka plan konsantrasyonu ( $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ) ve yürütülen literatür çalışmaları dikkate alınarak, katkılama konsantrasyonu 1-10  $\mu\text{m}$  derinlik aralığında incelenmiştir [36].



Şekil 3-1 Safsızlık profili, arka plan konsantrasyonu ve kesişim derinliği ilişkisi [36].

### 3.1 Arka Yüzey Katkılama Derinliğine Bağlı Fotoakım Simülasyon Çalışmaları

Bu bölümde; dedektörlerin konsantrasyon seviyesi, üzerine gönderilen optik güç, uygulanan besleme gerilimi, yeniden birleşme sabiti gibi diğer tüm parametreler aynı kalacak şekilde sadece arka yüzey fosfor katkılanmış tabakanın kalınlığı değiştirilerek üç adet Silisyum fotodedektörün dalga boyuna bağlı üretilen fotoakım miktarları simüle edilmiştir.

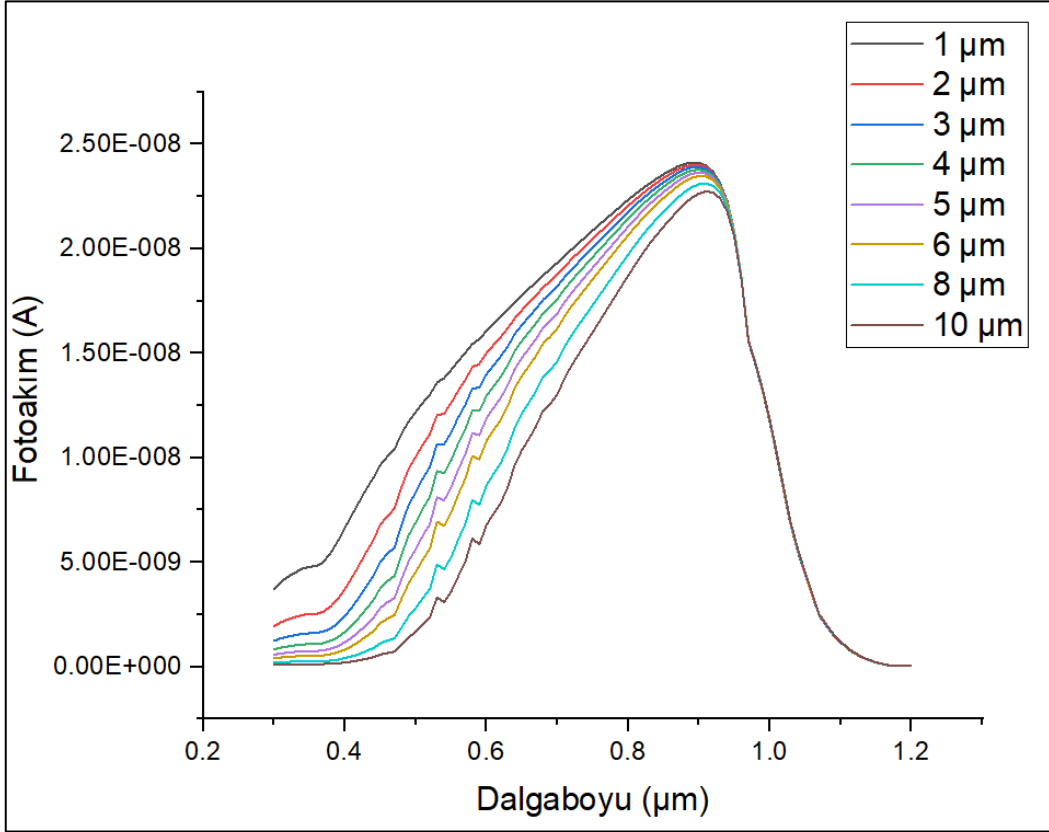


Şekil 3-2 N tipi fosfor katkı difüzyon derinliğinin 1  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$  ve 10  $\mu\text{m}$  derinlikler için dalga boyuna bağlı fotoakım grafiği.

P-I-N ya da N-I-P aygıt yapısı, ışığın hangi yüzeyden dedektör üzerine düşürüleceğini gösterir. Tüm simülasyon ve deneysel işlemlerde P-I-N yapı fotodedektör konusu çalışıldığı için ışık, P tipi eklem bulunduğ yüzeyden yapı içerisine girmekte ve N tipi katkı yüzeyine ulaşana kadar ışığın çok büyük bir kısmı katkısız bölge tarafından soğurulmaktadır. Şekil 3-2’de de görüleceği üzere N tipi yani arka yüzeyin kalınlığının değiştirilmesi fotoakıma etki etmez. Düşük dalga boylarında (<900 nm) bu etki sifıra yakın iken daha büyük dalga boylarında (>900 nm) küçük bir fark gözlenmektedir. Bu da daha büyük dalgalarda ışığın daha büyük oranda arka yüzeye ulaştığının bir göstergesidir ve literatür ile uyumludur [37].

### 3.2 Ön Yüzey Katkılama Derinliğine Bağlı Fotoakım Simülasyon Çalışmaları

Bu bölümde; dedektörlerin konsantrasyon seviyesi, üzerine gönderilen optik güç, uygulanan besleme gerilimi, yeniden birleşme sabiti gibi diğer tüm parametreler aynı kalacak şekilde sadece ön yüzey bor katkılanmış tabakanın kalınlığı değiştirilerek 8 adet Silisyum fotodedektörün dalga boyuna bağlı üretilen fotoakım miktarları simüle edilmiştir.

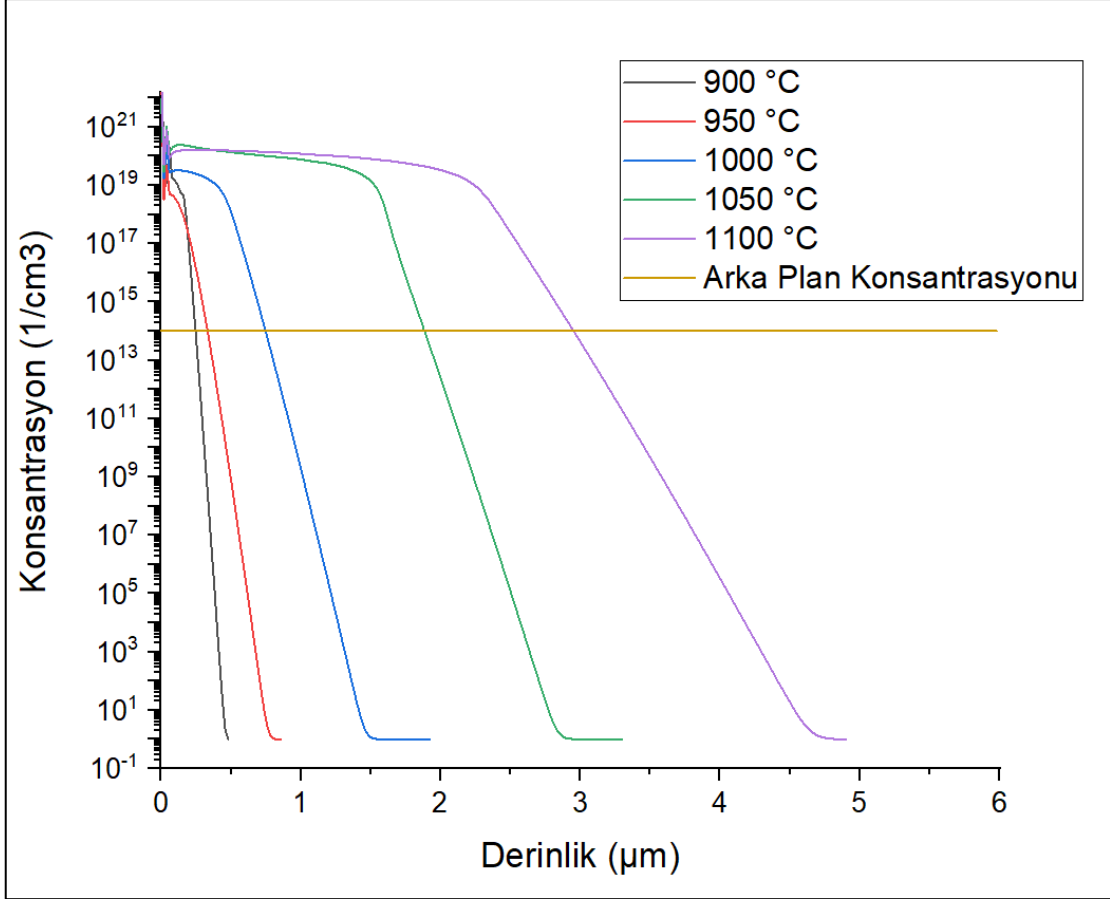


Şekil 3-3 P tipi fosfor katkılı difüzyon derinliğinin 1-10 arası  $\mu\text{m}$  derinlikler için spektral dalga boyuna bağlı fotoakım grafiği.

Fotodedektörler üzerine gönderilen ışık, katkısız olan bölgede daha çok elektron-hol çifti oluşturup fotoakıma katkı yaptığı için, katkısız bölge kalınlığı arttıkça fotoakım artmaktadır. P-I-N aygıt yapısında ışık, P tipi olan ön yüzeyden dedektöre düşürüldüğü için, Şekil 3-3'te, p tipi katkılama bölgesi kalınlığı azaldıkça fotoakımın arttığı görülmektedir. Yüksek dalga boyları dedektörün içerisinde daha derinlerde soğurulduğu için bu etki düşük dalga boylarında gözlenir [37].

### 3.3 Ön Yüzey Katkılama Sıcaklığına Bağlı Fotoakım Simülasyon Çalışmaları

Bu bölümde; silyum yapının konsantrasyon seviyesi, kalınlığı, katkılama süresi gibi diğer tüm parametreler aynı kalacak şekilde sadece ön yüzey bor katkılama sıcaklığı değiştirilerek 5 farklı varyasyon ile derinliğe bağlı konsantrasyon seviyesi simüle edilmiş ve şekil 3-4'te gösterilmiştir.



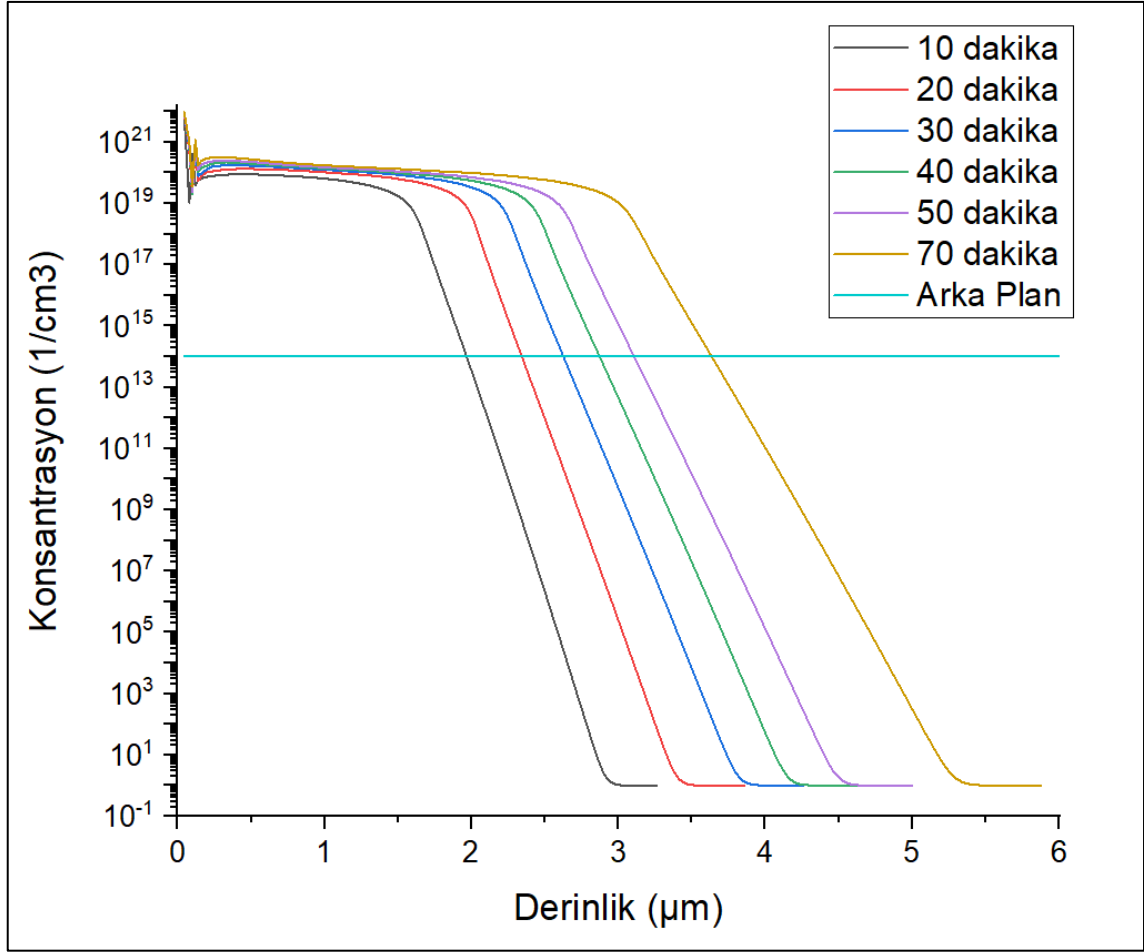
Şekil 3-4 Difüzyon sıcaklığına bağlı olarak derinlik-konsantrasyon eğrisi.

Bölüm 2.3.5'te aktarılan Fick Yasası'na göre difüzyon hızı arttıkça derinliğe ve sıcaklığa bağlı konsantrasyon artmaktadır. Difüzyon hızı ise sıcaklık ile doğrudan orantılı bir fiziksel nicelik olduğu için gözlenen davranış literatür ile uyumludur.

### 3.4 Ön Yüzey Katkılama Süresine Bağlı Fotoakım Simülasyon Çalışmaları

Bu bölümde; silyum yapının konsantrasyon seviyesi, kalınlığı, katkılama sıcaklığı gibi diğer tüm parametreler aynı kalacak şekilde sadece ön yüzey bor katkılama

süresi değiştirilerek 6 farklı varyasyon ile derinliğe bağlı konsantrasyon seviyesi simüle edilmiş ve şekil 3-5'te gösterilmiştir.



Şekil 3-5 Difüzyon süresine bağlı olarak derinlik-konsantrasyon eğrisi.

Fick yasasına göre konsantrasyon seviyesi katkılama süresi ile doğru orantılıdır. Katkılanan yapının belirli katkı maddesi için katı çözünebilirlik limiti dolana kadar katkılama işlemi devam eder. Gözlenen sonuç literatür ile uyumludur. Özellikle yüksek sıcaklık fırınlarında gerçekleştirilen termal katkılama yöntemlerinde katkılama süresi, sıcaklığı, ortam basıncı gibi birçok parametre etkisi bulunmaktadır ve kontrol edilmesi zor bir mikrofabrikasyon adımıdır. Yüksek sıcaklık fırınları ile sıcaklık kontrolü iyi şekilde sağlansa da çok kısa zaman içerisinde yüksek konsantrasyon ve yüksek derinlik seviyeleri gözlenir. Bu nedenle bölüm 3.3.'de aktarılan sıcaklık parametresi, daha sığ katkılama profilleri oluşturmak için süre parametresinden daha hassas sonuçlar gösterir [36].

#### 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde 3 adet Silisyum alttaş kullanılarak üretilen P-I-N yapılı fotodedektörlerin temiz oda içerisinde gerçekleştirilen mikrofabrikasyon detaylarından bahsedilecektir. Üretim için gerçekleştirilen yüksek sıcaklık mikrofabrikasyon adımlarından katkılama ve termal oksidasyon adımlarında gerçekleştirilecek varyasyon detayı çizelge 4-1'de gösterilmektedir. A1, A2 ve A3 alttaş isimleridir. Deneysel sonuçlar; katkılama prosesleri açısından A1 ve A2 örnekleri kendi aralarında, oksidasyon prosesleri açısından A1 ve A3 örnekleri kendi aralarında değerlendirilecektir.

Oksidasyon Tipi	Katkılama Sıcaklığı	
	1100°C	1000°C
Islak Oksidasyon	A1	A2
Kuru Oksidasyon	A3	

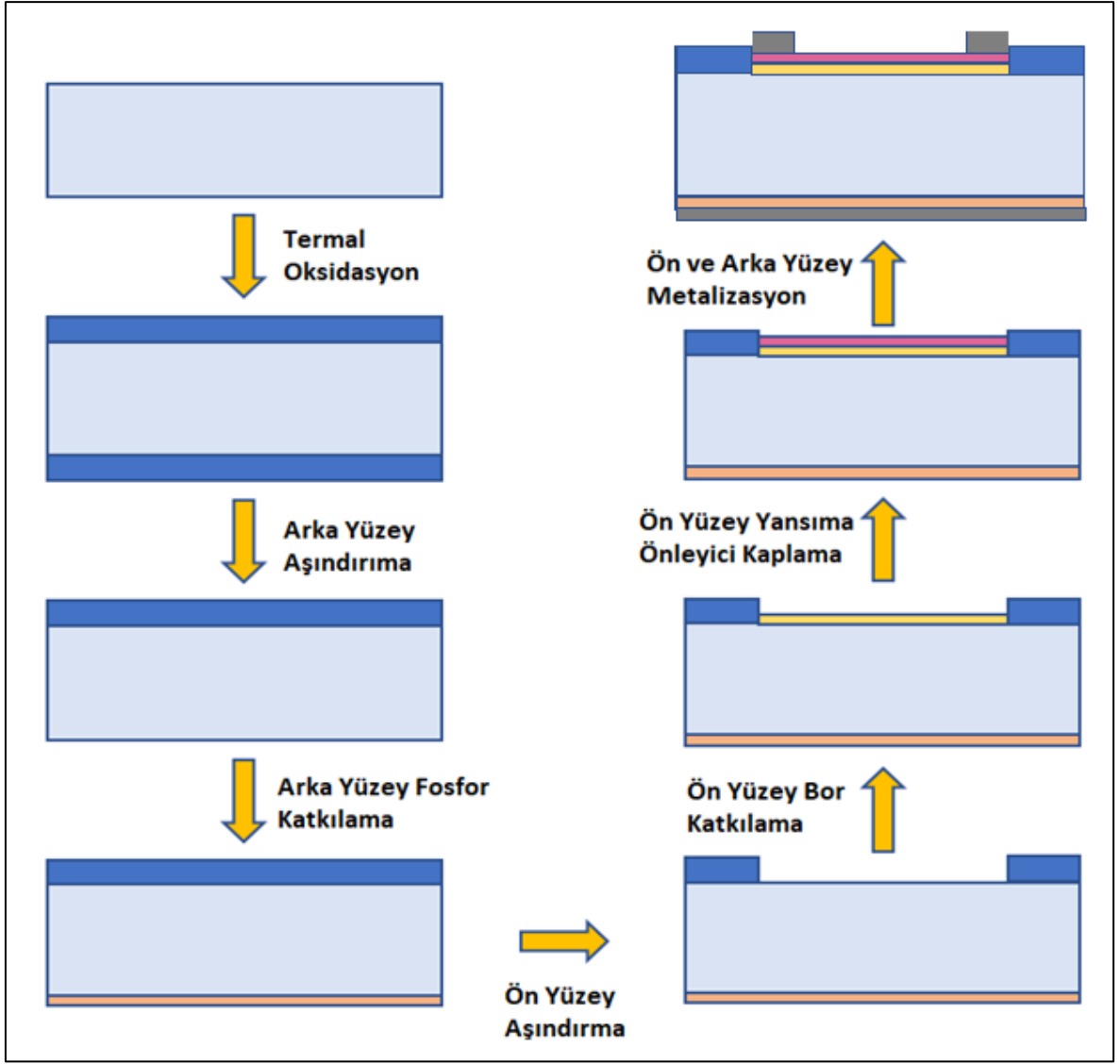
Çizelge 4-1 Deneysel varyasyon detayı.

Deneysel çalışmalarda SILICON MATERIALS marka Silisyum alttaşlar kullanılacak olup, alttaş ile ilgili teknik detaylar çizelge 4-2'de gösterilmektedir.

Alttaş Kalınlığı	500±20 µm
Alttaş Çapı	100±0.2 mm
Üretim Yöntemi	FZ (Float Zone)
Yüzey Durumu	Her iki yüzey de parlatılmış
Alttaş Konsantrasyonu	10 <sup>14</sup> cm <sup>-3</sup>

Çizelge 4-2 Alttaş teknik özellikleri.

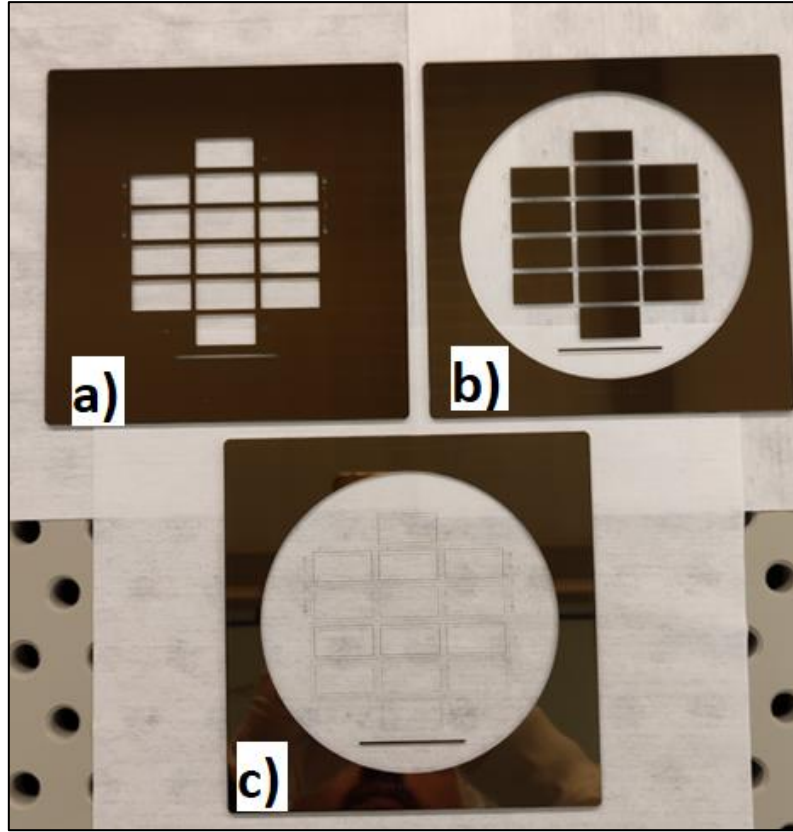
Silisyum tabanlı fotodedektör aygıt üretmek için gerçekleştirilen mikrofabrikasyon adımlarının özetini gösteren akış şeması şekil 4-1'de gösterilmiştir.



Şekil 4-1 Silisyum tabanlı P-I-N fotodedektör temel mikrofabrikasyon adımları.

Fotolitografi işlemleri için kullanılacak tüm fotomaskeler, HEIDELBERG INSTRUMENTS marka lazer yazıcı cihazında, nikel metal kaplı soda-lime cam malzeme üzerine yazdırılarak üretilmiştir. Şekil 4-2'de 4" alttaşların şekillendirme proseslerinde kullanılacak 3 adet 5" fotomaske gösterilmiştir.

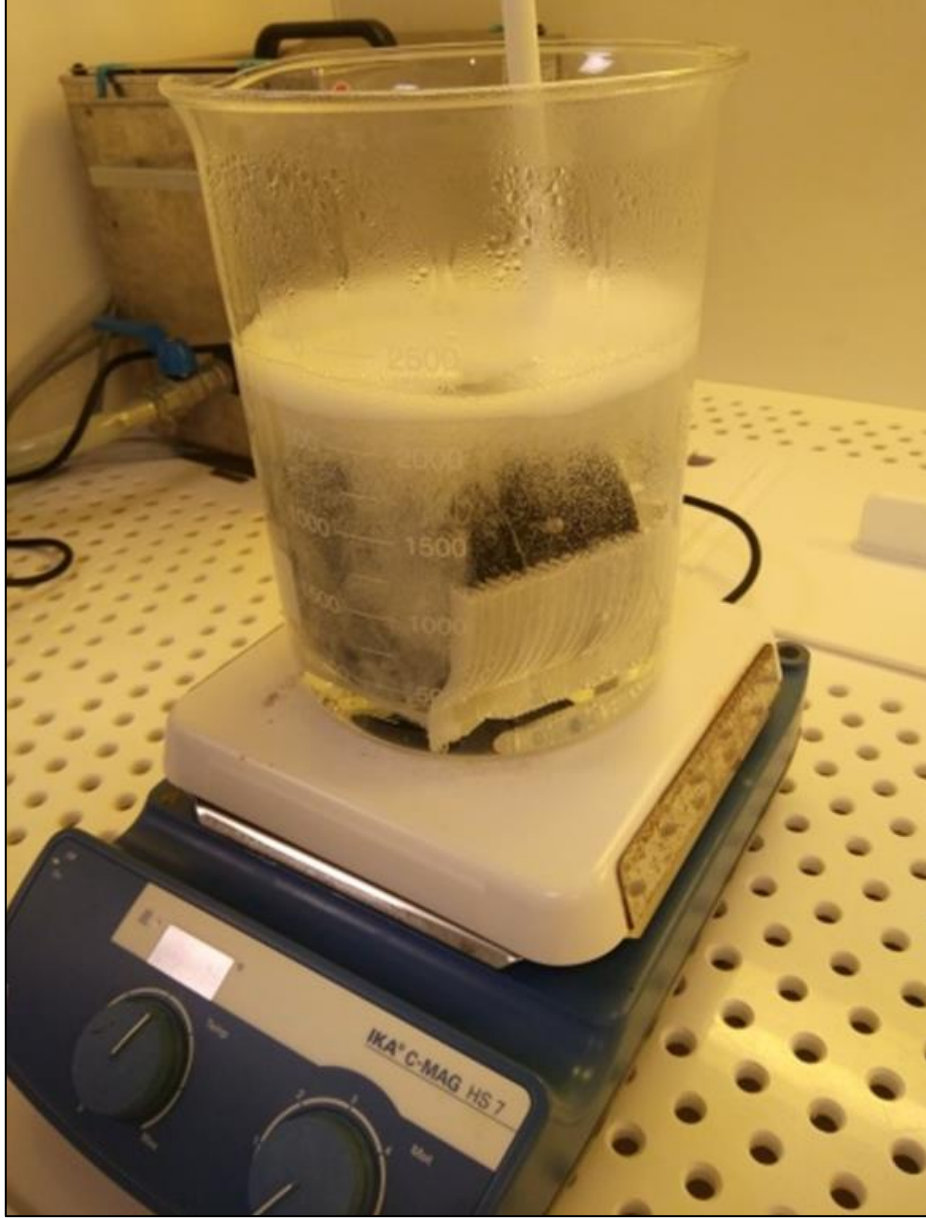




Şekil 4-2 Fotolitografi proseslerinde kullanılan a) katkılama b) yansıma önleyici tabaka c) metalizasyon fotomaskeleri.

#### 4.1 Temizlik

3 adet Silisyum alıttaş, üretim aşamasından kalabilecek potansiyel organik ve inorganik kirliliklerden arındırılması amacıyla RCA temizlik yöntemi ile temizlenmiştir. Prosesin ilk adımı RCA1 temizliğidir. İçerisine 1500 ml DIS konulan büyük bir cam beher, ısıtıcı cihaz üzerine yerleştirilerek 200 °C sıcaklık değerinde 30 dakika ısıtılmış daha sonra sırasıyla 300 ml NH<sub>4</sub>OH ve 300 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> eklenerek 2 dakika bekletilmiştir. Şekil 4-3'de görüldüğü üzere köpürmesinden aktif olduğu anlaşılan karışıma, 3 alıttaş bir tutucu yardımı ile daldırılıp 15 dakika bekletilmiş, daha sonra karışım içerisinden çıkartılarak DIS ile durulanıp azot gazı ile kurutulmuştur. Organik temizlik işlemleri tamamlanan alıttaşlar daha sonra üzerinde biriken ince oksit tabakasını aşındırmak için %5 HF içeren DIS+HF karışımına daldırılıp 1 dakika bekletilmiş, ardından tekrar durulama ve kurulama işlemi yapılmıştır. Son olarak tüm alıttaşlar inorganik temizlik amacıyla, RCA1 adımından tek farkı NH<sub>4</sub>OH yerine HCl kimyasalı olan karışım içerisine 15 dakika daldırılıp çıkartılarak temizlik işlemleri tamamlanmıştır.



Şekil 4-3 RCA temizlik proses görüntüsü.

#### 4.2 Oksidasyon

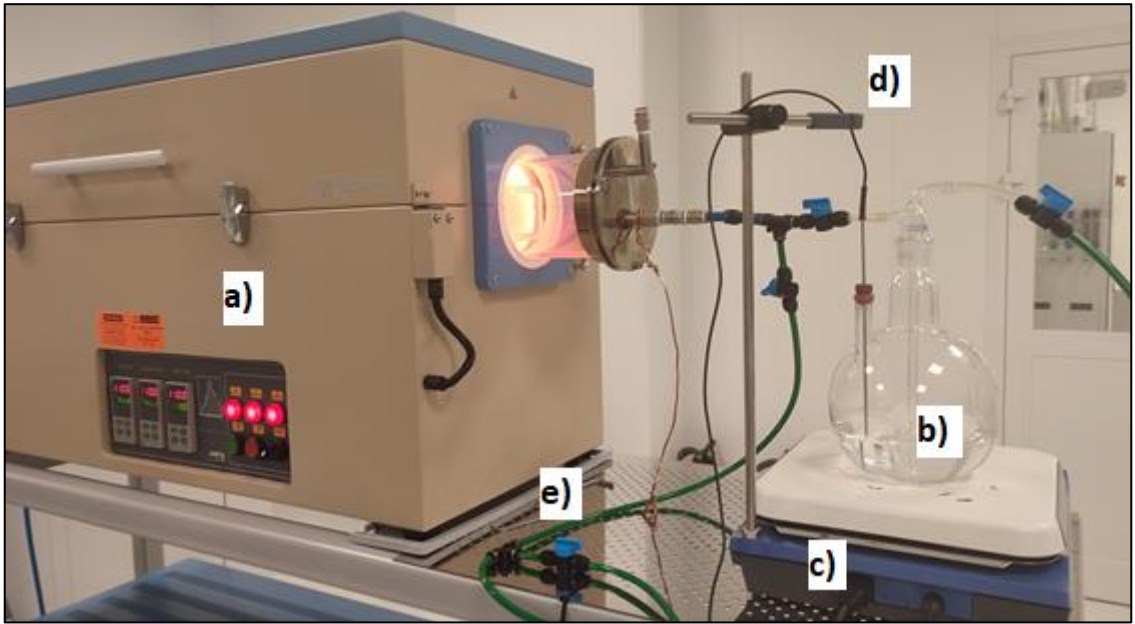
Bu bölümüde, temizlik işlemleri tamamlanan alttaşlar üzerinde pasivasyon ve maske görevi görececek  $\text{SiO}_2$  tabakasının oluşturulmasından bahsedilecektir. A1 ve A2 alttaşları ıslak termal oksidasyon, A3 alttaşı ise kuru termal oksidasyon yöntemi ile oksitlenmiştir. Aygıtların oksidasyon sonrası kesit görüntüsü Şekil 4-4'te gösterilmiştir.



Şekil 4-4 Oksidasyon işlemi sonrası aygıtların kesit görüntüsü.

#### 4.2.1 Islak Termal Oksidasyon

Yüksek sıcaklık fırınlarına örnek tutucu yardımıyla yerleştirilen A1 ve A2 alttaşlarının ıslak oksidasyon işlemleri, şekil 4-5'te görüldüğü gibi bir gaz verici (bubbler) cam malzeme ile gerçekleştirilmiştir.

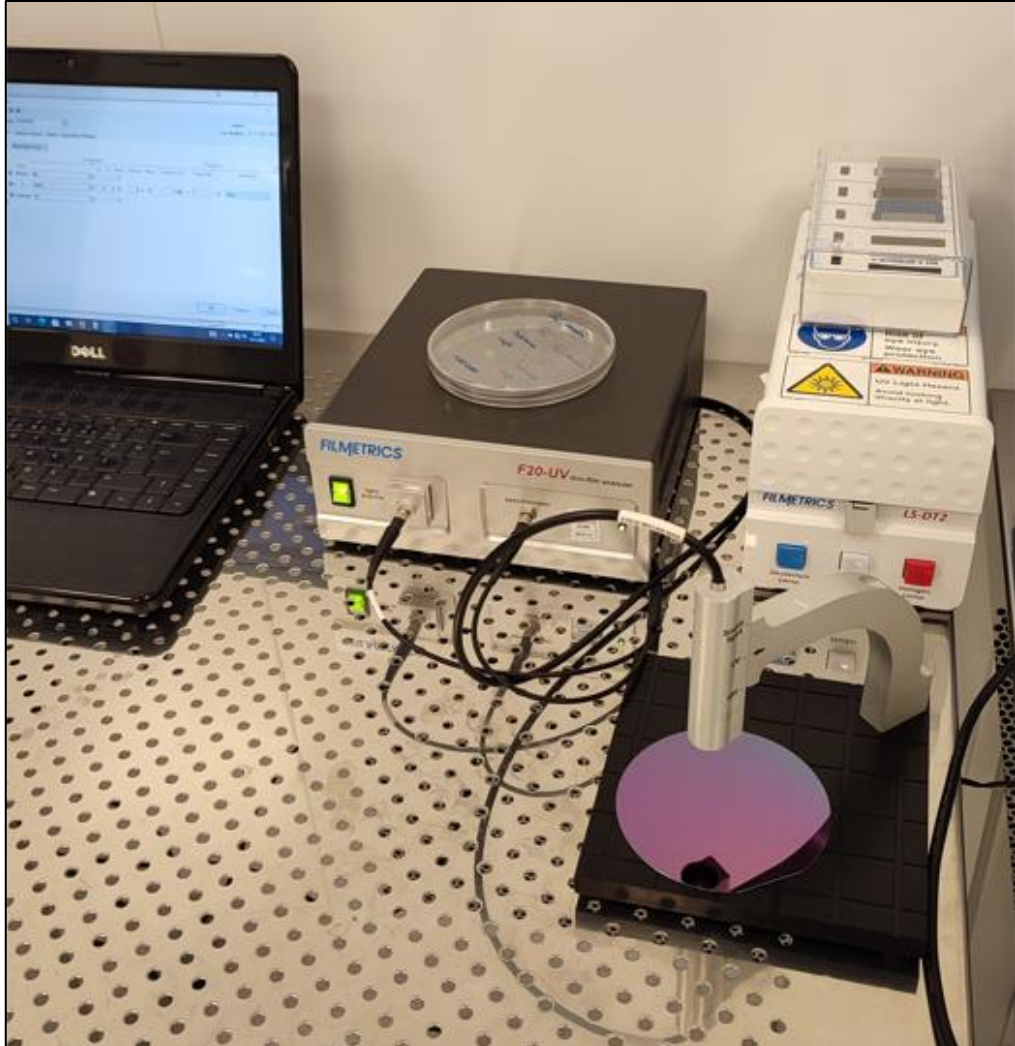


Şekil 4-5 Islak termal oksitleme sisteminde bulunan a) yüksek sıcaklık fırını b) bubbler c) ısıtıcı d) sıcaklık probu e) gaz hattı

Gaz verici cam malzeme yarısına kadar DIS ile doldurularak bir ısıtıcı üzerine yerleştirilmiş ve sıcaklığı 230 °C' ye ayarlanmıştır. Bu esnada MTI marka fırın da 1100 °C'ye saniyede 10°C/dakika hızıyla ısınacak şekilde çalıştırılmış ve alttaşların bulunduğu kuvarz tüp ortamına 2 litre/dakika akış hızında azot gazı gönderilmiştir. 110 dakika sonrasında fırın 1100 °C sıcaklığına ulaştığında beklemeye alınmış ve

gaz verici sistem içerisine bir termometre de daldırılarak bu kez su sıcaklığı 92 °C sabit kalacak şekilde ısıtıcı ayarlanmıştır. Ardından fırın içine gönderilen azot gazı fırından kesilerek gaz verici malzeme içerisine 2 litre/dakika akış hızı ile gönderilmiştir. Gaz verici cam malzeme içerisinde oluşan su buharı, azot gazı ile 4 saat boyunca taşınarak altaşlar üzerinde SiO<sub>2</sub> tabakası oluşturulmuştur. Daha sonra azot gazı tekrar gaz verici sistemden kesilerek fırın içerisine verilmiş ve fırın tekrar 10°C/dakika hız ile soğutulurak örnekler fırın içerisinden çıkarılmıştır.

şekil 4-6'da gösterilen FILMETRICS marka reflektometre sisteminde, altaş üzerinde 5 farklı noktadan yapılan oksit kalınlık ölçümlerinde 1240±17 nm SiO<sub>2</sub> film kalınlığı ölçülmüştür.



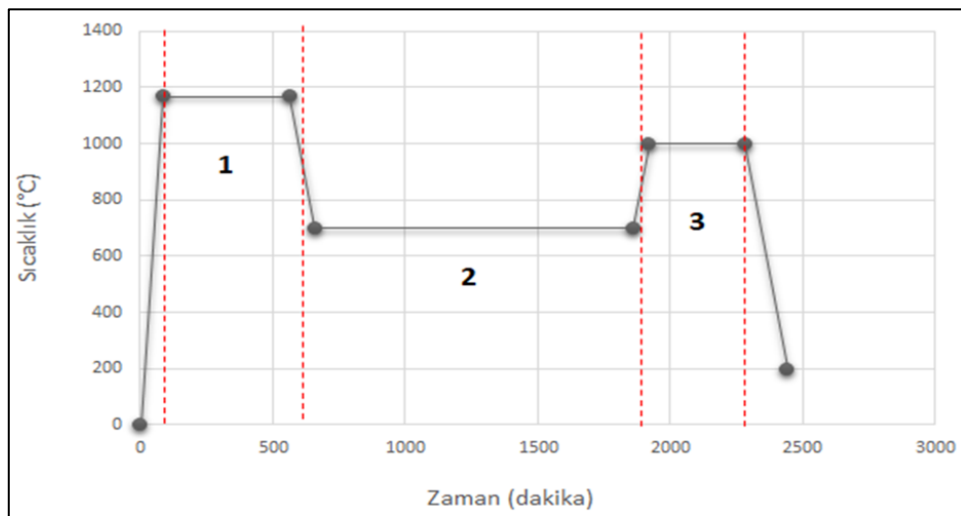
şekil 4-6 FILMETRICS cihazında termal SiO<sub>2</sub> film kalınlığı  l m .

#### 4.2.2 Kuru Termal Oksidasyon

Kuru termal oksidasyon işlemi için A3 örneği yüksek sıcaklık fırını içerisine yerleştirilmiş ve bu kez kuru işlem yapılacağı için fırın içerisine oksijen gazı direkt olarak gönderilerek oksidasyon işlemi yapılmıştır.

Kuru termal oksidasyon yöntemi için uzun süreli arındırma tekniği kullanılmıştır. Bu yöntem 3 aşamadan oluşmaktadır. 1. Aşamada alttaş 1100 °C sıcaklığında 6 saat bekletilmiştir ve bu sürede tüp içerisine sadece yüksek saflıkta oksijen gazı gönderilmiştir. Bu aşamada SiO<sub>2</sub> yapısı oluşurken aynı zamanda kristal kusur yoğunluğu arttırılmaktadır. 2. Aşama da ise sıcaklık 700°C'ye düşürülmüş, oksijen gazı sistemden kesilerek azot gazı verilmiştir ve bu sıcaklıkta 20 saat beklenmiştir. Bu aşamada ise alttaş içerisine katılanan doymuş oksijenler çökerek daha büyük kusur kümeleri oluşturmaktadır. Son aşamada ise sıcaklık tekrar 1000 °C'ye çıkartılarak 6 saat azot gazı akışı ile proses devam ettirilmiştir. 3. adımın amacı ise kristal içerisindeki safsızlıkları, 2. Aşamada oluşturulan kusur kümeleri içerisine bağlayarak pasif hale getirmektir. Şekil 4-7'de prosesin zamana bağlı sıcaklık eğrisi gösterilmiştir. [38]

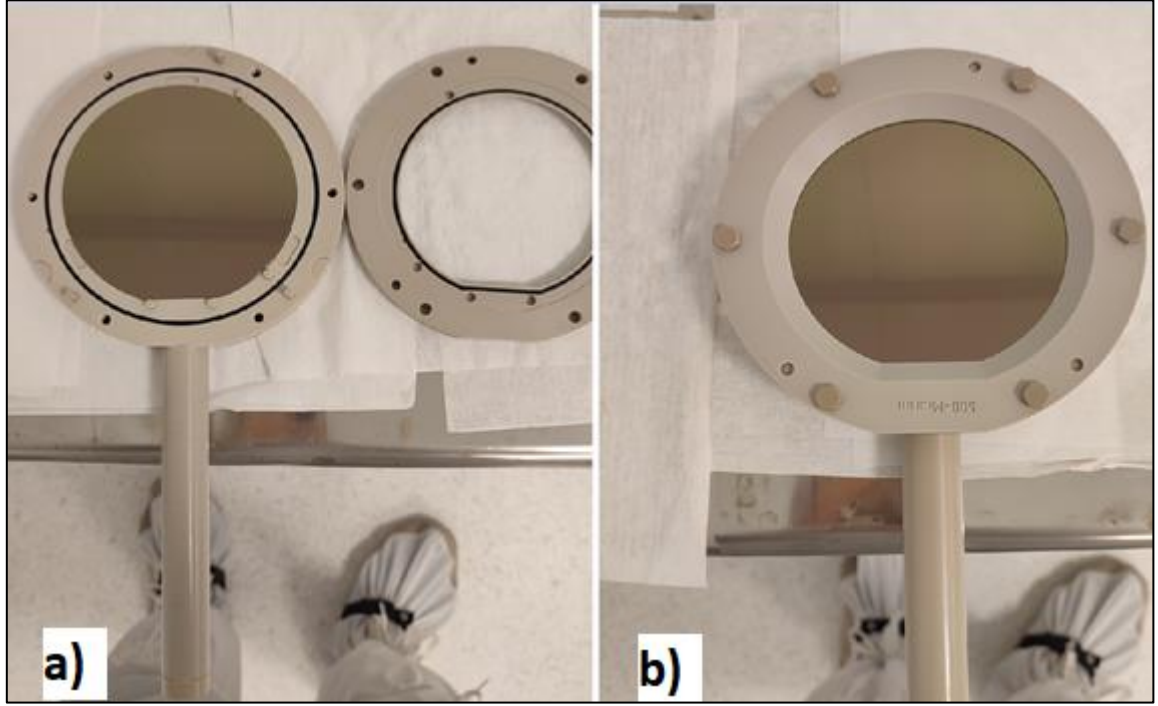
Fırın soğuduktan sonra alttaş fırından çıkartılmış ve FILMETRICS marka reflektometre cihazı ile 5 farklı noktadan yapılan kalınlık ölçümlerinde 520±7 nm SiO<sub>2</sub> film kalınlığı ölçülmüştür.



Şekil 4-7 Arındırma tekniği ile gerçekleştirilen kuru termal oksidasyonun sıcaklık-zaman grafiği.

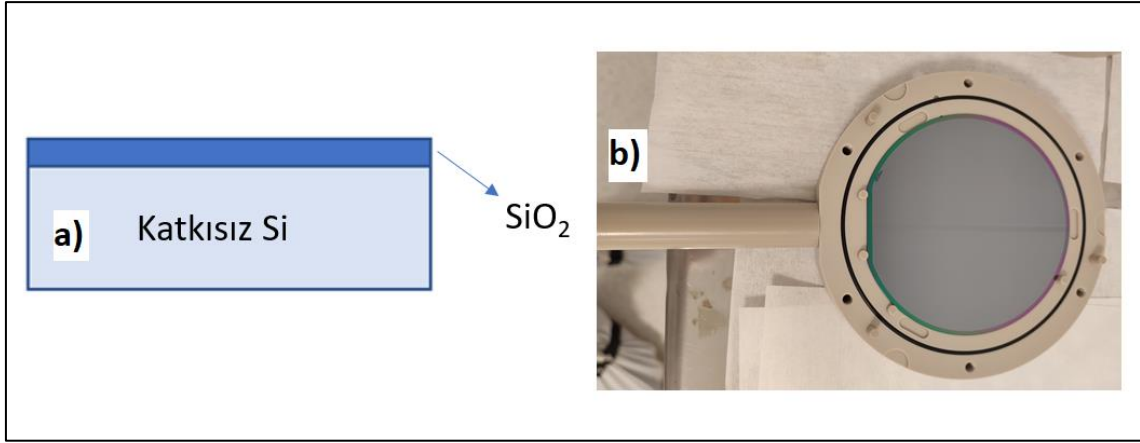
### 4.3 N Tipi Fosfor Katkılama Adımı Öncesi Arka Yüzey SiO<sub>2</sub> Aşındırma

Bu adımda hem her iki yüzeyin iyileştirilmesi hem de arka yüzey katkılama sırasında ön yüzeyi maskeleyesi için kaplanan SiO<sub>2</sub> tabakalarından arka yüzey SiO<sub>2</sub> tabakası, katkılama işlemi için aşındırılacaktır. Tek yüzeydeki tabaka aşındırılacağı için tüm alttaşlar Şekil 4-8'de gösterilen AMMT marka aside dayanıklı alttaş tutucularına arka yüzeyleri yukarı gelecek şekilde yerleştirilip vidalanmıştır.



Şekil 4-8 a) Arka yüzey SiO<sub>2</sub> aşındırma işlemi öncesi alttaşın örnek tutucuya yerleştirilmesi b) kapağın vidalanması sonrası görüntüsü.

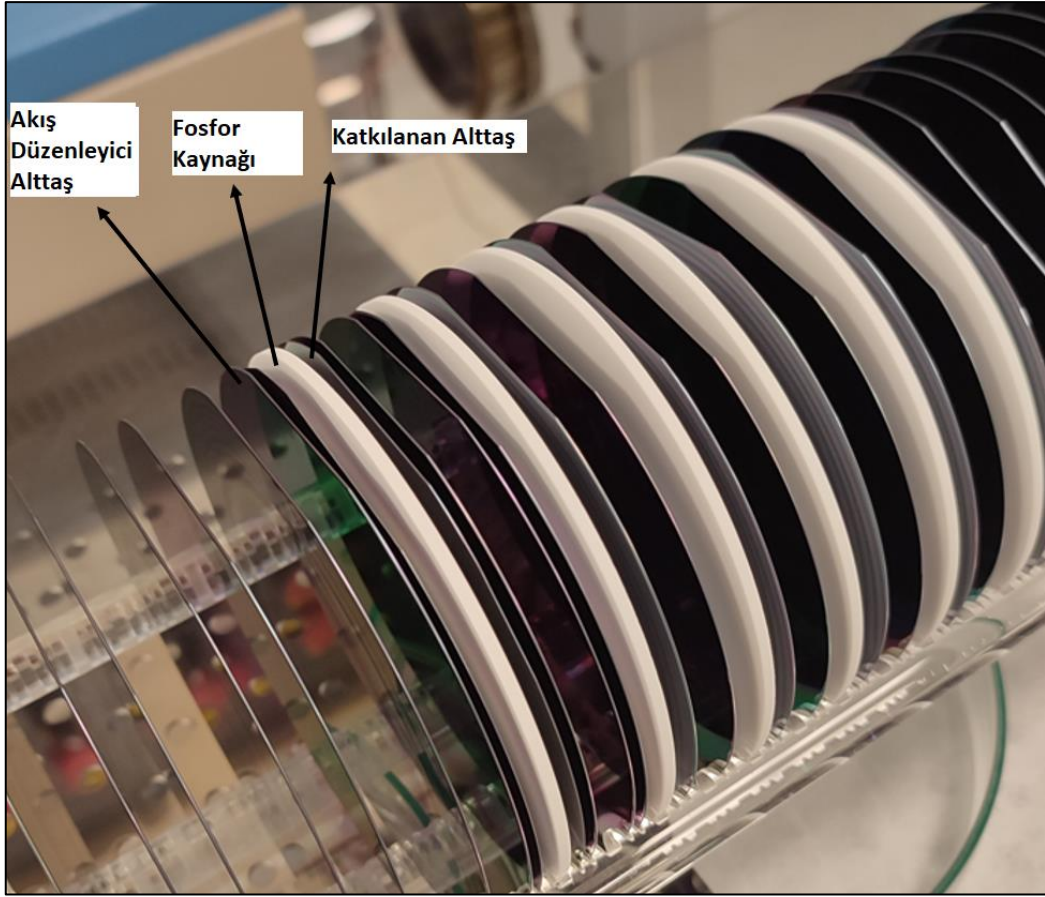
3 örnek de tutuculara yerleştirildikten sonra %5 lik konsantrasyonda HF içerisine konulup; 1240 nm film kalınlığına sahip olan A1 ve A2 örnekleri 1 saat, 520 nm film kalınlığına sahip A3 örneği ise 30 dakika boyunca bu çözelti içerisinde tutularak aşındırma işlemi tamamlanmıştır. Aşındırma sonrası aygıtın kesit ve alttaşın arka yüzey görünümü Şekil 4-9'daki gibidir.



Şekil 4-9 Arka yüzey  $\text{SiO}_2$  aşındırma sonrası a) aygıt kesit görüntüsü b) alttaşı arka yüzey görüntüsü

#### 4.4 Arka Yüzey N Tipi Fosfor Katkılama

Arka yüzeyleri yeniden sadece Silisyum haline gelen tüm alttaşlar, katkılama işlemi yapılması için Şekil 4-10' da gösterilen alttaş ve katkı kaynağı tutucu kayık şeklindeki kuvartz malzeme üzerine, katkılanacak yüzeyleri kaynaklara bakacak şekilde dikey olarak yerleştirilmiştir. Fosfor katkı kaynakları TECHNEGLAS isimli firmadan tedarik edilmiştir ve firmanın önerileri doğrultusunda her kaynak, katkılama işlemi yapılmadan önce aktif hale gelebilmeleri için  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta 13 saat yakılarak yaşlandırılmıştır. Görselde görülen diğer alttaşlar, yaşlandırma işlemi yapılırken firmanın önerisi ile kaynakların yanına yerleştirmek ve katkılama işlemi esnasında gaz akışlarını düzenlemek için kayık üzerinde sabit durmaktadır.



Şekil 4-10 Arka yüzey N tipi katkılama öncesi alttaşların kuvarz kayığa yerleştirilmesi.

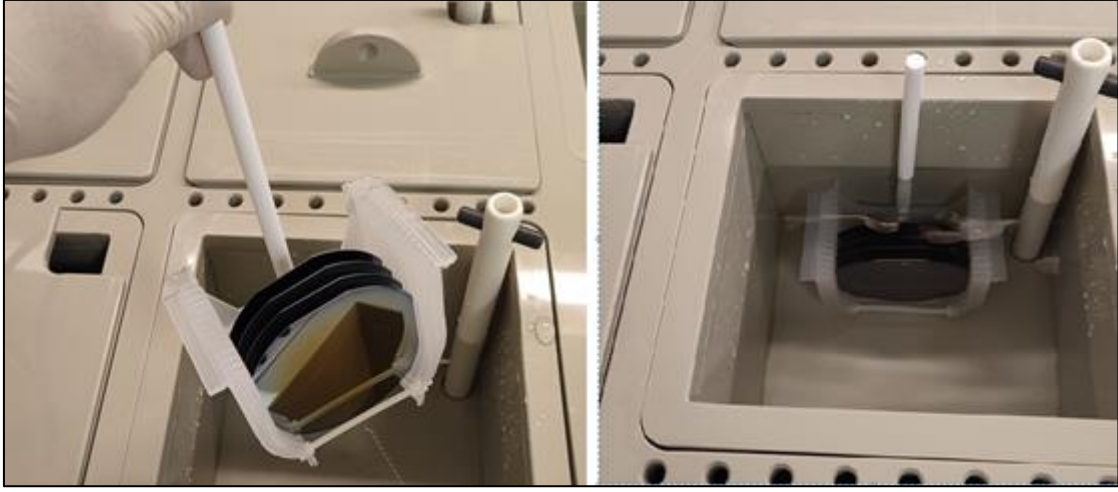
Alttaşlar kayık üzerine yerleştirildikten sonra fırın içerisinde bulunan kuvarz tüpe konulmuş ve 1100 °C sıcaklıkta 70 dakika kalacak şekilde katkılama işlemi gerçekleştirilmiştir. Proses esnasında tüp içerisine 4 litre/dakika akış hızında azot ve 50 cm<sup>3</sup>/dakika gaz akış hızı ile saf oksijen gönderilmiştir. Bu düşük akışlı oksijen gazı, katkılama esnasında alttaşlar üzerinde oluşan fosfor-cam karışımı yapının katkılama bittikten sonra HF ile yüzeyden temizlenebilmesi amacıyla uygulanmıştır.

#### **4.5 Arka Yüzey Katkılama Sonrası oluşan Fosfor-Cam Tabakasının Aşındırılması**

Fosfor katkılama esnasında düşük miktar oksijen verilerek HF ile çözülebilir hale gelen bu ince tabakanın aşındırılması, %5 HF çözeltisi ile yaklaşık 1 dakika sürmektedir. Bu nedenle ön yüzeyde oluşturulmuş 1240 nm'lik termal oksit tabakasını korumak gerekmez. Şekil 4-11'de gösterildiği üzere örnekler %5 HF

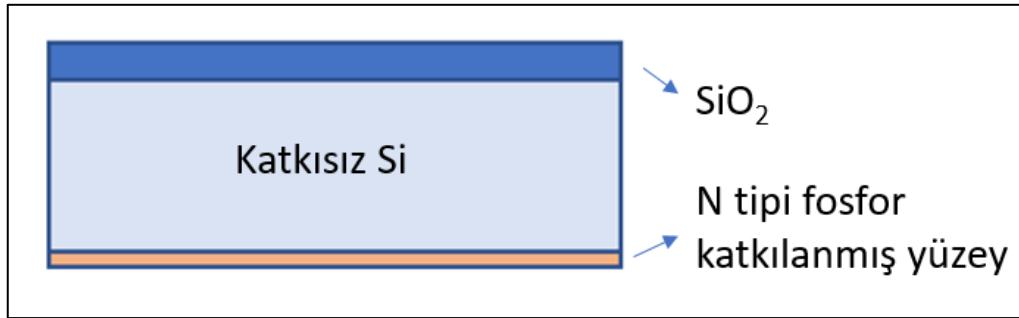


içerisine bir tutucu yardımıyla daldırılmış ve 1 dakika bekledikten sonra durulama ve kurulama işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4-11 Arka yüzey katkılama sonrası oluşan fosfor-cam tabakanın aşındırılması.

Arka yüzey katkılama ve fosfor-cam tabakanın aşındırılması sonrasında aygıtın kesit görüntüsü Şekil 4-12’de gösterilmiştir.



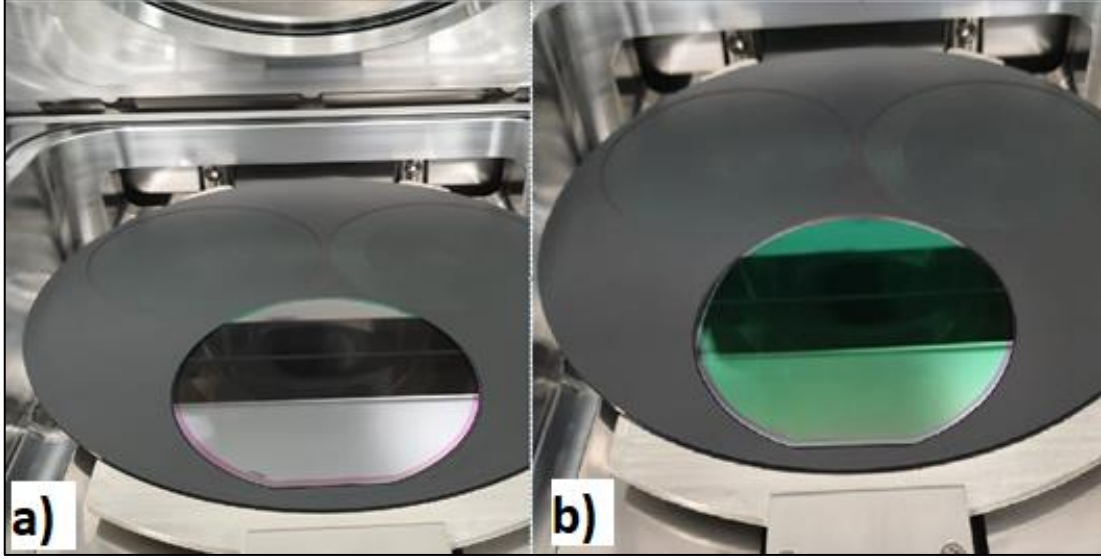
Şekil 4-12 Arka yüzey katkılama ve fosfor-cam tabaka aşındırılması sonrası aygıtın kesit görüntüsü.

#### 4.6 Arka Yüzey Koruma Kaplaması

Arka yüzeye, mikrofabrikasyonun son adımı olan metalizasyon kaplamasına kadar herhangi bir işlem uygulanmayacağı için öncelikle ön yüzey katkılama esnasında arka yüzeyi korumak ve devamında da diğer ön yüzey işlemleri yapılırken alttaşın arka yüzeyinin çizilmesi, kirlenmesi gibi etkileri ortadan kaldırmak amacıyla  $\text{SiO}_2$

koruma kaplaması yapılmıştır. SAMCO marka PECVD cihazında 250 °C sıcaklıkta, silan ( $\text{SiH}_4$ ) ve nitrür oksit ( $\text{N}_2\text{O}$ ) gazları kullanılarak 7 dakika boyunca  $\text{SiO}_2$  tabakası büyütülmüştür. FILMMETRICS cihazında 5 farklı noktadan yapılan incefilm karakterizasyon işleminde  $595\pm 8$  nm film kalınlığı ölçülmüştür.

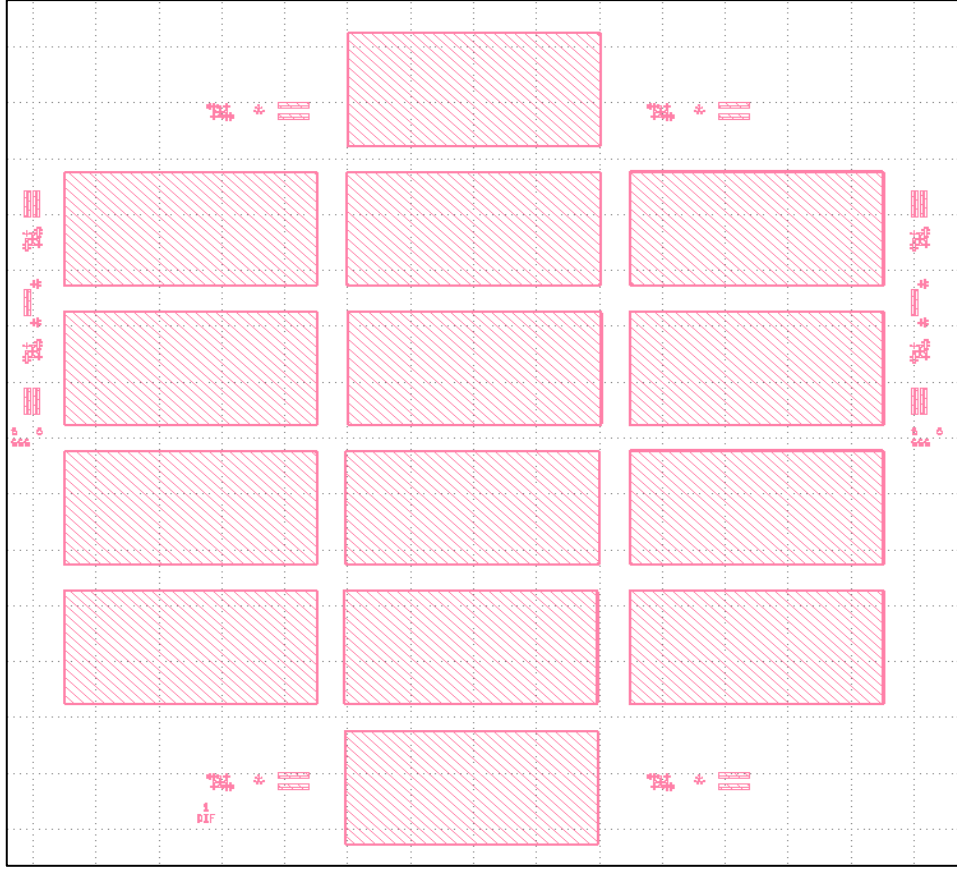
Alttaşların proses öncesi ve sonrası cihaz üzerindeki görüntüleri Şekil 4-13'te gösterilmiştir.



Şekil 4-13 Arka yüzey PECVD  $\text{SiO}_2$  koruma kaplama a) öncesi b) sonrası.

#### 4.7 Ön Yüzey Şekillendirme Fotolitografisi

Ön yüzey bor katkılama işleminden önce aygıtların şeklini oluşturacak fotolitografi adımının maskesi şekil 4-14'te görüleceği üzere KLAYOUT yazılımında tasarlanmıştır.



Şekil 4-14 Ön yüzey şekillendirme fotolitografisi maske tasarım görüntüsü.

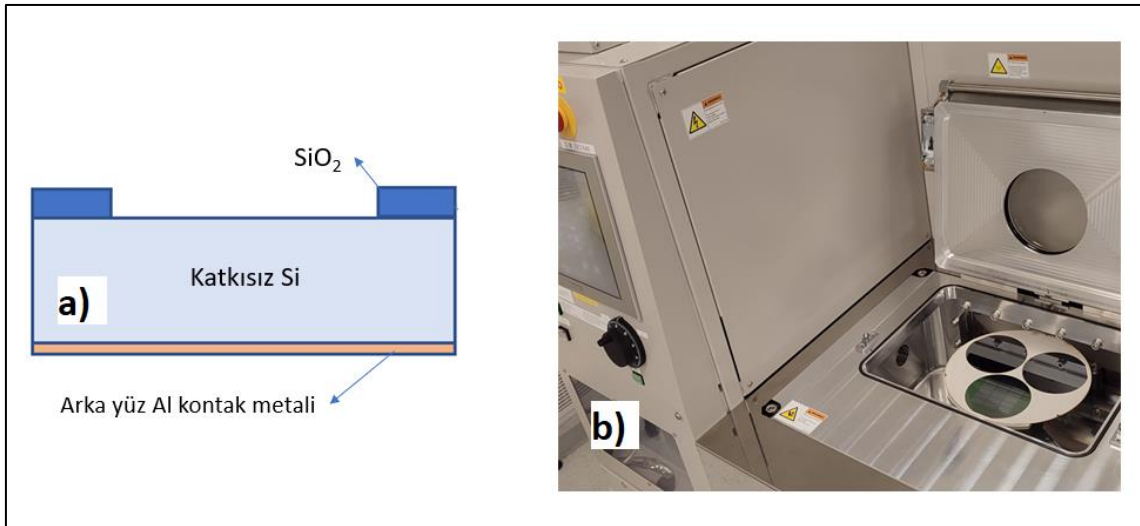
Altaşların fotolitografi prosesinde ilk olarak şekillendirme yapılacak yüzeye MICROCHEMICAL marka pozitif fotorezist serilmiştir. Daha sonra altaşlara, içerisinde bulunan solventlerin uzaklaştırılması ve fotorezistin altaşa tutunumunun artırılması amacıyla, ısıtıcı üzerinde 100 °C sıcaklıkta fotorezist ön pişirme işlemi uygulanmıştır. Fotorezist serim işlemi tamamlanan altaşlar SUSS marka MA6 pozlama sisteminde 16 mWatt/cm<sup>2</sup> güç yoğunluğunda UV ışık ile pozlanmıştır. Ardından banyolama işlemi için MICROCHEMICAL marka NaOH bazlı çözücü ile, pozlanmış bölgeler çözdürülüp son olarak ısıtıcı üzerinde 130°C sıcaklıkta 90 saniye boyunca son pişirme işlemi yapılan altaşların fotolitografi işlemleri tamamlanmıştır.

#### 4.8 Ön Yüzey Şekillendirme Kuru Aşındırması

Bu bölümde, ön yüzey şekillendirme fotolitografisi tamamlanan altaşların katkılama prosesi öncesi kuru SiO<sub>2</sub> aşındırmalarından bahsedilecektir. A1, A2 altaşları daha

kalın ön yüzey oksit tabakasına sahip olduğu için A3 alttaşından daha uzun süre aşındırılmıştır. Bu kapsamda alttaşlar SAMCO marka ICP-RIE cihazına konularak, 25 cm<sup>3</sup>/dakika triflorometan (CHF<sub>3</sub>) ve 4 cm<sup>3</sup>/dakika oksijen gaz karışımı ortamında A1 ve A2 alttaşları 7 dakika, A3 Alttaşı ise 3 dakika süre ile aşındırılmıştır. Bahsedilen cihaz fiziksel ve kimyasal aşındırmanın bir arada gerçekleştiği bir sistemdir. Cihaz proses kazanının içerisine gönderilen oksijen gazı fiziksel aşındırma, CHF<sub>3</sub> gazı ise kimyasal yöntem ile aşındırma gerçekleştirmektedir. SiO<sub>2</sub> aşındırması fiziksel aşındırmanın baskın olduğu bir aşındırmadır. Cihazda, alttaşın aşırı ısınmasını engellemek için örnekler alttaşların konulduğu plaka altından helyum gazı ile soğutulmaktadır.

Aşındırma prosesinin ardından, alttaşların ön yüzeyini maskeleyen fotorezist kalıntıları aseton ve izopropil alkol (IPA) ile temizlenerek alttaşlar durulanıp kurulanmıştır. Temizlik işleminin ardından DEKTAK marka profilometre cihazı ile 5 farklı noktadan alınan derinlik ölçümlerinde A1 örneği için 1210±65 nm, A2 örneği için 1205±62 nm, A3 örneği için ise 505±30 nm derinlik değerleri elde edilmiştir. Bölüm 4.5'te aktarılan, arka yüzeyde oluşan fosfor-cam tabakanın ıslak aşındırılması esnasında ön yüzeydeki SiO<sub>2</sub>'den 40-60 nm aşındığı düşünüldüğünde Silisyum içerisine de 30-50 nm girildiği sonucuna varılmıştır. Aygıtın kesit görüntüsü ve aşındırma sonrası cihaz üzerindeki alttaş görüntüsü Şekil 4-15'teki gibidir.



Şekil 4-15 a) ön yüzey şekillendirme aşındırma sonrası aygıtın kesit görüntüsü  
b) alttaşın ICP-RIE cihazı üzerindeki görüntüsü.

#### 4.9 Ön yüzey P Tipi Bor Katkılama

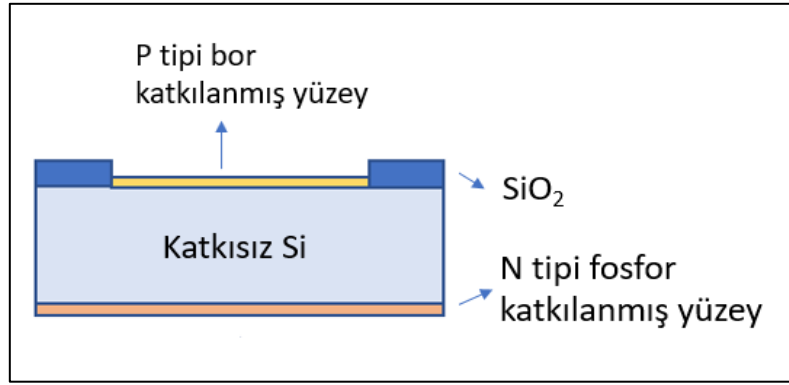
Aygıtlar ön yüzey şekillendirilmesi tamamlandıktan sonra P tipi bor katkılama işlemine hazır hale getirilmiştir. Çizelge 4-1'de gösterildiği üzere, 3 farklı alttaş için 2 farklı P tipi bor katkılama adımı gerçekleştirilecektir. Öncelikle TECHNEGLASS marka bor kaynaklarına, fosfor kaynaklarında olduğu gibi 1100°C sıcaklıkta 13 saat kalacak şekilde yaşlandırma işlemi yapılmıştır. Aygıtların katkılama işlemlerinde ilk olarak A1 ve A3 örneklerinin 1100 °C sıcaklıktaki ön yüz katkılama adımları, daha sonra A2 örneğinin 1000 °C ön yüz katkılama prosesleri gerçekleştirilmiştir. Tüm proseslerde fırın kuvarz tüpüne 4 litre/dakika akış hızında azot gazı ve 50 cm<sup>3</sup>/dakika akış hızında oksijen gazı verilmiştir. Katkılama esnasında oluşan Bor-cam tabakasının, fosfor-cam tabakasına göre daha yoğun olması sebebiyle prosesin bitmesinin ardından aşındırılması da daha zordur. Bu nedenle katkılama prosesi bitiminde fırın sıcaklığı düşerken 900°C-700°C sıcaklık aralığında alttaşlar üzerine 5 litre/dakika yüksek akış hızında saf oksijen gazı verilmektedir. Böylelikle oluşan bor-cam tabakasındaki oksijen miktarı arttırılmakta ve bu tabakanın aşındırılma işlemi daha kolay hale getirilmektedir. Proses sıcaklığını homojen uygulayabilmek için 3 bölge kontrol edilebilir yüksek sıcaklık fırını kullanılmaktadır. Kuvarz kayık üzerine yerleştirilen alttaş ve kaynakların, fırın kuvarz tüpü içerisindeki görüntüsü Şekil 4-16'da gösterilmiştir.



Şekil 4-16 a) 3 bölge ön yüz bor katkılama fırınının termoelektrik çiftleri  
b) termal blok c) alttaşların bulunduğu kuvarz kayık

#### 4.10 Ön Yüzey Katkılama Sonrası oluşan Bor-cam Tabakasının Islak Aşındırılması

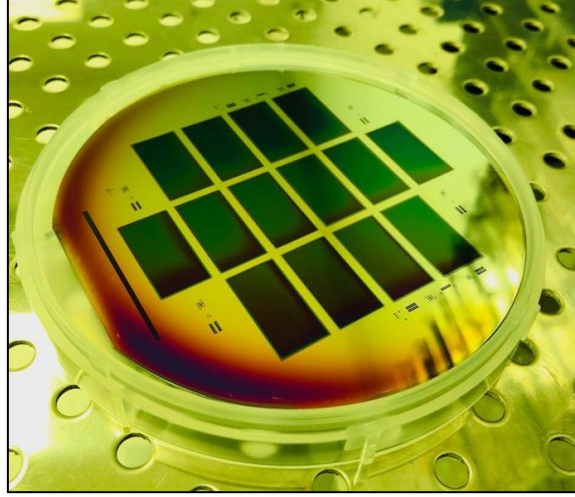
Altaşların arka yüzey katkılama proseslerinde fosfor-cam tabakası olduğu gibi, ön yüzey katkılama proseslerinde de bor-cam tabakası oluşmaktadır ve bu tabakanın aşındırılması gerekmektedir. Proses boyunca yüksek ve düşük akışlarda oksijen gazı verilerek HF ile çözünebilir hale getirilen bu tabaka, tıpkı fosfor-cam tabakasında olduğu gibi %5 HF içerisinde bu kez 8 dakika süre tutularak aşındırılmıştır. Ön yüzey katkılama ve bor-cam tabakasının aşındırılması sonrası aygıt kesit görüntüsü Şekil 4-17'deki gibidir.



Şekil 4-17 Ön yüzey katkılama ve bor-cam tabaka aşındırılması sonrası aygıtın kesit görüntüsü.

#### 4.11 Ön Yüzey Yansımaya Önleyici Tabakanın Kaplanması

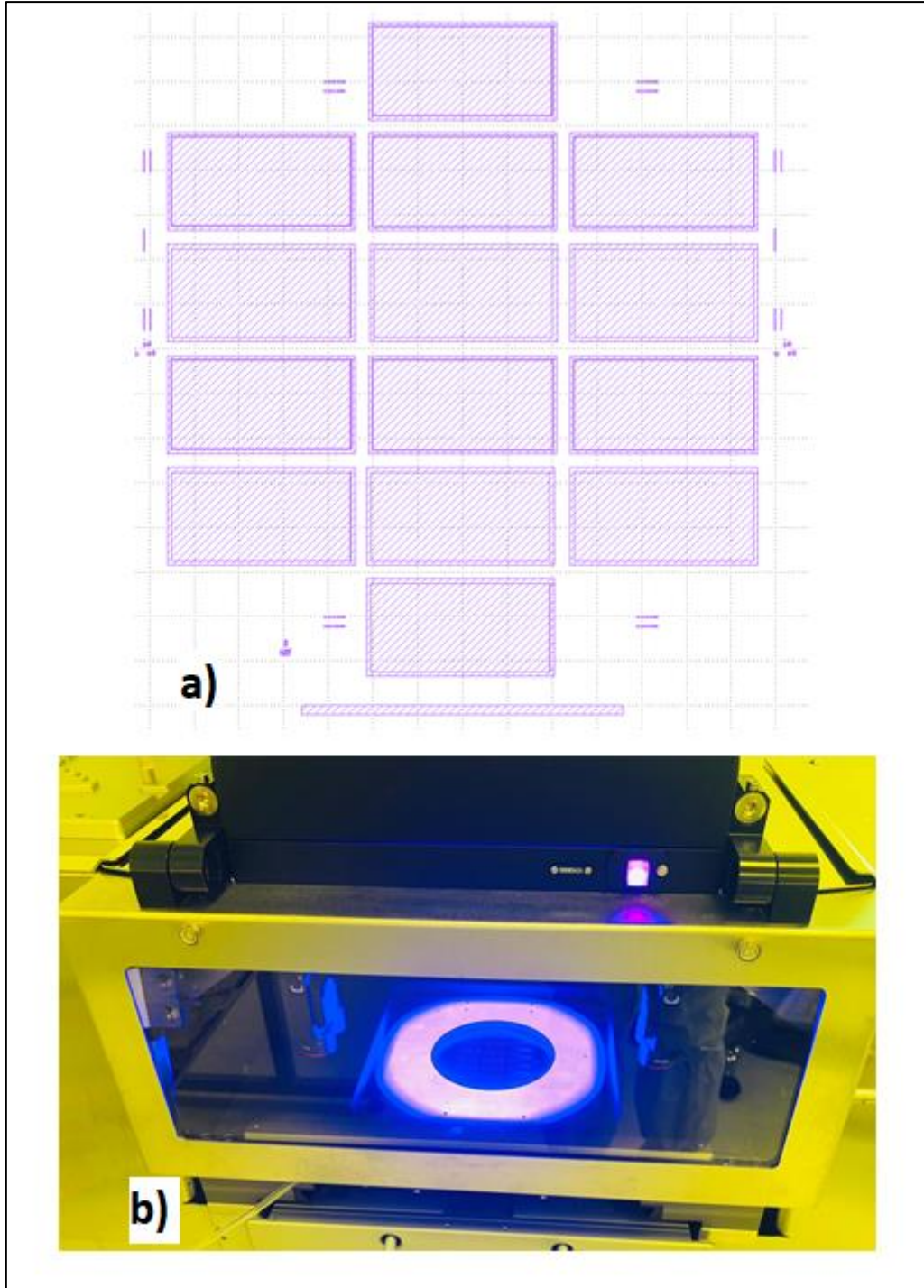
Şekillendirme ve katkılama sonrası Silisyum tabakanın üstüne yansımaya önleyici  $\text{Si}_3\text{N}_4$  kaplaması gerçekleştirilmiştir. Altaşlar SAMCO marka PECVD cihazında 275 °C sıcaklıkta, silan ( $\text{SiH}_4$ ), amonyak ( $\text{NH}_3$ ) ve azot gazı kullanılarak toplam 4 dakika süre ile  $\text{Si}_3\text{N}_4$  tabakası büyütülmüştür. Altaşların yansımaya önleyici tabaka kaplanması sonrası örnek görüntüsü Şekil 4-18'de gösterilmiştir. FILMMETRİCS cihazında 5 farklı noktadan yapılan incefilm karakterizasyon işleminde  $105 \pm 5$  nm film kalınlığı ve 1.86 kırma indisi ölçülmüştür.



Şekil 4-18 Yansıma önleyici tabakanın kaplanması sonrası alttaş görüntüsü.

#### 4.12 Ön Yüzey Yansıma Önleyici Tabakanın Şekillendirme Fotolitografisi

Ön yüzey yansıma önleyici tabaka için fotolitografi prosesinde ilk olarak şekillendirme yapılacak yüzeye tekrardan MICROCHEMICAL marka pozitif fotorezist serilmiştir. Daha sonra alttaşlara ısıtıcı üzerinde 100 °C sıcaklıkta fotorezist ön pişirme işlemi uygulanmış, fotorezist serim işlemi tamamlanan alttaşlar SUSS marka MA6 pozlama sisteminde 16 mWatt/cm<sup>2</sup> güç yoğunluğunda UV ışık ile pozlanmıştır. Ardından banyolama işlemi için MICROCHEMICAL marka NaOH bazlı çözücü ile, pozlanmış bölgeler çözdürülüp son olarak ısıtıcı üzerinde 130°C sıcaklıkta 90 saniye boyunca son pişirme işlemi yapılan alttaşların fotolitografi işlemleri tamamlanmıştır. Alttaşların KLAYOUT yazılımında tasarlanan fotolitografi maske tasarımı ve pozlama işlemi esnasında cihaz üzerindeki görüntüsü şekil 4-19'da gösterilmiştir.



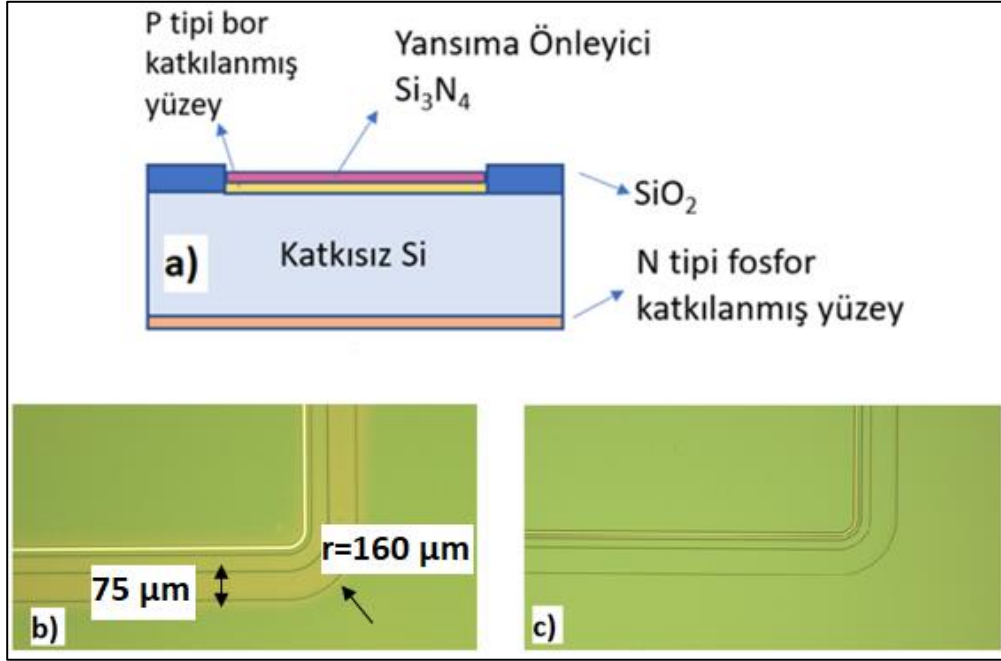
Şekil 4-19 a) yansıma önleyici fotomaske tasarımı b) alltaşın pozlama işlemi esnasında cihaz üzerindeki görüntüsü.

#### 4.13 Ön Yüzey Yansıma Önleyici Tabakanın Şekillendirme Islak Aşındırması

Bu adım, alltaşların tüm yüzeyine kaplanan yansıma önleyici  $\text{Si}_3\text{N}_4$  tabakanın, metalizasyon yapılacak hat kısımlarının aşındırılması ile metallerin Silisyum



yüzeyden direkt olarak kontak alabilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Alttaşlar %5 HF içerisinde 1 dakika boyunca tutularak metal gelecek hat üzerindeki  $\text{Si}_3\text{N}_4$  tabaka aşındırılmış, daha sonra alttaş üzerine serilmiş fotorezist tabaka aseton, IPA ve DIS ile temizlenerek kurutulmuştur. Alttaş üzerindeki bir aygıtın aşındırma sonrası kesit görüntüsü ve aşındırma öncesi, sonrası optik mikroskop görüntüsü Şekil 4-20’de gösterilmiştir.

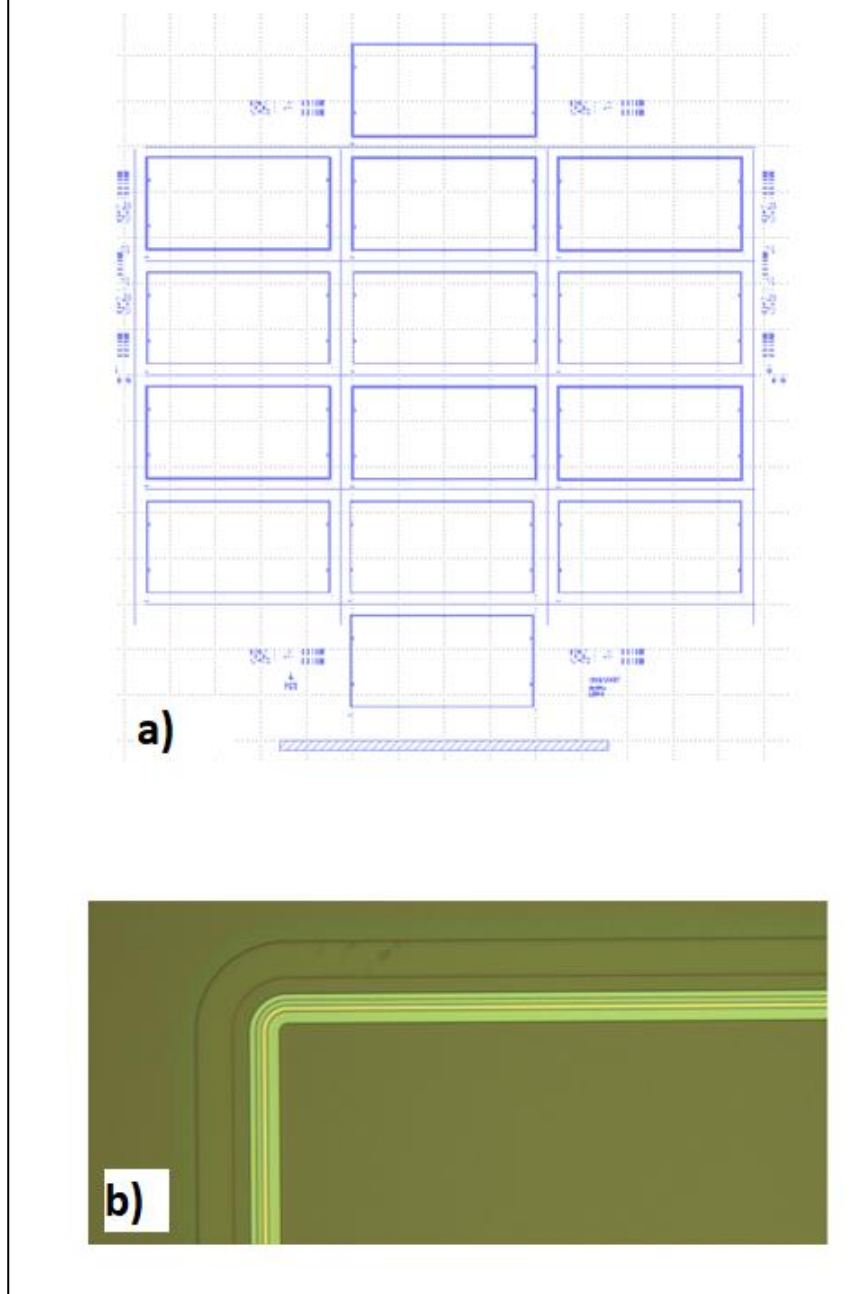


Şekil 4-20 a) Aşındırma sonrası aygıt kesit görüntüsü b) aşındırma öncesi optik mikroskop görüntüsü c) aşındırma sonrası optik mikroskop görüntüsü.

#### 4.14 Ön Yüzey Metalizasyon Şekillendirilme Fotolitografisi

Metalizasyon fotolitografi prosesi için tüm alttaşların ön yüzeyine MICROCHEMICAL marka negatif fotorezist serilmiş ve sonrasında alttaşlara, içerisinde bulunan solventlerin uzaklaştırılması ve fotorezistin alttaşta tutunumunun artırılması amacıyla, ısıtıcı üzerinde  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta fotorezist ön pişirme işlemi uygulanmıştır. Fotorezist serim işlemi tamamlanan alttaşlar SUSS marka MA6 pozlama sisteminde  $16 \text{ mWatt/cm}^2$  güç yoğunluğunda UV ışık ile pozlanmıştır. Son olarak alttaşlar banyolama işlemi için MICROCHEMICAL marka NaOH bazlı çözücü ile, pozlanmamış bölgeler çözdürülüp fotolitografi işlemleri tamamlanmıştır. Alttaşların KLAYOUT yazılımında tasarlanan fotolitografi maske tasarımı ve aygıtın

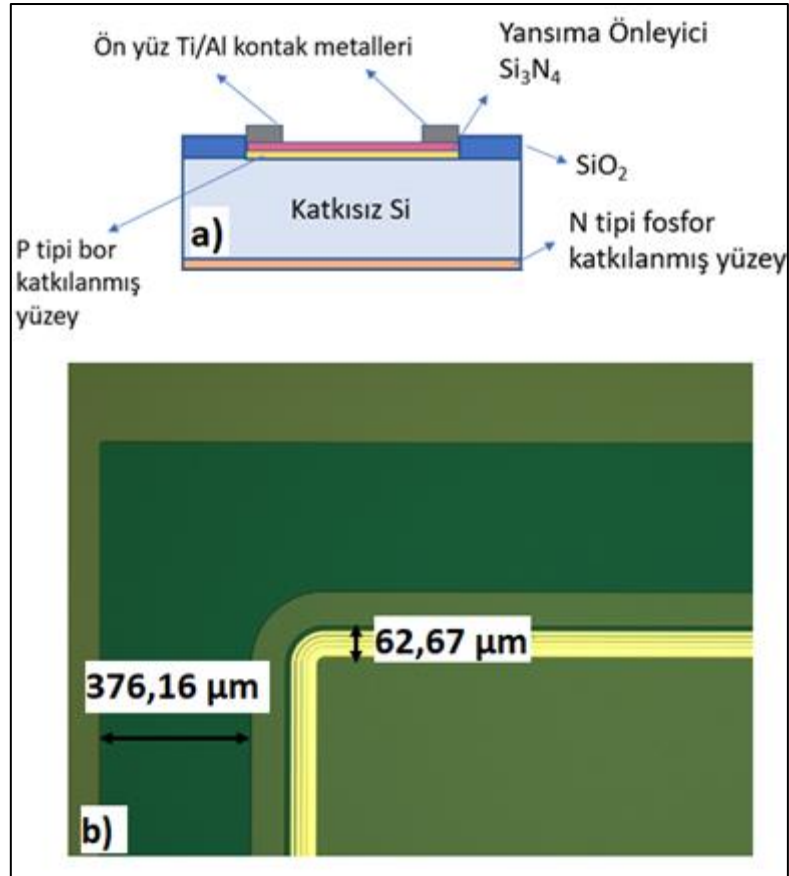
metalizasyon şekillendirme prosesi sonrası optik mikroskop görüntüsü Şekil 4-21’de gösterilmektedir.



Şekil 4-21 a) metalizasyon fotomaske tasarımı b) alttaşlarda bulunan bir aygıtın metalizasyon şekillendirme sonrası optik mikroskop görüntüsü.

#### 4.15 Ön Yüzey Metalizasyonu

Şekillendirme işlemleri tamamlanan tüm alttaşlara, ön yüzeyden kontak alabilmek için elektron demeti buharlaştırma sistemi ile metal kaplama işlemi yapılmıştır. Bunun için alttaşlar LEYBOLD marka elektron demeti ile buharlaştırma cihazına yüklenip 50 nm titanyum (Ti) adezyon kaplaması üzerine 150 nm alüminyum (Al) malzeme ile kaplanmıştır. Cihaz içerisinde kullanılan potalar ve metaller KURT J. LESKER markadır. Metalizasyon işlemleri tamamlanan alttaşlar daha sonra cam petri kaplarında 4 saat aseton içerisinde bekletilerek istenmeyen bölgelerdeki metallerin alttaş üzerinden kaldırılma işlemi gerçekleştirilmiştir. Metaller en son IPA ve DIS ile temizlenerek azot ile kurutulmuştur. Prosesin sona ermesinin ardından DEKTAK profilometre ile 5 farklı noktadan yapılan metal kalınlık ölçümünde toplam  $200 \pm 20$  nm sonuç elde edilmiştir. 20 nm'lik fark cihazın hata payı içerisinde. Metalizasyon prosesleri tamamlanan bir aygıtın kesit görüntüsü ve optik mikroskop görüntüsü Şekil 4-22'deki gibidir.



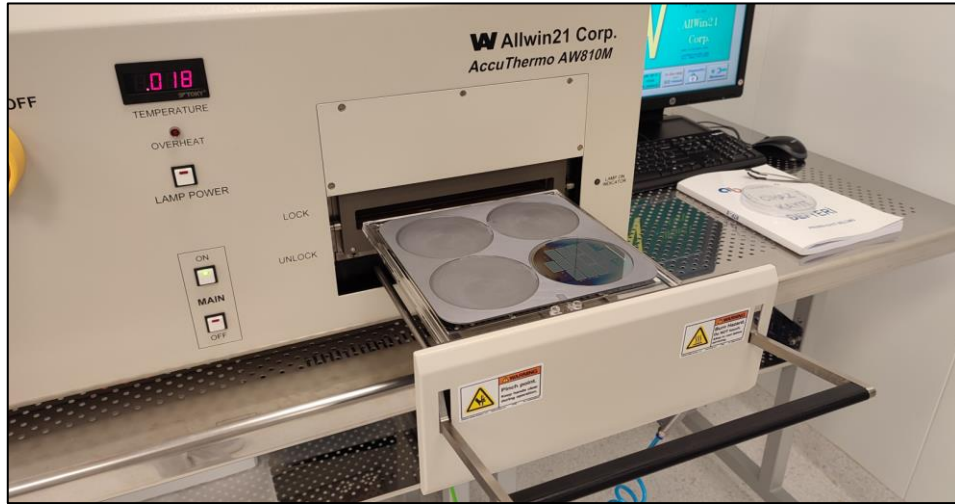
Şekil 4-22 Metalizasyon sonrası; a) aygıt kesit görüntüsü b) aygıt optik mikroskop görüntüsü.

#### 4.16 Arka Yüzey SiO<sub>2</sub> Koruma Kaplamasının Aşındırılması

Arka yüzeyde bulunan koruma amaçlı oksit kaplaması bu adımda aşındırılmıştır. Bu oksit tabakasının, ön yüzeye kaplanan metallerin tavlama adımından önce aşındırılmasının sebebi tavlama sürecindeki yüksek sıcaklık etkisi ile arka yüzey katmanının bozulmasının önüne geçebilmektedir. Alttaşılar bölüm 4.3'te gösterilen tutucular yardımıyla ön yüz korunarak, HF içerisinde 1 dakika süre ile tutulmuş ve arka yüzey oksit tabakası tamamen aşındırılmıştır.

#### 4.17 Ön Yüzey Metalizasyon Tavlaması

Alttaşıların ön yüzeyine kaplanan metallerin omik kontak oluşturabilmesi için tavlama adımı gerçekleştirilmiştir. Alttaşılar Şekil 4-23'te gösterildiği üzere, ALLWIN marka RTP cihazında içerisinde %5 oranında hidrojen gazı bulunan, kök gazı da denilen hidrojen+azot gaz ortamında 425 °C sıcaklıkta 15 saniye tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4-23 Alttaşıların tavlama işlemi sonrası cihaz üzerindeki görüntüsü.

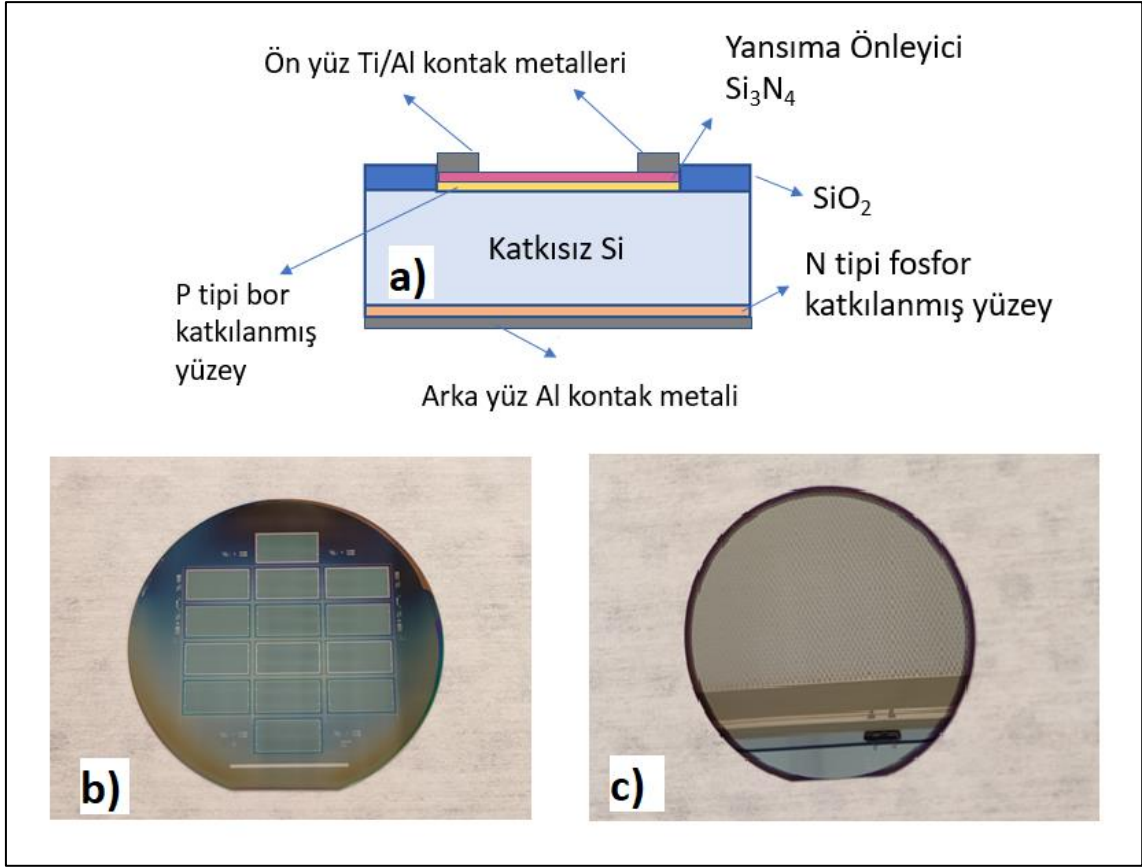
Alttaşıların, tavlama sisteminden alınan zamana bağlı sıcaklık eğrisi ise Şekil 4-24'te gösterilmiştir. Lacivert renk ile gösterilen eğri gerçek sıcaklığı göstermektedir.



Şekil 4-24 Alttaşların tavlama işlemindeki zamana bağlı sıcaklık eğrisi.

#### 4.18 Arka Yüzey Metalizasyonu

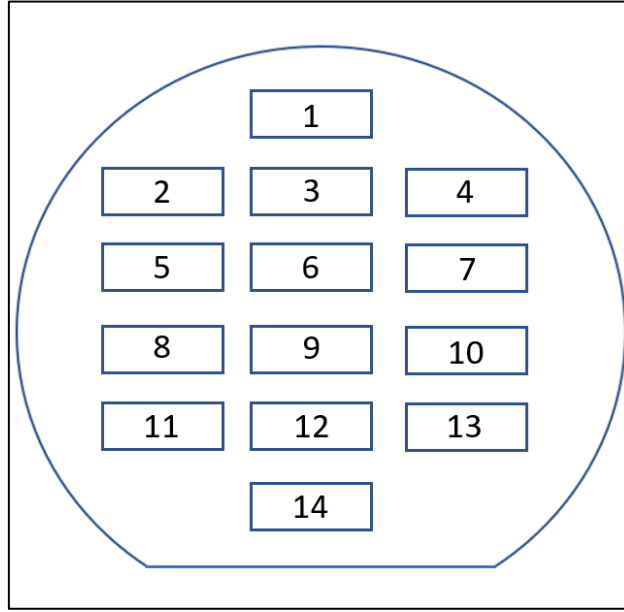
Silisyum tabanlı dedektör üretiminin son mikrofabrikasyon adımında, tüm arka yüzeye şekillendirme olmaksızın alüminyum metalizasyon işlemi yapılmıştır. Alttaşlar yeniden LEYBOLD marka elektron demeti buharlaştırma sistemine yüklenerek tüm arka yüzeye 3000 nm kalınlığında alüminyum metali kaplanmıştır. Aygıtın kesit görüntüsü ve bir alttaşın ön ve arka yüzey final görüntüsü Şekil 4-25'te gösterilmiştir.



Şekil 4-25 Fabrikasyon sonrası a) aygıt kesit görüntüsü b) alttaşı ön yüzey görüntüsü c) alttaşı arka yüzey görüntüsü.

## 5. DENEYSEL SONUÇLAR

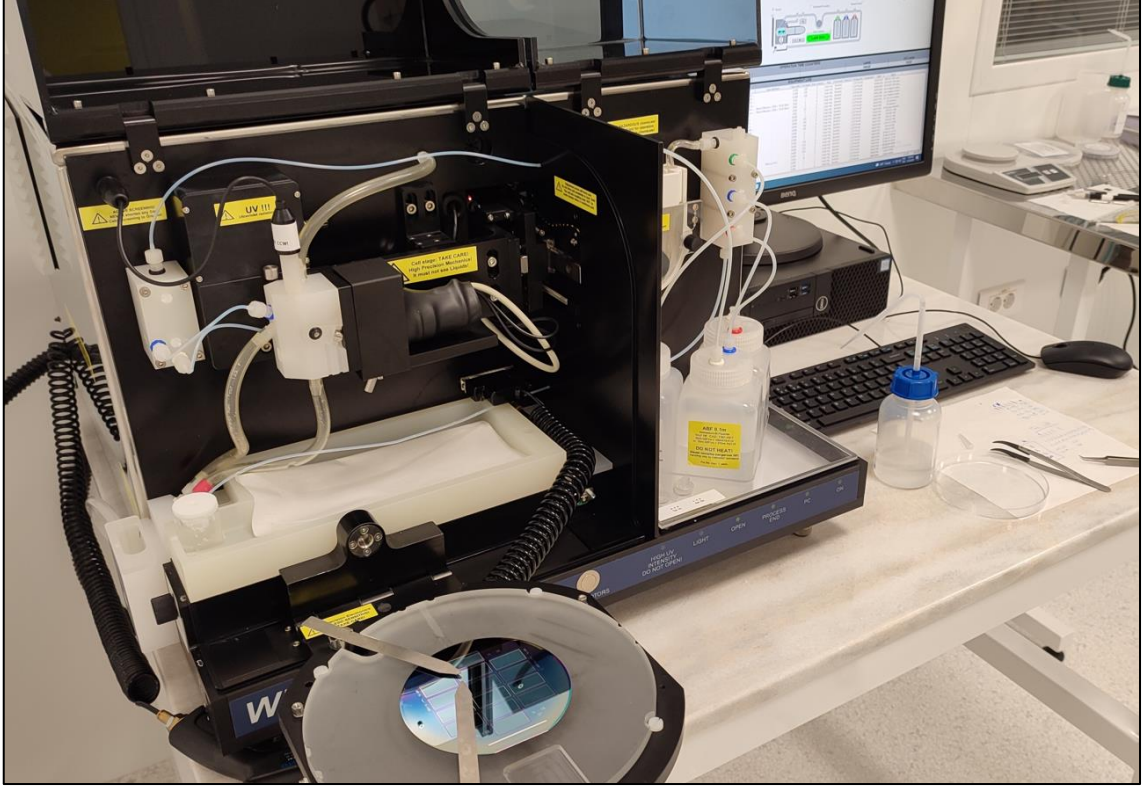
Bu bölümde mikrofabrikasyon süreçleri tamamlanan 3 adet Silisyum alıtışın katkılama ve metalizasyon karakterizasyonlarının yanı sıra her bir alıtış üzerindeki farklı fotodedektörlerin elektriksel karakterizasyonları gerçekleştirilecektir. Alıtışlar üzerinde bulunan fotodedektörlerin numaralandırılması Şekil 5-1'de gösterildiği gibidir.



Şekil 5-1 Fotodedektör numaraları.

### 5.1 Ön Yüzey Katkılama ECV Ölçümleri

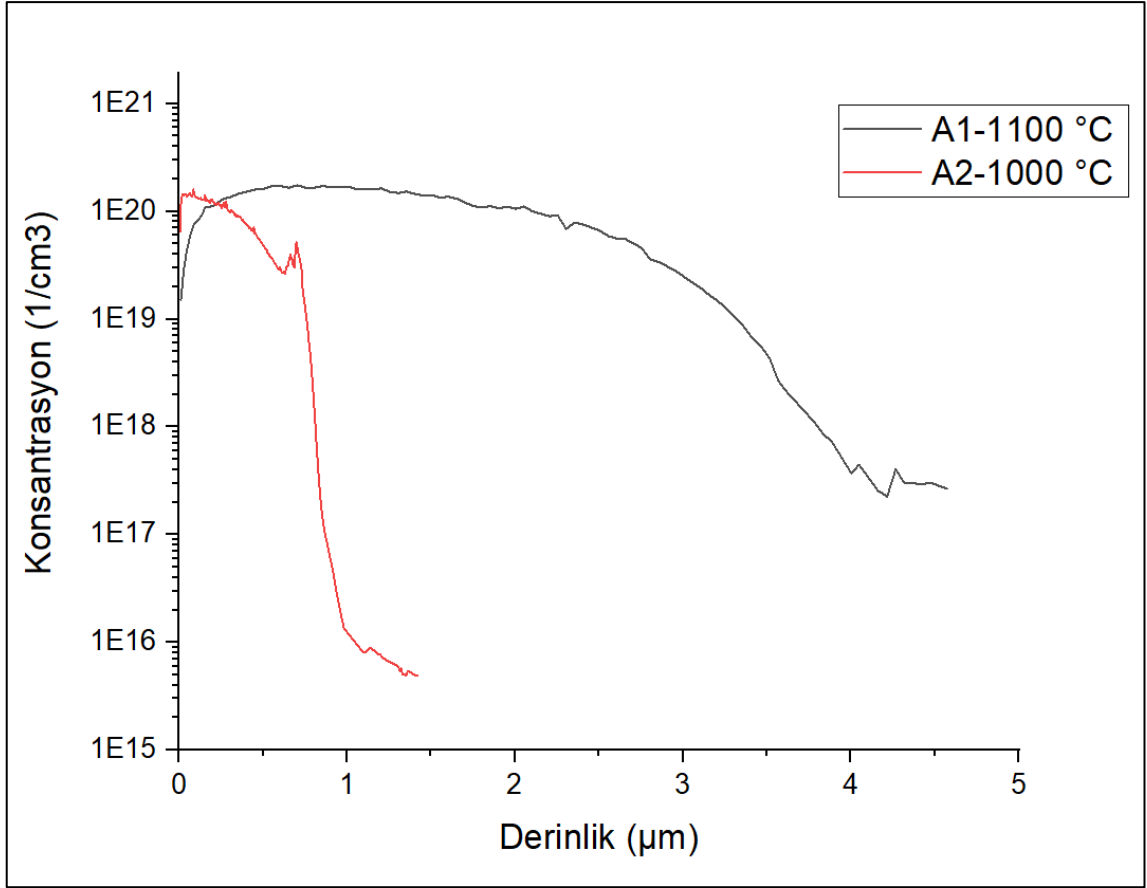
İki farklı sıcaklıkta ön yüzey katkılama işlemleri gerçekleştirilen A1 ve A2 örneklerinin derinliğe bağlı konsantrasyon ölçümleri Şekil 5-2'de gösterildiği gibi WEP CONTROL marka ECV cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5-2 Altaşın ECV ölçüm cihazı üzerindeki görüntüsü.

1100 °C sıcaklıkta bor katkılama işlemi yapılan A1 ve 1000 °C sıcaklıkta bor katkılama işlemi yapılan A2 altaşlarının, derinliğe bağlı ölçülen konsantrasyon verileri ORİGIN LAB yazılımında üst üste çizdirilerek Şekil 5-3'te gösterilmiştir. 100 °C katkılama sıcaklığı farkı sonucu oluşan katkılama derinliği farkı yürütülen literatür ve simülasyon çalışmaları ile uyumludur [10]. Grafikteki küçük pikler ölçümden kaynaklı hatalar olup eğrilerin simülasyon çalışmalarında olduğu gibi arka plan konsantrasyon seviyesine ( $10^{14}$ ) ulaşmaması cihazın çalışma limitleri ile ilgilidir.

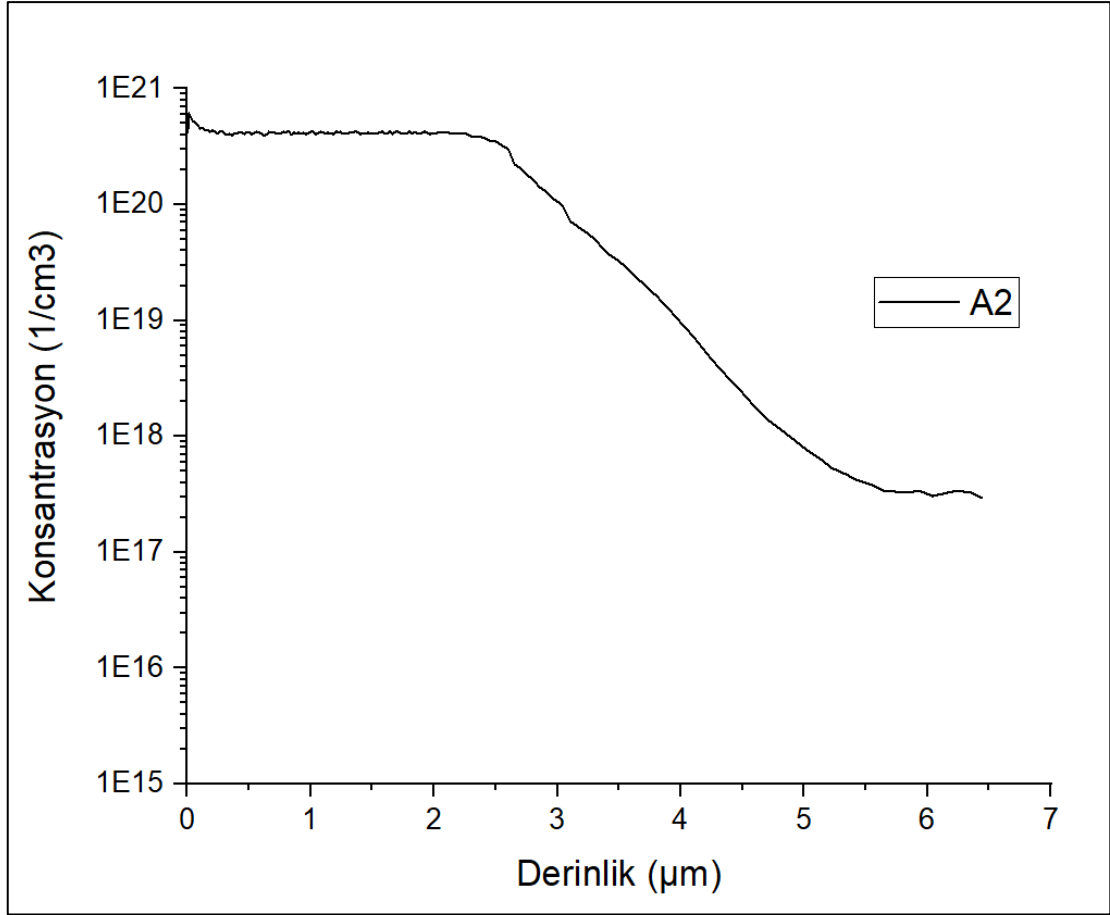




Şekil 5-3 A1 ve A2 alttaşlarının derinliğe bağlı bor konsantrasyon eğrileri.

## 5.2 Arka Yüzey Katkılama ECV Ölçümleri

Tüm alttaşlara aynı parametreler ile arka yüzey katkılama işlemi uygulandığı için sadece bir alttaşın (A2) derinliğe bağlı fosfor konsantrasyon seviyesi ölçülmüştür. Ölçüm işlemi WEP CONTROL marka ECV cihazında gerçekleştirilmiştir. Katkılama derinliğine bağlı konsantrasyon eğrisi Şekil 5-4'te gösterilmektedir.



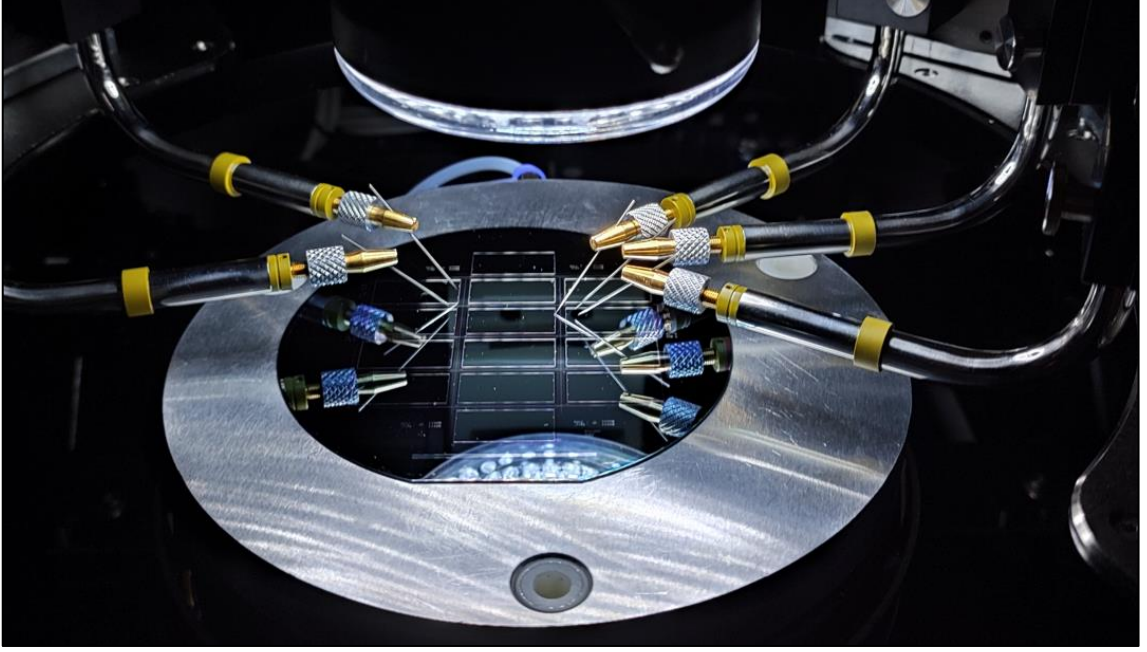
Şekil 5-4 A2 alttaşının derinliğe bağlı fosfor konsantrasyon eğrisi.

5.1'de gösterilen bor katkıli yüzeyin konsantrasyonu  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  seviyesinde görülürken fosfor katkıli yüzeyin konsantrasyonu  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  seviyelerinde olduğu görülmektedir. Fosforun Silisyum içerisinde katı çözünebilirlik limiti bordan daha yüksek olduğu için bu sonuç literatür ile uyumludur. Ayrıca fosforun Silisyum içerisine giriciliği yine bordan yüksektir ve bu nedenle katkılama derinliğinin de bordan daha yüksek olduğu görülmektedir [39].

### 5.3 I-V Ölçümleri

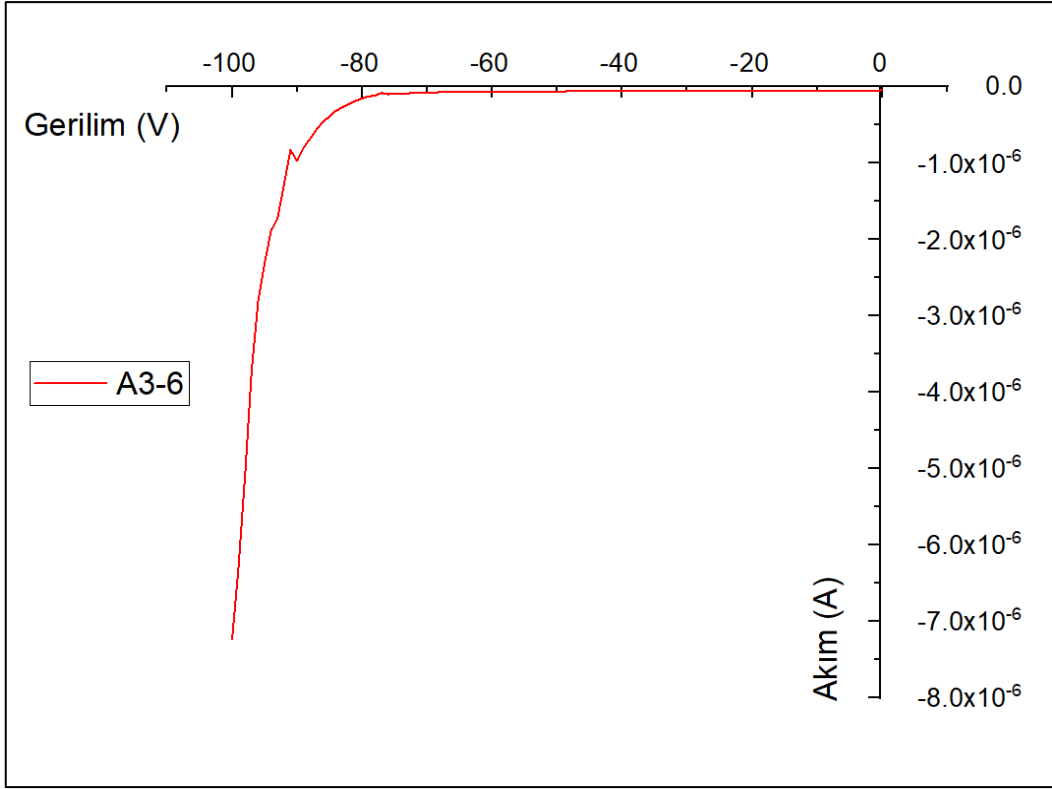
Bu bölümde A1 ve A3 alttaşlarından 1'er aygıt üzerinde gerçekleştirilen  $V_r = 0 \text{ V}$  ile  $V_r = 100 \text{ V}$  arasında I-V ölçümleri ve 2 alttaş üzerinde bulunan toplam 28 aygıtın  $V_r = 70 \text{ V}$  ters besleme gerilim değeri altında alınan karanlık akım ölçümleri aktarılacaktır.

Tüm ölçümler Şekil 5-5'te gösterildiği üzere MPI marka prob istasyonu ölçüm sistemi üzerinde gerçekleştirilmiştir.

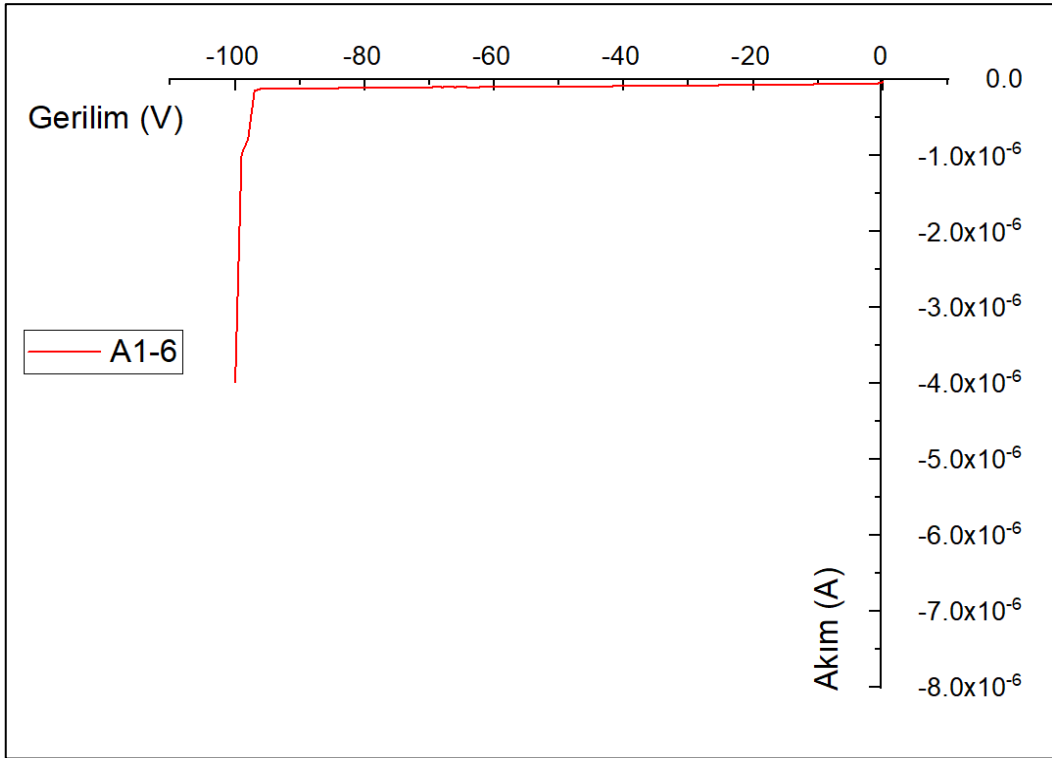


Şekil 5-5 Alttaşın prob istasyonu üzerinde I-V ve karanlık akım ölçülürken görüntüsü.

Alttaş altında bulunan iletken platform ile arka yüzey alüminyum kontak metali, ve şekilde görülen problardan bir tanesi ile de ön yüzeyde aygıt kenarında çerçeve şeklinde olan ön yüzey kontak metali arasına  $V_r = 0 \text{ V}$  ile  $V_r = 100 \text{ V}$  arası potansiyel fark uygulanmıştır. Dedektör besleme ve ölçüm işlemleri kaynak ölçüm birimi (SMU) cihazı ile gerçekleştirilmiştir. A1 ve A3 alttaşlarının orta noktalarında bulunan 6. aygıt için ölçülen I-V eğrileri Şekil 5-6 ve Şekil 5-7'de sırası ile gösterilmiştir.



Şekil 5-6 A3 alttaşı 6. fotodedektör 0 – (-100) V I-V eğrisi



Şekil 5-7 A1 alttaşı 6. fotodedektör 0 – (-100) V I-V eğrisi

A3-6 fotodedektörün -80 V, A1-6 fotodedektörünün ise - 95 V değerlerinde kırıldığı görülmektedir. Bu değerler kırılma gerilimi olarak adlandırılır ( $V_b$ ). Şekil 5-6 ve Şekil 5-7’de görülen I-V eğrileri, ters besleme altındaki bir P-I-N fotodedektörünün literatürde bulunan I-V davranışı ile uyumludur [6].

I-V eğrilerine bakıldığında, alttaşlar üzerinde bulunan fotodedektörlerin karanlık akım ölçümleri için  $V_r = 70$  V değeri, kırılma öncesinde olduğu için güvenli durmaktadır. Bu nedenle Şekil 5-8 ve Şekil 5-9’da A3 ve A1 alttaşlarının  $V_r = 70$  V ters besleme gerilim değeri için Faraday kafesi içerisinde, prob istasyonu sistemi üzerinde gerçekleştirilen karanlık akım ölçüm sonuçları sırası ile gösterilmiştir. Dedektör besleme ve ölçüm işlemleri tekrar SMU cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

	1 140 nA	
2 72 nA	3 413 nA	4 40x10 <sup>3</sup> nA
5 56 nA	6 70 nA	7 95 nA
8 95 nA	9 87 nA	10 674 nA
11 150 nA	12 76 nA	13 12x10 <sup>3</sup> nA
	14 46x10 <sup>3</sup> nA	

Çizelge 5-1 A3 alttaşı üzerindeki fotodedektörlerin karanlık akım ölçüm sonuçları.

	1 <b>42x10<sup>3</sup> nA</b>	
2 <b>95x10<sup>3</sup> nA</b>	3 <b>203 nA</b>	4 <b>27x10<sup>3</sup> nA</b>
5 <b>38x10<sup>3</sup> nA</b>	6 <b>101 nA</b>	7 <b>13x10<sup>3</sup> nA</b>
8 <b>2x10<sup>3</sup> nA</b>	9 <b>54x10<sup>3</sup> nA</b>	10 <b>152 nA</b>
11 <b>253 nA</b>	12 <b>786 nA</b>	13 <b>853 nA</b>
	14 <b>52x10<sup>3</sup> nA</b>	

Çizelge 5-2 A1 alttaşı üzerindeki fotodedektörlerin karanlık akım ölçüm sonuçları.

Çizelge üzerinde  $1 \times 10^3$  nA değerinden daha yüksek olan karanlık akım değerleri kırmızı ile işaretlenmiştir. Fotodedektör aktif alanı  $20 \times 10$  mm olduğu için bir dedektör aktif alanı  $200 \text{ mm}^2$ 'dir. Çizelge 5-3'de A3 ve A1 alttaşlarının ortalama karanlık akımları ve birim alan başına (normalize edilmiş) karanlık akım miktarları gösterilmiştir.

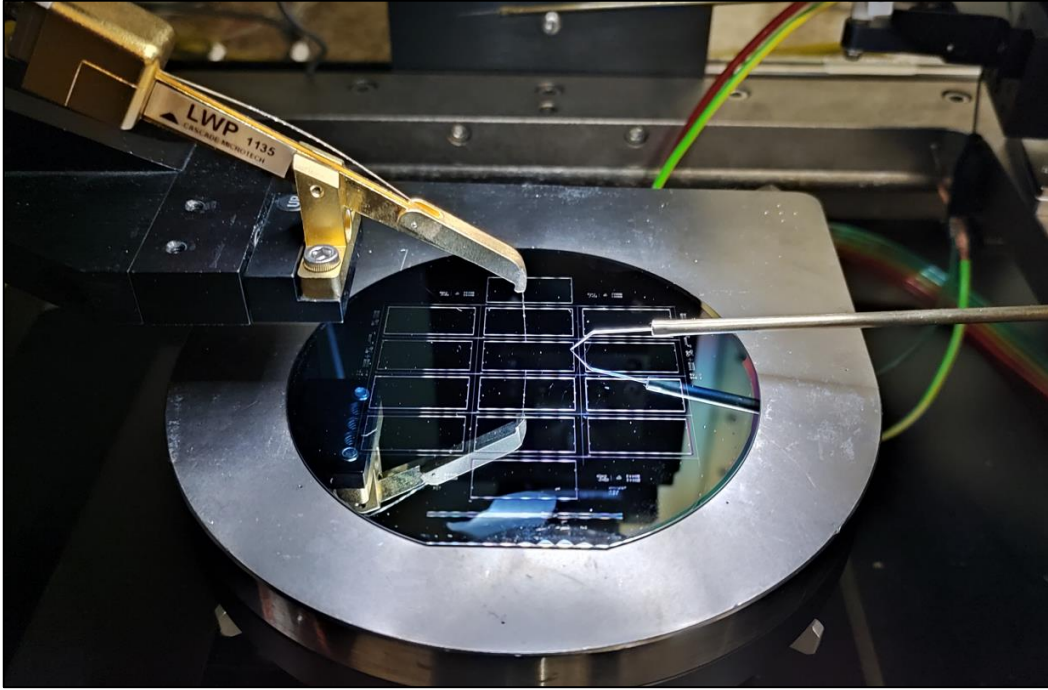
Alttaş Numarası	Ortalama Karanlık Akım Yoğunluğu	Normalize Edilmiş Karanlık Akım Yoğunluğu
A3	7137 nA	35.7 nA/mm <sup>2</sup>
A1	23.2x10 <sup>3</sup> nA	116.1 nA/mm <sup>2</sup>

Çizelge 5-3 A3 ve A1 alttaşlarının tüm dedektörler üzerinden ortalama karanlık akım ve birim alan başına karanlık akım yoğunlukları.

Çizelge incelendiğinde, ıslak termal yöntem ile oksidasyon yapılan A1 altaş fotodedektörlerinin, arındırma tekniği ile kuru oksit yapılan A3 altaş fotodedektörlerine göre 3 kattan daha fazla karanlık akım gürültü yoğunluğuna sahip olduğu görülmektedir. Altaş üretiminden kaynaklı safsızlıkların arındırma yöntemi ile azaltıldığı gürültü sonuçlarından görülmektedir ve literatür çalışmaları ile uyumludur [38].

#### 5.4 Duyarlılık Ölçümleri

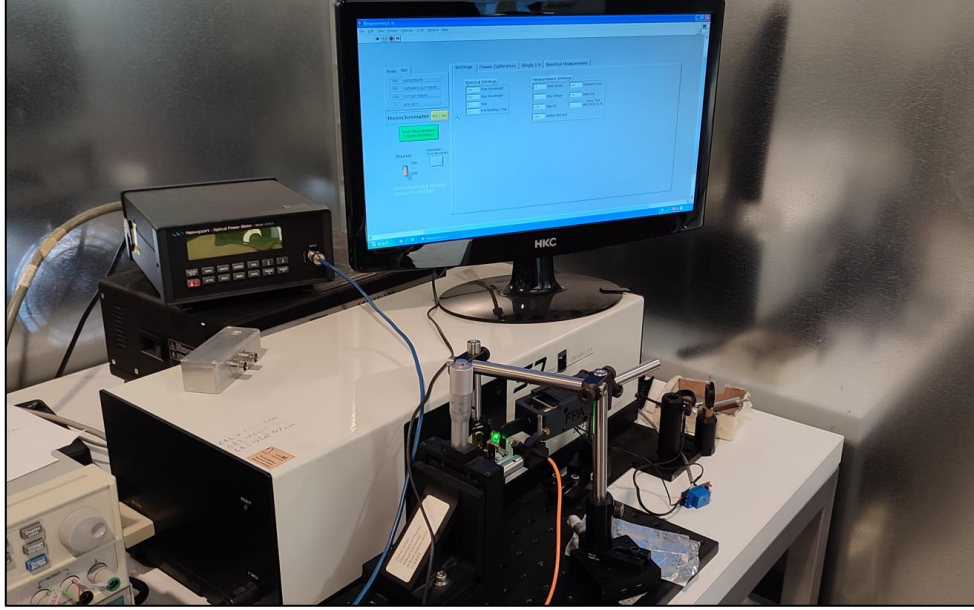
Bu bölümde farklı sıcaklıklarda ön yüzey bor katkılama prosesleri yapılan A1 ve A2 örneklerinin, dalga boyuna bağlı olarak gerçekleştirilen duyarlılık ölçümlerinden bahsedilecektir. Duyarlılık ölçüm işlemleri Faraday kafesi içerisinde, Şekil 5-8'de gösterilen CASCADE marka prob istasyonu ölçüm sisteminde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5-8 Fotodedektörlerin duyarlılık ölçümü esnasında ölçüm sistemi üzerindeki görüntüsü.

Altaş altında bulunan iletken platform ile arka yüzey alüminyum kontak metali, ve şekilde görülen prob aracılığı ile ön yüzey kontak metali arasına, tıpkı karanlık akım ölçümlerinde olduğu gibi  $V_r = 70$  V gerilim değeri kullanılmıştır. Dedektör besleme ve ölçüm işlemleri (SMU) cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Ksenon (Xe) ışık kaynağından çıkan beyaz ışık, monokromatör üzerinden istenilen dalga boylarına ayrılarak fiber prob ile ölçüm yapılacak aygıt üzerine düşürülmüş; düşürülen her dalga boyundaki ışık için karanlık akım, fotoakımdan çıkartılarak optik güce bölünmüş ve o dalga boyundaki duyarlılık değeri hesaplanmıştır. Hem monokromatörü kontrol eden hem de duyarlılık değerini hesaplayan yazılım LABVIEW yazılımında programlanmıştır. Şekil 5-9'da ışık kaynağı, monokromatör, SMU ve yazılım görüntüsü gösterilmiştir.



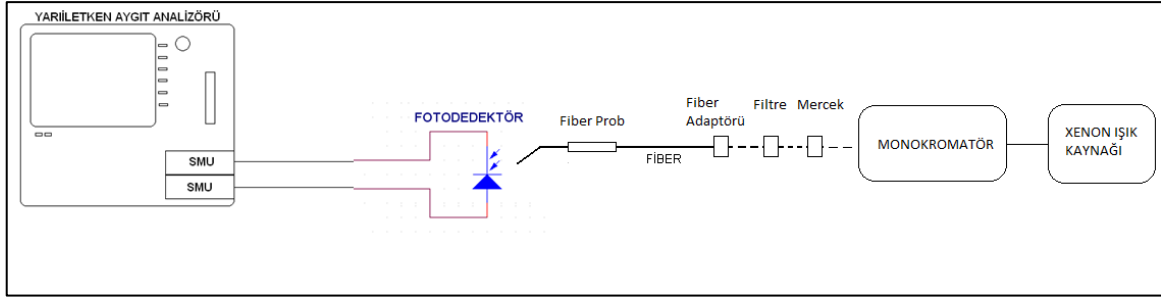
Şekil 5-9 Duyarlılık ölçüm sisteminde bulunan monokromatör, ışık kaynağı ve program görüntüsü

Bölüm 2.2.2'de de aktarılan duyarlılık bağıntısında, ölçülen fotoakımdan karanlık akım çıkartılıp optik güce bölünerek, denklem 5.1'de gösterildiği üzere duyarlılık hesaplanmıştır.

$$R = \frac{I_{ph} - I_d(A)}{P_0 (W)} \quad (5.1)$$

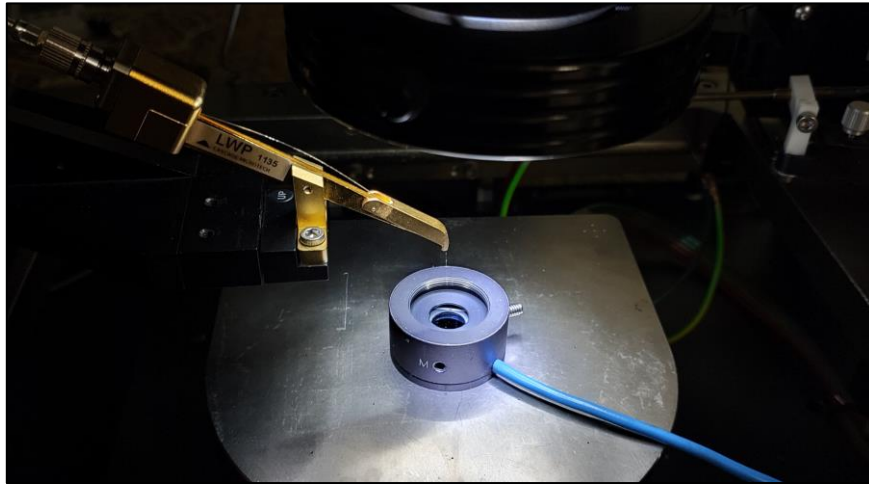
Şekil 5-10'da duyarlılık ölçüm sisteminin tüm şematiği gösterilmiştir.





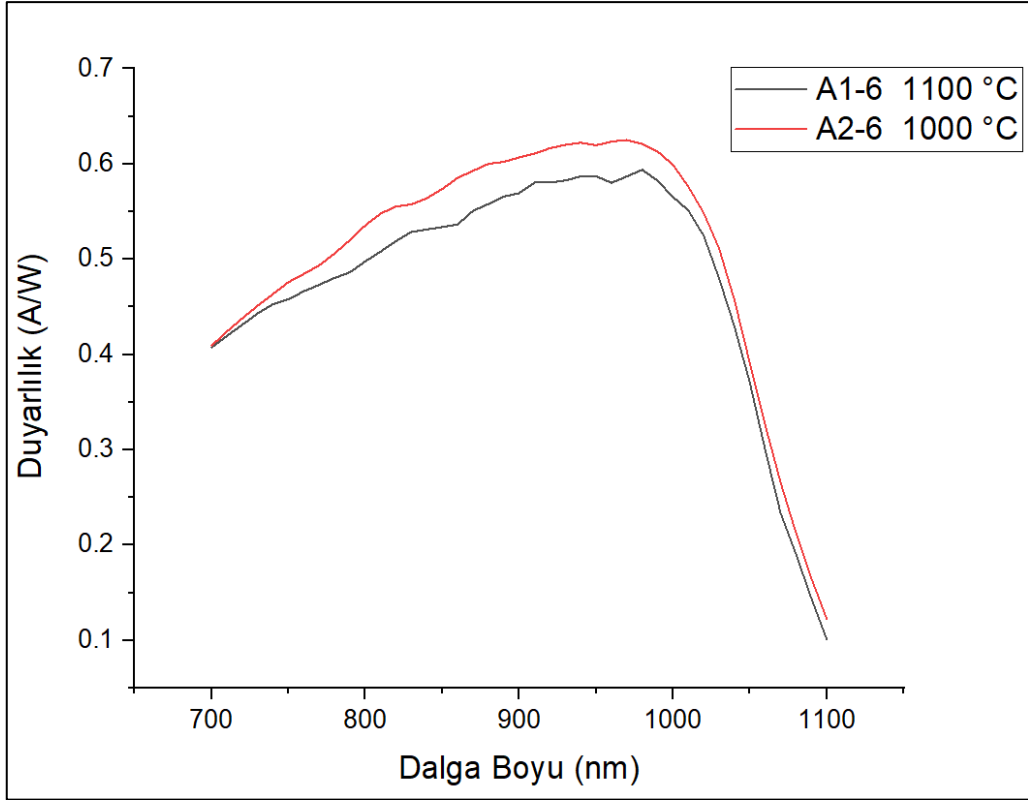
Şekil 5-10 Duyarlılık ölçüm sistem şematiği.

Duyarlılık ölçümlerine başlanmadan önce denklemde kullanılacak fiber prob çıkışındaki optik gücü hesaplamak için bir kalibrasyon işlemi gerekmektedir. Duyarlılık değeri bilinen kalibrasyon dedektörü üzerine, ölçüm yapılacak dalgaboyu aralığında ışık düşürülerek optik güç değeri hesaplanmıştır. Şekil 5-11’de kalibrasyon örneğinin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5-11 Duyarlılık ölçümü kalibrasyon örneği görüntüsü.

A1-6 ve A2-6 fotodedektörlerinin, 700 nm-1100 nm aralığında dalga boyları için 10 nm aralıklarla,  $V_r = 70$  V ters besleme gerilimi altında duyarlılık ölçümleri gerçekleştirilmiş, elde edilen veriler kullanılarak ORIGIN LAB yazılımı ile dalga boyuna bağlı duyarlılık eğrisi elde edilmiş ve Şekil 5-12’de gösterilmiştir.



Şekil 5-12 A1 ve A2 alttaşlarında bulunan 6. aygıtların dalga boyuna bağlı duyarlılık eğrileri.

Dalga boyuna bağlı olarak ölçülen duyarlılık eğrisi incelendiğinde, yüksek dalga boylarına (950 nm – 1000 nm) kadar her iki fotodedektörün de duyarlılığının arttığı, bu değerlerden sonra ise azalmaya başladığı görülmüştür. Ön yüzey bor katkılama derinliği 1  $\mu\text{m}$  olan A1-6 örneğinin, 4  $\mu\text{m}$  olan A2-6 örneğine göre daha yüksek duyarlılık seviyelerine çıktığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar hem yürütülen simülasyon çalışmaları hem de literatür ile uyum içerisindedir [40] [6].

## 6. SONUÇLAR

Yürütülen tez çalışması kapsamında, Silisyum tabanlı P-I-N yapılı fotodedektörler alttaş seviyesinden itibaren üretilmiş, devamında tez hedefleri kapsamında C-V, I-V ve duyarlılık parametrelerinin karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir.

Alttaşlar üzerinde gerçekleştirilen yüksek sıcaklık mikrofabrikasyon adımlarından p-tipi katkılama adımında, 1000 °C ve 1100 °C sıcaklık değerleri için varyasyon uygulanmış, katkılama karakterizasyonları elektrokimyasal C-V cihazı ile ölçülmüştür. P-tipi katkılama işleminde 1100 °C sıcaklık ile termal difüzyon prosesi gerçekleştirilen A1 alttaşında 4 µm derinliğinde bor katkılı tabaka kalınlığı ölçülürken, 1000 °C sıcaklık ile termal difüzyon prosesi gerçekleştirilen A2 alttaşında 1 µm bor katkılı tabaka kalınlığı ölçülmüştür. Sonrasında her iki alttaşın 6. aygıtlarının,  $V_r = 70$  V ters besleme gerilimi altında, 700 nm- 1100 nm dalga boyu aralığında duyarlılık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. A1-6 fotodedektörü için maksimum duyarlılık değeri 960 nm dalga boyunda 0.58 A/W olarak ölçülürken, A2-6 fotodedektörü için maksimum duyarlılık değeri 960 nm dalga boyu için 0.625 A/W olarak ölçülmüş ve böylece katkılama sıcaklığı 100 °C düşürülerek duyarlılık performansı %7,8 arttırılmıştır. Yapılan literatür çalışmalarında bu artış miktarının ciddi bir performans iyileştirmesi olduğu görülmektedir [41].

Oksidasyon adımı için ise, A1 ve A3 alttaşlarına sırasıyla ıslak ve arındırma yöntemi ile kuru oksidasyon prosesleri varyasyonları uygulanmış, devamında da karanlık akım gürültü sonuçları incelenmiştir. Her iki alttaş üzerindeki tüm dedektörlerin  $V_r = 70$  V ters besleme gerilimi altında karanlık akımları ölçülmüş ve birim alan başına ortalamaları hesaplanmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde ıslak termal oksidasyon yapılan A1 alttaş fotodedektörlerinde 116.1 nA/mm<sup>2</sup>, arındırma yöntemi ile kuru oksidasyon yapılan A3 alttaş fotodedektörlerinde ise 35.7 nA/mm<sup>2</sup> karanlık akım yoğunluğu hesaplanmıştır. Böylelikle karanlık akım gürültüsü %69,2 oranında azaltılarak mikrofabrikasyon veriminin büyük oranda arttığı gözlenmiştir. [42]

Bu çalışma, fotodedektör mikrofabrikasyonunda termal difüzyon yöntemi ile yapılan katkılama işlem derinliğinin, fotodedektör duyarlılık performansına olan etkisini göstermesi açısından literatüre katkı sağlayacaktır. Öte yandan klor bazlı kimyasallar (HCl, Dikloro etilen) ile gerçekleştirilen arındırma yöntemi ile oksidasyon

işleminin, kimyasal kullanılmadan sadece termal döngüsü ile alttaş safsızlıklarını iyileştirmesi açısından Silisyum alttaşlar ile çalışan araştırmacılara yararlı olacaktır.

Çalışmanın sonraki aşamalarında örneklem sayısı artırılarak, farklı özelliklerde Silisyum alttaşların farklı sıcaklıklar ile katkılama işlemleri gerçekleştirilecek ve katkılama işlemi parametrelerinden; gaz akış hızlarının, sıcaklık yükseliş ve düşüş sürelerinin katkılama işlemine olan etkisi incelenecektir. Bu bilgilerin devamında da daha yüksek performans ve verimle çalışacak Silisyum tabanlı P-I-N yapılı fotodetektörler üretilmesi hedeflenmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Udt Sensors,Inc. Silicone Photodiodes Physics and Technology, [https://www.univie.ac.at/photovoltaik/praktikum/ws2017/silicon\\_photodiodes.PDF](https://www.univie.ac.at/photovoltaik/praktikum/ws2017/silicon_photodiodes.PDF) (Erişim tarihi: **19 Ekim 2021**)
- [2] Anonim, Photodiode, <https://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor-diodes/photodiodesymboltypes.html> (Erişim tarihi: **19 Ekim 2021**)
- [3] First Sensor, Avalanche photodiode, <https://www.first-sensor.com/en/products/optical-sensors/detectors/avalanche-photodiodes-apd/> (Erişim tarihi: **19 Ekim 2021**)
- [4] Anonim, Photodiode structures, [https://www.electronics-notes.com/articles/electronic\\_components/diode/photodiode-detector-structures-fabrication-materials.php](https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/diode/photodiode-detector-structures-fabrication-materials.php) (Erişim tarihi: **19 Ekim 2021**)
- [5] Hook JR, Hall HE. Solid state physics, Manchester Physics Series, **1991**.
- [6] Kasap SO. Optoelectronics and photonics, Pearson Education UK, **2013**.
- [7] Shockley W, Read Jr W. Statistics of the recombinations of holes and electrons, Physical review,87(5):835, **1952**
- [8] Pollock CR. Fundamentals of optoelectronics, Irwin, **1995**.
- [9] Kern W. The evolution of silicon wafer cleaning technology, Journal of the Electrochemical Society, 137(6):1887, **1990**.
- [10] May GS, Spanos CJ. Fundamentals of semiconductor manufacturing and process control, John Wiley & Sons, **2006**.
- [11] Brock DC. Makers of the microchip, A documentary history of fairchild semiconductor, MIT Press, **2010**.
- [12] Neudeck GW, Pierret RF. Introduction to microelectronic fabrication, Modular Series on Solid State Devices, 5, **2002**.
- [13] SemiStar Corp. <http://www.semistarcorp.com/product/micro-ion-rie-reactive-ion-etching-ss8650/> (Erişim Tarihi: **28 Ekim 2021**)
- [14] Wilke N, Mulcahy A, Ye S-R, Morrissey A. Process optimization and characterization of silicon microneedles fabricated by wet etch technology, Microelectronics Journal, 36(7):650-6, **2005**.

- [15] Pal P, Swarnalatha V, Rao AVN, Pandey AK, Tanaka H, Sato K. High speed silicon wet anisotropic etching for applications in bulk micromachining: a review, *Micro and Nano Systems Letters*, 9(1):1-59, **2021**.
- [16] Anonim, Doping: Connectivity of Semiconductors, <https://courses.lumenlearning.com/introchem/chapter/doping-connectivity-of-semiconductors/>, (Erişim tarihi: **29 Ekim 2021**)
- [17] Duttagupta S, Ma F, Hoex B, Mueller T, Aberle AG. Optimised antireflection coatings using silicon nitride on textured silicon surfaces based on measurements and multidimensional modelling, *Energy Procedia*,15:78-83, **2012**.
- [18] Dobrzański L, Szindler M, Drygała A, Szindler M. Silicon solar cells with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> antireflection coating, *Open Physics*,12(9):666-70, **2014**.
- [19] Swatowska B, Stapinski T, Drabczyk K, Panek P. The role of antireflective coatings in silicon solar cells—the influence on their electrical parameters, *Optica Applicata*, 41(2):487-92, **2011**.
- [20] Anonim, Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition Systems, <https://www.mksinst.com/n/pecvd-systems>, (Erişim tarihi: **30 Ekim 2021**)
- [21] Matt Hughes, What is E-Beam Evaporation, <http://www.semicore.com/news/89-what-is-e-beam-evaporation>, (Erişim tarihi: **30 Ekim 2021**)
- [22] Ahmadi S, Asim N, Alghoul M, Hammadi F, Saeedfar K, Ludin N, et al, The role of physical techniques on the preparation of photoanodes for dye sensitized solar cells, *International Journal of Photoenergy*, **2014**.
- [23] Anonim, Metal/Semiconductor Ohmic Contacts, [https://web.stanford.edu/class/ee311/NOTES/Ohmic\\_Contacts.pdf](https://web.stanford.edu/class/ee311/NOTES/Ohmic_Contacts.pdf), (Erişim tarihi: **06 Kasım 2021**)
- [24] Colinge J-P, Colinge CA. *Physics of semiconductor devices*: Springer Science & Business Media, **2005**.
- [25] Anonim, The Metal-Semiconductor Junction Schottky Diode, OHMIC CONTACTS, [https://in.ncu.edu.tw/ncume\\_ee/SchottkyDiode.htm](https://in.ncu.edu.tw/ncume_ee/SchottkyDiode.htm), (Erişim tarihi: **30 Ekim 2021**)
- [26] Shah S, Watson GP. Effect of Annealing on the Contact Resistance of Aluminum on a p-type Substrate, **2019**.

- [27] Chris Valentine, Probe Station – Optoelectronic Device Test, <https://www.inseto.co.uk/probe-station-applications-probe-testing-optoelectronic-devices-ikb-070/>, (Erişim tarihi: **31 Ekim 2021**)
- [28] FormFactor, Probe systems, <https://www.formfactor.com/product/probe-systems/300-mm-systems/pm300/>, (Erişim tarihi: **31 Ekim 2021**)
- [29] Anonim, Film thickness measurement, <http://www.shnti.com:8080/index/product/info?id=11>, (Erişim tarihi: **31 Ekim 2021**)
- [30] Anonim, Spectroscopic reflectometry, [https://Inf-wiki.eecs.umich.edu/wiki/Spectroscopic\\_reflectometry](https://Inf-wiki.eecs.umich.edu/wiki/Spectroscopic_reflectometry) (Erişim tarihi: **31 Ekim 2021**)
- [31] Anonim, Optical Profilometry, <https://www.nanoscience.com/techniques/optical-profilometry/>, (Erişim tarihi: **31 Ekim 2021**)
- [32] Anonim, Stylus Profilometry, <https://australiasurfacemetrology.com/new-page>, (Erişim tarihi: **31 Ekim 2021**)
- [33] Anonim, Electrochemical CV-Profilometry, <https://probion.fr/ecv-en/>, (Erişim tarihi: **31 Ekim 2021**)
- [34] Anonim, Optoelectronics Solution, <https://silvaco.com/solutions/optical/>, (Erişim tarihi: **07 Kasım 2021**)
- [35] Appapillai AT, Sachs EM. A method for temperature profile measurement of silicon wafers in high-temperature environments, *J Appl Phys*, 109(3):034902, **2011**
- [36] Jones SW. Diffusion in silicon, IC Knowledge LLC. 23-61, **2008**
- [37] Wang K, Vygranenko Y, Nathan A. ZnO-based p-i-n and n-i-p heterostructure ultraviolet sensors: a comparative study, *Journal of applied physics*, 101(11):114508, **2007**
- [38] Ueda O, Nauka K, Lagowski J, Gatos H. On the Mechanism of Intrinsic Gettering by Butterfly-Type Defects in Silicon, *MRS Online Proceedings Library*, 71(1):21-6, **1986**
- [39] Zin N, Blakers A, Franklin E, Fong K, Kho T, Barugkin C, et al., editors, Etch-back simplifies interdigitated back contact solar cells, 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), **2014**
- [40] Ouchi H, Mukai T, Kamei T, Okamura M. Silicon pn junction photodiodes sensitive to ultraviolet radiation, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1979;26(12): **1965**

- [41] Anonim, Si Photodiodes, [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e02\\_handbook\\_si\\_photodiode.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e02_handbook_si_photodiode.pdf) (Erişim tarihi: **29 Kasım 2021**)
- [42] Sun K, Jung D, Shang C, Liu A, Bowers J, Beling A, editors. Low-dark current III-V photodiodes grown on silicon substrate, 2017 IEEE Photonics Conference (IPC), **2017**