



**METAL DESTEKLİ KİMYASAL AŞINDIRMA METODU İLE GÜNEŞ
HÜCRELERİNİN OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

Burcu GÜMÜŞ ÇİFTÇİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Burcu GÜMÜŞ ÇİFTÇİ

20/01/2023

METAL DESTEKLİ KİMYASAL AŞINDIRMA METODU İLE GÜNEŞ HÜCRELERİNİN OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Burcu GÜMÜŞ ÇİFTÇİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Güneş hücresi, güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştüren yarı iletken bir cihazdır. Işığın soğrulmasını artırarak güneş hücresinin optik özelliklerini iyileştirmek için tez kapsamında waferın yüzeyde ters piramit morfolojisi oluşturulmuştur. Ters piramit morfolojisi Cu destekli kimyasal aşındırma metodu ile elde edilmiştir. Tek aşamalı $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2/\text{HF}/\text{H}_2\text{O}_2$ sistemi ters piramit yapıları 50°C 'de elde edilmiştir. Cu destekli kimyasal aşındırma sisteminde, Cu kataliz olarak kullanılmıştır ve elektrokimyasal reaksiyon sonucunda HF'in m-Si waferı aşındırması sağlanmıştır. Tez çalışmasında aşındırma yapısını incelemek için ilk olarak farklı 0,5;1,5;4,5;13,5 M HF konsantrasyonlarında 10 dakika sabit reaksiyon süresinde incelenmiştir. Yapılan ilk çalışma sonrasında en iyi HF konsantrasyonu belirlemek için SEM ve yüzey yansıma ölçümlerinin karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. İkinci aşamada reaksiyon süresinin yüzey morfolojisine ve ışık soğurma oranlarına etkisi 5-10-15 ve 20 dakika ile incelenmiştir. Tez çalışması kapsamında, farklı HF konsantrasyon ve reaksiyon süresinin etkisini incelemek amacıyla m-Si waferın aşındırma mekanizması, SEM ile yüzey morfolojisi, yüzey yansıma oran ölçümleri ve fotoluminesans karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Güneş hücresi üretimi sonrası kuantum verimlilik ve I-V karakterizasyon çalışmaları tamamlanmıştır. Yapılan karakterizasyon çalışmaları sonucunda 300 ile 1100 nm arasında ters piramitli m-Si waferın yüzey yansıma oranı %5,97 elde edilmiştir. 4,5 M HF ve 15 dakika reaksiyon süresi sonucunda üretilen ters piramit yüzey morfolojisine sahip PERC güneş hücresinin verimliliği %22,24 ölçülmüştür. Ters piramit morfolojisine sahip güneş hücresinin verimi, alkali aşındırma ile elde edilen dik piramitli güneş hücresinden %0,23 ve akım yoğunluğu J_{sc} 0,19 mA/cm² daha yüksektir.

Bilim Kodu : 91206
Anahtar Kelimeler : Kristal silisyum güneş hücresi, Metal destekli kimyasal aşındırma, Ters piramit
Sayfa Adedi : 89
Danışman : Prof. Dr. Fatma Çiğdem GÜLDÜR

IMPROVING THE OPTICAL PROPERTIES OF SOLAR CELL WITH METAL ASSISTED CHEMICAL ETCHING METHOD

(M. Sc. Thesis)

Burcu GÜMÜŞ ÇİFTÇİ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

Solar cell is a semiconductor device that converts sunlight directly into electricity. In order to improve the optical properties of the solar cell by increasing the absorption of light, the inverted pyramid morphology of the wafer on the surface was created within the scope of the thesis. The inverted pyramid morphology was obtained by the Cu assisted chemical etching method. Single step chemical etching solution $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2/\text{HF}/\text{H}_2\text{O}_2$ was applied to obtain inverted pyramid structures at 50 °C. In the Cu assisted chemical etching system, Cu was used as the catalysis and as a result of the electrochemical reaction, m-Si wafer was etched by HF. In order to examine the etching structure in the thesis study, different 0.5; 1.5; 4.5; 13.5 M HF concentrations were investigated firstly in constant a reaction time 10 minutes. After first experiment, SEM and reflectivity measurement characterization studies were carried out to select best HF concentration. In the second part of the experiment, the effect of reaction time on surface morphology and light absorption rates were investigated with 5-10-15 and 20 minutes. Within the scope of the thesis study, the etching mechanism of m-Si wafer, surface morphology by SEM, surface reflection ratio measurements and photoluminescence characterization studies were carried out to analyze the effects of different HF concentrations and reaction times. After solar cell production, quantum efficiency and I-V characterization studies were completed. As a result of the characterization studies, the surface reflection ratio of m-Si wafer with inverted pyramid between 300 and 1100 nm was obtained as 5.97%. The efficiency of the PERC solar cell with the inverted pyramid surface morphology produced as a result of 4.5 M HF and 15 minutes reaction time was measured as 22.24%. The efficiency of the solar cell with inverted pyramid morphology is 0.23% and current density J_{sc} 0.19 mA/cm² higher than the upright pyramid solar cell obtained by alkaline etching.

Science Code : 91206

Keywords : Mono crystalline solar cell, metal assisted chemical etching, inverted pyramids

Number of Pages : 89

Supervisor : Prof. Dr. Fatma Çiğdem GÜLDÜR

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında desteğini hiç eksik etmeyen, sürekli araştırma yapmam için beni yönlendiren ve motivasyonu ile enerji veren, tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Fatma Çiğdem GÜLDÜR'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez yazma aşamasında desteklerini esirgenemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlanmamı sağlayan Sayın Dr. Silver GÜNEŞ'e ve Halil Arda SARIGÖL'e teşekkür ederim. Sadece yüksek lisans çalışmalarımda değil, her zaman yanımda hissettiğim, mesleki konusunun dışında dahi elinden gelenin her zaman en iyisini benim için yapan sevgili eşim Ahmet Yiğit ÇİFTÇİ'ye sonsuz teşekkür ederim. Her zaman benimle gurur duyan, en büyük destekçilerim sevgili annem Nefise GÜMÜŞ'e, kıymetli babam Dilaver GÜMÜŞ'e ve her zaman benim küçük ve en iyi arkadaşım olan kardeşim Emre GÜMÜŞ'e teşekkürlerimi borç bilirim. Tez çalışmalarım esnasında karakterizasyon çalışmalarımda yardımcı olan tüm Kalyon PV Hücre proses/üretim mühendislerine teşekkür ederim. Hücre fabrikasında tez çalışmam için gerekli ekipmanları kullanmamı destekleyen Kalyon PV yönetimine teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KRİSTAL GÜNEŞ HÜCRELERİ	5
2.1. Güneş Hücrelerinin Temel Çalışma Prensipleri.....	5
2.2. Güneş Hücresi Parametreleri.....	8
2.2.1. Kısa devre akımı (I_{sc}).....	8
2.2.2. Açık devre voltajı (V_{oc})	8
2.2.3. Dolum faktörü (FF)	9
2.2.4. Güç dönüşüm verimliliği (η).....	9
2.3. Güneş Hücresinin Temel Üretim Adımları	10
2.3.1. Yüzey yapılandırma.....	10
2.3.2. Fosfor (P) difüzyonu.....	11
2.3.3. Seçici emitör lazer	11
2.3.4. PSG kaldırma ve arka yüzey parlatma	12
2.3.5. Ön ve arka kaplama	12
2.3.6. Metalizasyon.....	14
2.4. Kristal Güneş Hücre Örnekleri.....	14

	Sayfa
2.4.1. Arka yüzey tam alan güneş hücresi (Al:BSF)	15
2.4.2. Seçkili emitör güneş hücresi	16
2.4.3. Pasifleştirilmiş emitör ve arka temas güneş hücresi (PERC)	16
2.4.4. Pasifleştirilmiş emitör arka lokal olarak yayılan hücreler (PERL).....	17
2.4.5. Pasifleştirilmiş emitör arka tamamen dağınık hücreler (PERT).....	18
2.5. Güneş Hücresinde Optik Kayıplar	19
2.5.1. Işık soğurma	19
2.6. Yüzey Yapılandırma Metotları	22
2.6.1. Alkali yüzey yapılandırma metodu.....	22
2.6.2. Metal destekli kimyasal aşındırma	24
3. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI.....	29
3.1. Pasifleştirilmiş Emitör ve Arka Temas Güneş Hücresi (PERC) Literatür Çalışmaları	29
3.1.1. Çift yönlü PERC	33
3.2. Metal destekli kimyasal aşındırma metodunun literatür araştırması.....	35
3.2.1. Ag destekli kimyasal aşındırma metodunun literatür araştırması	35
3.2.2. Ag/Cu destekli kimyasal aşındırma metodunun literatür araştırmaları	38
3.2.3. Cu destekli kimyasal aşındırma metodunun literatür araştırmaları	39
4. DENEY METODU	43
4.1. Yüzey Yapılandırma Çalışmaları	43
4.1.1. Alkali kimyasal aşındırma	43
4.1.2. Cu destekli kimyasal aşındırma	44
4.2. Karakterizasyon Çalışmaları	47
4.2.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi	48
4.2.2. Yansıma spektrometre ölçüm analizi	48
4.2.3. Kuantum verimlilik analizi	48

	Sayfa
4.2.4. Akım-Voltaj ölçüm analizi (I-V)	49
4.2.5. Lüminesans analizi	49
5. BULGULAR VE TARTIŞMALAR.....	51
5.1. Cu Destekli Kimyasal Aşındırma Mekanizması ve Aşındırma Hızı Çalışmaları	52
5.2. Optik Özelliklerin İyileştirilmesi İçin Yapılandırılan Yüzeyin Karakterizasyon Çalışmaları	56
5.3. Güneş Hücresi Üretimi Sonrası Yapılan Karakterizasyon Çalışmaları	72
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	79
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ.....	Erro
r! Bookmark not defined.	

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Si aşındırmasına bağlı verimlilik çizelgesi	33
Çizelge 3.2. Literatür özet çalışma tablosu	42
Çizelge 4.1. Yüzey yapılandırma çalışmalarına ait çizelge	46
Çizelge 4.2. Konsantrasyona bağlı kullanılan kimyasal miktarları	46
Çizelge 5.1. HF konsantrasyonuna bağlı ölçülen kütle kaybı ve aşındırma hız hesaplamaları.....	55
Çizelge 5.2. HF konsantrasyonuna bağlı m-Si waferların sonuçları ve alkali kimyasal aşındırma ile elde edilen dik piramitli yüzeye sahip numunenin sonucu...	60
Çizelge 5.3. Reaksiyon süresine bağlı m-Si waferların yüzey yansıma sonuçları.....	65
Çizelge 5.4. Yansıma engelleyici kaplama sonrası HF konsantrasyonuna bağlı aşındırma süresine bağlı yansıma oranları	66
Çizelge 5.5. Yapılan PL çalışmasının parametreleri ve minimum, maksimum ve ortalama değerler.....	69
Çizelge 5.6. Güneş hücresinin I-V ön yüzey ölçüm sonuçları.....	76

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Güneş hücresi sınıflandırması.....	1
Şekil 1.2. (a) Polikristal tane sınırı (b) monokristal tane sınırı.....	2
Şekil 2.1. Güneş hücresi p-n enerji diyagramı.....	6
Şekil 2.2. Temel güneş hücresi kesiti.....	7
Şekil 2.3. Karanlık ve aydınlık I-V eğrisi.....	8
Şekil 2.4. Dolum faktörüne (FF) göre I-V eğrisi	9
Şekil 2.5. P-tipi güneş hücresi üretim süreci aşamaları	10
Şekil 2.6. P-N eklem gösterimi	11
Şekil 2.7. (a) PSG katmanına sahip hücre (b) PSG kaldırılması ile izalasyonu sağlanmış hücre.....	12
Şekil 2.8. Silisyum wafer üzerine kaplanmış yansıma önleyici tabakadan ışığın yansıması.....	13
Şekil 2.9. Al:BSF güneş hücresi kesiti.....	15
Şekil 2.10. Seçkili emitör güneş hücresi kesiti	16
Şekil 2.11. Güneş hücresi kesiti (a) PERC tipi (b) standart tip.....	17
Şekil 2.12. Pasifleştirilmiş emitör arka lokal olarak yayılan güneş hücresi kesiti.....	18
Şekil 2.13. Pasifleştirilmiş emitör arka tamamen dağınık güneş hücresi kesiti (a) tek yüzeyli (b) çift yüzeyli	18
Şekil 2.14. Yaygın FV malzemelerinin absorpsiyon katsayıları	20
Şekil 2.15. Birden fazla azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğunda absorblanan spektrum .	21
Şekil 2.16. Yıllara göre wafer kullanım kalınlıkları	21
Şekil 2.17. (a) Düz yüzey, (b) piramit dokulu yüzey ve (c) izotropik kazınmış yüzey için yüzey dokusunun gelen fotonun optik yolu üzerindeki etkisi.....	22
Şekil 2.18. (a) Aşındırmaya dirençli ve (b) aşındırılmış [111] yüzeyleri	23
Şekil 2.19. Metal destekli kimyasal aşındırma reaksiyon mekanizmaları	26
Şekil 3.1. (a) P tipi Al-BSF kesiti (b) P tipi PERC güneş hücresi	29

Şekil	Sayfa
Şekil 3.2. Blakers grubu tarafından üretilen PERC hücresinin şematik diyagramı	31
Şekil 3.3. ISFH grubu tarafından üretilmiş PERC hücre tasarımı	32
Şekil 4.1. Alkali kimyasal aşındırma işlem sırası	44
Şekil 4.2. Bakır destekli kimyasal aşındırma işlem sırası.....	45
Şekil 4.3. Numune isimlendirmeleri	46
Şekil 4.4. Yüzey yapılandırma işlemleri.....	47
Şekil 5.1. HF konsantrasyonuna bağlı aşındırma hızı grafiği.....	56
Şekil 5.2. HF konsantrasyonuna bağlı yüzey yansıma oranı grafiği.....	61
Şekil 5.3. Aşındırma süresine bağlı yüzey yansıma oranı grafiği.....	66
Şekil 5.4. HF konsantrasyonuna bağlı kaplama sonrası yansıma oranı grafiği	67
Şekil 5.5. Aşındırma süresine bağlı kaplama sonrası yansıma oranı grafiği	68
Şekil 5.6. Kplama sonrası numunelerin fotolüminesans değeri grafiği	69
Şekil 5.7. HF konsantrasyonuna bağlı harici kuantum verimlilik grafiği.....	72
Şekil 5.8. HF konsantrasyonuna bağlı dahili kuantum verimlilik grafiği.....	73
Şekil 5.9. Aşındırma süresine bağlı harici kuantum verimlilik grafiği.....	74
Şekil 5.10. Aşındırma süresine bağlı dahili kuantum verimlilik grafiği.....	75
Şekil 5.11. Güneş hücresi verimliliğine göre yansıma oranı grafiği.....	77

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. (a) 30 saniye boyunca HF/AgNO ₃ çözeltisi ile kazınmış Si üzerindeki Ag nano parçacıklarının taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (b) Ag sonra Si substratının üst yüzeyinde oluşan sıg nano gözenekler.	27
Resim 5.1. H ₂ O ₂ konsantrasyonu bağı Cu partiküllerinin yüzeyde dağılımı	54
Resim 5.2. HF konsantrasyonuna bağı SEM yanal görüntüleri	57
Resim 5.3. HF konsantrasyonuna bağı SEM üstten bakış görüntüleri.....	58
Resim 5.4. Yüzey morfolojilerinin üstten bakış SEM görüntüleri.....	62
Resim 5.5. Yüzey morfolojilerinin yanal bakış SEM görüntüleri.....	63
Resim 5.6. Ters piramit numunelerinin fotolüminesans görüntüleri	71
Resim 5.7. Ters piramit numunelerinin elektrolüminesans görüntüleri.....	78

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
η	Güç Dönüşüm Verimliliği
μm	Mikrometre
$\mu\text{m}/\text{min}$	Mikrometre/Dakika
$\mu\text{m}/\text{sn}$	Mikrometre/Saniye
A	Amper
Ag	Gümüş Elementi Simgesi
Al	Alüminyum
Al₂O₃	Alüminyum Oksit
Au	Altın Elementi Simgesi
cm/sn	Santimetre/Saniye
cm²	Santimetrekare
Cu	Bakır Elementi Simgesi
Cz-Si	Czochralski - Silisyum
eV	Elektro Volt
fA/cm²	Fartingal/Santimetrekare
FF	Dolum Faktörü
H₂O₂	Hidrojen Peroksit
HCl	Hidrojen Klorür
HF	Hidrojen Florür
HFO₃	Hidroflorik Asit
I_{MP}	Maksimum Güç Noktasındaki Akım
IPA	İzopropil Alkol
I_{SC}	Kısa Devre Akımı
J₀	Karanlık Doyma Akımı Yoğunluğu
J_{SC}	Kısa Devre Akım Yoğunluğu
K	Boltzmann Sabiti
KOH	Potasyum Hidroksit
M	Molar

Simgeler	Açıklamalar
mA/cm^2	Miliamper/Santimetrekare
mm	Milimetre
mm^2	Milimetrekare
mol/L	Mol/Litre
mV	Milivolt
n	İdealite Faktörü
n_0	Çerçevenin Kırılma İndisi
n_a	Yansıma Önleyici Kaplamanın Kırılma İndisi
NaOH	Sodyum Hidroksit
nm	Nanometre
nm	Nanometre
n_s	Yarı İletken Malzemenin Kırılma İndisi
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat Derece
P	Fosfor Elementi Simgesi
Pd	Paladyum Elementi Simgesi
P_{in}	Güneş Hücresi Verimliliği
P_{MP}	Maksimum Güç Noktası
POCl_3	Fosforil Klorür
ppm	Milyonda Bir Birime Denk Gelen Karşılık
Pt	Platin Elementi Simgesi
Pt	Platin Elementi Simgesi
q	Yük
R_s	Seri Direnç
Si_3N_4	Silisyum Nitrür
SiO_2	Silisyum Oksit
T	Sıcaklık
t_a	Yansıma Önleyici Kaplamanın Kırılma Kalınlığı
U_{oc}	Hücre Verimliliği
V_{oc}	Açık Devre Voltajı
W	Güç
W/m^2	Güç/Metrekare
ρ	Yoğunluk

Simgeler **Ω .cm****Açıklamalar**

Ohm.santimetre

 Ω /Kare

Ohm/Kare

Kısaltmalar**Açıklamalar****ABD**

Amerika Birleşik Devletleri

ALD

Atomik Katman Biriktirme

AM

Hava Kütlesi

ARC

Yansıma Engelleyici Kaplama

ARGE

Araştırma ve Geliştirme

BSF

Arka Yüzey Alanı

c-Si

Kristal Silisyum

DWS

Elmas Telli Testere ile İşlem Görmüş

FV

Fotovoltaik

IQE

Dahili Kuantum Verimliliği

LFC

Lazer Yangın Teması

mc-Si

Polikristal Silisyum

MDKA

Metal Destekli Kimyasal Aşındırma

m-Si

Monokristal Silisyum

PECVD

Plazma ile Güçlendirilmiş Kimyasal Buhar Biriktirme

PERC

Pasifleştirilmiş Emitör ve Arka Temas Güneş Hücresi

PERC

Pasifleştirilmiş Emitör ve Arka Temas Güneş Hücresi

PERL

Arka Yüzeyi Lokal Emitörlü Güneş Hücresi

PERT

Arka Yüzeyinin Tamamı Emitörlü Güneş Hücresi

PSG

Fosfor Silikat Camı

QE

Kuantum Verimliliği

RCA

Yüzey Yapılandırma Öncesi Temizlik Adımı

SEM

Taramalı Elektron Mikroskobu

STC

Standart Test Koşulu

TOPCon

Tünel Oksit ile Pasifleştirilmiş Kontak Güneş Hücresi

UNSW

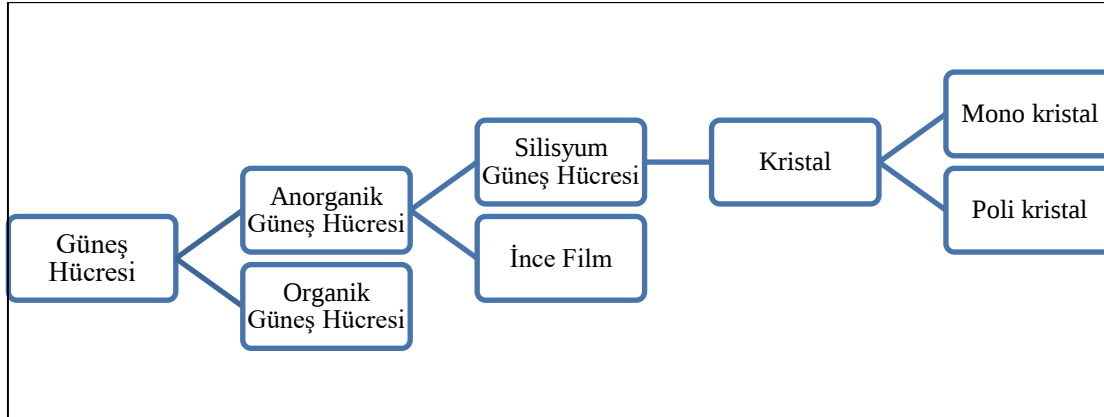
New South Wales Üniversitesi

Wafer

Kristal Silisyumdan Üretilmiş Yarı İletken Tabaka

1. GİRİŞ

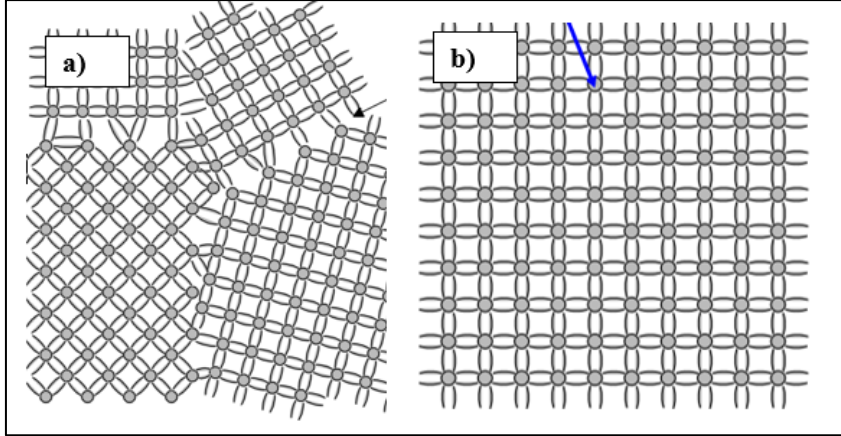
Enerji, yaşamı idam ettirebilmek için gerekli temel ihtiyaçlardandır. Enerji tüketim talebi nüfus popülasyonunun artışı ve sanayinin gelişmesi ile sürekli artmaktadır. Enerji ihtiyacı ise büyük oranda fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Fosil yakıtlar ise küresel ısınma gibi çevre sorunlarına neden olmaktadır. Fosil yakıt kullanımını azaltmak için alternatif sürdürülebilir enerji kaynakları büyük önem kazanmıştır. Fotovoltaik (FV) yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş ışığını kullanarak enerji üretmesi ile umut vadeden bir teknolojidir. Fotovoltaik teknolojinin yapı taşı olan güneş hücreleri güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştüren yarı iletken bir cihazdır [1]. Güneş hücreleri üzerine yapılan çalışmalar son on yılda %30'dan fazla bir oranda büyümüştür [2]. Ekonomik olarak elektrik üretimi için de uygun bir teknolojidir. Güneş hücreleri iyi performans ve kararlılık sergilerken araştırmalar hâlâ performansını artırmak ve maliyetini iyileştirmek için büyük bir hızla ilerlemektedir. 2019 yılında, Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı, Golden, Colorado, ABD'de geliştirilen çok eklemlili yapıli hücre %47,1 verimlilik ile dünya rekorunu elde etmiştir [3]. Güneş hücreleri temel olarak organik ve anorganik olarak ikiye ayrılmaktadır ve Şekil 1.1'de detaylı olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Güneş hücresi sınıflandırması

Kristal silisyum (c-Si) bazlı güneş hücreleri fotovoltaik pazarında %90 ile en büyük paya sahiptir [4]. Bu hakimiyetin ana nedeni silisyum, toksin içermeyen ve yeryüzünde en çok bulunan yarı iletken bir elementtir [5]. Kristal silisyum bazlı güneş hücreler ise monokristal (m-Si) ve polikristal (mc-Si) waferdan üretilerek ikiye ayrılmaktadırlar. Wafer kristal silisyumdan üretilen yarı iletken üründür. Polikristal ve monokristal silisyum wafer temel

farklı üretim tekniğinden kaynaklanmaktadır. Polikristal silisyumun kalitesi monokristal silisyumdan tane sınırlarının açık kalması nedeniyle daha düşüktür. Tane sınırının açık kalması rekombinasyonu artırmaktadır ve azınlık taşıyıcı ömrü azalmaktadır [6]. Bu sebeple verim dönüşümü monokristal bazlı güneş hücresinde daha fazladır. Tane sınır farkı Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2. (a) Polikristal tane sınırı (b) monokristal tane sınırı

Monokristal silisyum bazlı malzeme kullanarak üretilen güneş hücrelerinin verim dönüşümünü artırmak için çalışmalar devam etmektedir. Güncel verim rekoru %26,7 iken teorik verim limiti %29’dur [7]. Güneş hücresi verim artırma çalışmalarında temel olarak kontak tasarımı, rekombinasyon azaltma ve optik özelliklerin iyileştirilmesi yönünde çalışmalar yapılmaktadır.

Literatürdeki yer alan pek çok çalışma, mevcut güneş hücresinin optik özelliklerinin iyileştirilmesi için güneş hücresi tarafından ışığın soğurulmasının artırılması gerektiğini göstermektedir. Işığın soğurulmasını artırma yöntemlerinden birisi silisyumun yüzeyinin yapılandırılmasıdır [8]. Yüzey yapılandırılması ile güneş ışığının yüzeyden yansımaları azaltılarak kısa devre akım yoğunluğunun (J_{sc}) artırılması ile güneş hücresinin verim dönüşümünü artırmak hedeflenmektedir [9].

Silisyum malzemelerde yüzey yapılandırması için farklı metotlar vardır. Bu metotlar ıslak kimyasal aşındırma, mekanik yöntem ile kanal açma, lazer yöntemiyle aşındırma ve plazma aşındırmasıdır. Düşük maliyet ve uygulama kolaylığı nedeniyle en çok tercih edilen yöntem ıslak kimyasal aşındırmadır [10].

Yüzey yapılandırması için ıslak kimyasal aşındırma metodu kendi içinde genel olarak izotropik ve anizotropik olmak üzere ikiye ayrılır. İzotropik aşındırma wafer yüzeyini her yönde aynı hızda aşındırırken anizotropik yöntem farklı hızlarda yüzeyi aşındırarak dik piramitler oluşturmaktadır. Mono kristal silisyum wafer (m-Si) için anizotropik aşındırma ideal aşındırma yöntemi olarak tercih edilmektedir [11]. En yaygın yöntem olan alkali kimyasal aşındırma ile yüzeyde dik piramitler oluşturarak yansımaya oranı azaltılmaktadır. m-Si wafer yansımaya oranı %12-15 aralığındadır [12]. Dik piramit yapılarının neden olduğu yüzeydeki sivrilik, yansımaya engelleyici kaplamanın verimsizliğine ve yansımaya oranının artmasına neden olması ile optik kayıplar artmaktadır. Optik etkinin azalması güneş hücresinin elektriksel özelliklerinde de düşüşe sebebiyet vermektedir [13]. Yansımaya oranını %10'un altında elde edebilmek için Metal Destekli Kimyasal Aşındırma (MDKA) yöntemi yönünde çalışmalar artmıştır. MDKA'da Si'den daha yüksek elektronegatifliğe sahip asil metaller (Au, Pt, Ag vb.), nano yapı elde etmek için yüzeyi aşındırmada katalizör görevi görürler ve Ag (Gümüş) en yaygın olarak kullanılan metaldir [14].

Tez çalışmasında, m-Si wafer için yüzey yapılandırma metodu olarak MDKA uygulanmıştır ve nano yapı üretim maliyetini azaltmak için Cu kullanımı ile yüzeyde nano yapı olarak ters piramit oluşturulmuştur. Mono silisyum wafer yüzeyinde klasik anizotropik aşındırma ile elde edilen dik piramit ile ters piramit nano yapısına sahip hücrenin optik özellikleri karşılaştırılmıştır. Tek aşamalı $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2/\text{HF}/\text{H}_2\text{O}_2$ sistemi ters piramit yapıları 50 °C'de elde edilmiştir. Tez çalışmasında aşındırma yapısını incelemek için ilk olarak 0,5;1,5;4,5;13,5 M HF konsantrasyonları ile 10 dakika denenmiştir. Yapılan çalışma sonrasında SEM ve yüzey yansımaya ölçüm karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. İkinci aşamada reaksiyon süresinin yüzey morfolojisine etkisi ve ışık soğurma oranlarına etkisi 5-10-15 ve 20 dakika ile incelenmiştir. Farklı HF konsantrasyon ve reaksiyon süresinin m-Si waferın aşındırma mekanizması, SEM ile yüzey morfolojisi, yüzey yansımaya oran ölçümleri yapılmıştır. Güneş hücresi üretimi sonrası fotoluminesans ve I-V karakterizasyon çalışmaları ile analiz edilmiştir. Yüzey morfolojisinin güneş hücrelerinin pasivasyonu ve performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Mono silisyum wafer kullanılarak çift yüzü pasifleştirilmiş emitör ve arka temas güneş hücresi (PERC) üretilmiştir.

2. KRİSTAL GÜNEŞ HÜCRELERİ

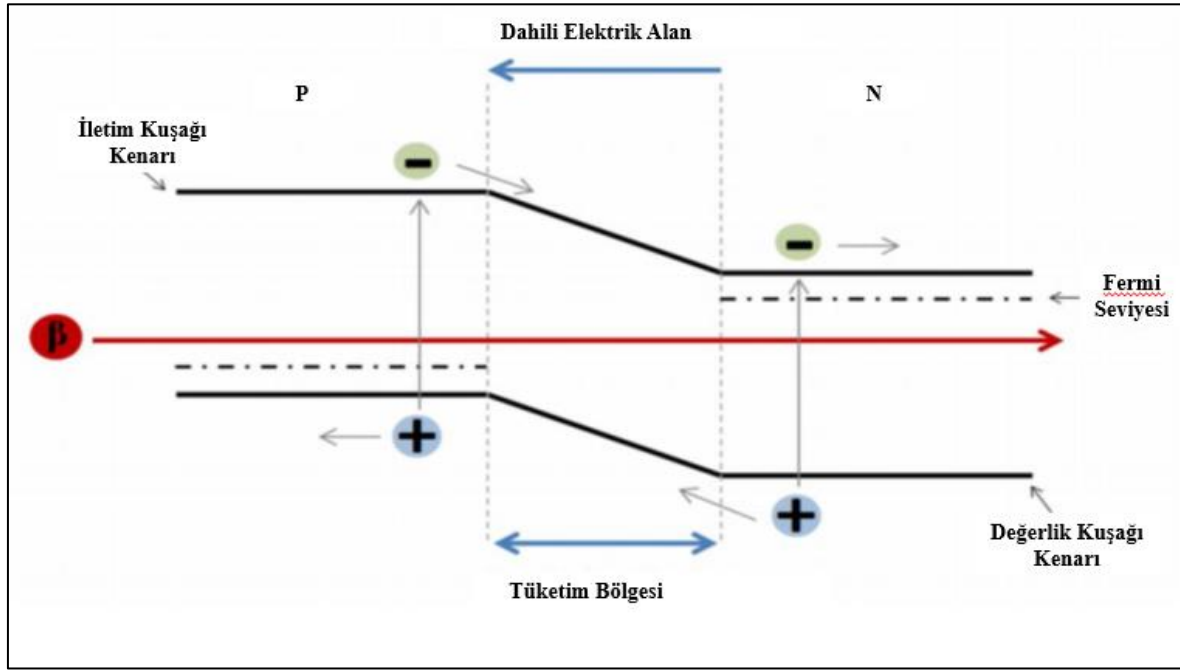
Fotovoltaik (FV), güneş enerjisinin fotovoltaik etki prensibi ile elektrik enerjisine dönüştürülmesinin konusudur. Fotovoltaik etki 1839 yılında Alexander Edmund Becquerel tarafından bulunmuştur [15]. Edmund Becquerel, elektrolit çözeltisinin foto-elektromotor kuvvetini ölçerek p-tipi ve n-tipi yarı iletken elektrotları araştırmıştır [16]. P-tipi yarıiletken malzeme 3A elementlerinden (bor, galyum vb.) katkılanması ile elde edilirken, n-tipi yarıiletken malzeme 5A (fosfor, arsenik vb.) elementlerinin katkılanması ile elde edilir. P-tipi yarı iletken malzeme elektron almaya ve n-tipi yarı iletken malzeme elektron vermeye yatkındır. 1873'te Willoughby Smith, selenyum ile çalışırken katılarda foto iletkenliği keşfetmiştir. 1883'te Charles Fritts, verimliliği %1'in altında olan ilk çalışan güneş hücrelerini üretmiştir [15]. İlk silisyum güneş hücresi, 1954 yılında Bell Laboratuvarı'nda uzay uygulamaları için %6 verimlilikle elde edilmiştir [17]. 1990'larda fotovoltaik, elektronik saatler ve hesap makineleri için sıklıkla kullanılan güç kaynağı haline gelmiştir.

Kristal silisyum (c-Si) bazlı güneş hücreleri fotovoltaik pazarında %90 ile en büyük paya sahiptir [4]. Bu hakimiyetin ana nedeni silisyum, toksin içermeyen ve yeryüzünde en çok bulunan yarı iletken bir elementtir. c-Si'nin diğer bir avantajı, bu malzeme ile yüksek verimlilik elde edilmesini sağlayan yüksek azınlık taşıyıcı ömürleridir [5]. Güneş hücreleri üzerine yapılan çalışmaları anlamlandırabilmek için öncelikle temel çalışma prensipleri açıklanmıştır.

2.1. Güneş Hücrelerinin Temel Çalışma Prensipleri

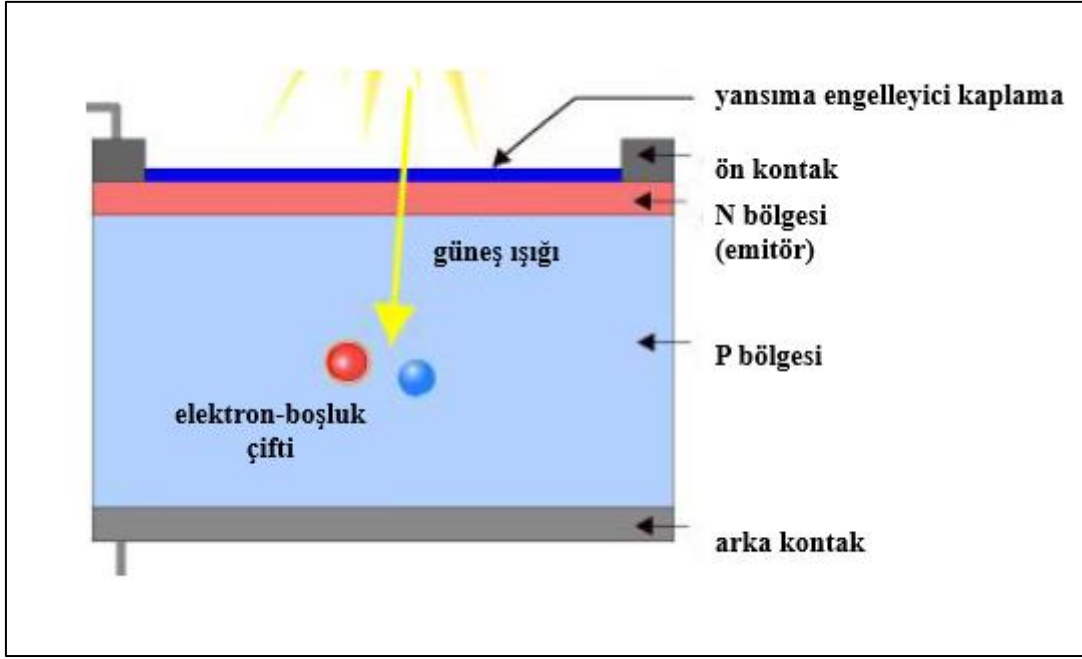
Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü fotovoltaik etki ile açıklanır. Güneşten gelen ışık demeti eklem bölgesine (p-n) ulaştığında elektronlara çarparak serbest yük çiftleri (elektron-boşluk) oluşturur. Yük çiftleri, eklemle kurulan doğal iç ters elektrik alanla (E_i) akım katkısı oluşturmak üzere çoğunlukta oldukları bölgelere giderler. Doğal E_i alanı, fotonla enerji kazanan yük taşıyıcılarının hareketlerinde hangi tarafa eğimli olduklarını ifade eden bir enerji engelidir. Fotonlardan üretilen elektronlar n-bölgesine ve boşluklar p-bölgesinde toplanarak bir gerilim üretilmektedir. Ön ve arka iletken kontaklar ile toplanır. Son adım, pili şarj etmek veya doğrudan diğer elektrikli cihazlar tarafından kullanılmak üzere güneş hücresinden elde edilen gücü almaktır. Yarı iletken malzemenin yasak enerji aralıklarının mertebesi önemlidir.

Güneş hücreleri yarı iletken malzemelerden oluşur. Bir yarı iletkenin bant boşluk enerjisi diyagramı Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Yarı iletken bant boşluk enerjisinden daha yüksek enerjiye sahip bir foton güneş hücresine düştüğünde, yarı iletkenin valans bandındaki elektron fotonu soğurur. Daha sonra bu elektron iletkenlik bandına uyarılır. Ayrıca uyarılmış elektron, yarı iletkenin valans bandında bir boşluk bırakır. Bu süreç, güneş hücresinin elektrik üretimini oluşturmaktadır [18].



Şekil 2.1. Güneş hücresi p-n enerji diyagramı

Şekil 2.2'de gösterilen temel güneş hücresinde, ön metal kontaklar, yansımaya önleyici kaplama, p-n bağlantısı ve arka metal kontaklardan oluşmaktadır. Metal kontaklar, akım dönüşümü için elektriksel iletkenliği sağlar. Birleşim yerinde ışığın daha iyi hapsedilmesi için yansımaya önleyici kaplama tabakası ve yüzey yapısı etkili olur. P-N bağlantısı, elektron-boşluk çiftleri üretir ve üretilen çiftler metal kontaklardan toplamaktadır.



Şekil 2.2. Temel güneş hücresi kesiti

Kristal silisyum hücresi, bor veya galyum katkılı (p-tipi) bir wafer yüzeyinde oluşturulmuş fosfor katkı (n-tipi) tabakasına sahiptir [19]. Bu şekilde oluşturulan p-n eklemi ile ışık soğurulmasıyla oluşan elektron-boşluk çiftlerini ayırmak için ana mekanizmaları sağlayan bir elektrik alanı oluşturmaktadır. Güneş ışığı bir FV hücresinin yüzeyine çarptığında, ışıkla uyarılan elektronlar momentum kazanarak bir akım akışına neden olmaktadır [20]. Bu akım, akım-voltaj (I-V) eğrisini açıklamak için Eş 2.1 ile gösterilmektedir.

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] - I_L \quad (2.1)$$

I_0 : doyum akımı

q : elektron yükü

k : Boltzmann sabiti

T : sıcaklık (Kelvin cinsinden)

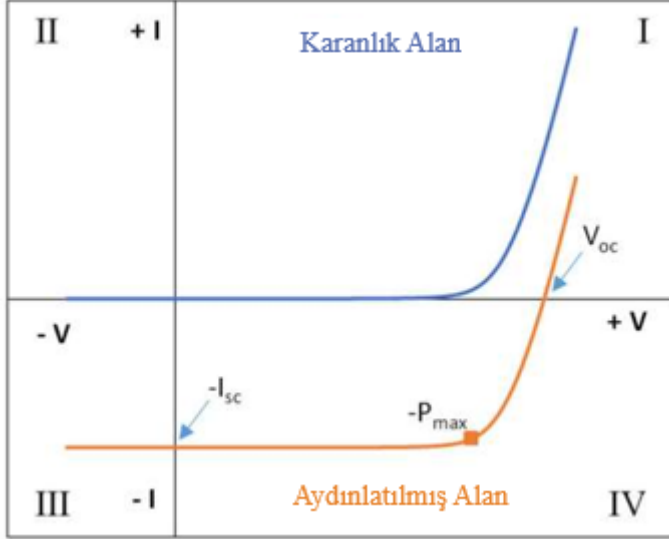
V : kontaklar arasında uygulanan gerilim

I : diyottan geçen akım

I_L : ışıkla üretilen akım

n : ideallik faktörü

Karanlıkta güneş hücre diyotunun I-V eğrisinin ışık tarafından üretilen akımla üst üste binmesi, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi bir güneş hücresinin I-V eğrisini vermektedir [21].



Şekil 2.3. Karanlık ve aydınlık I-V eğrisi [21]

2.2. Güneş Hücresi Parametreleri

Güneş hücrelerini karakterize etmek için dört temel parametre kullanılmaktadır. Parametreler aşağıda tanımlanmıştır.

2.2.1. Kısa devre akımı (I_{sc})

Güneş hücresinde voltaj sıfır olduğunda, elde edilen maksimum akımdır. Kısa devre akımı güneş hücresinin alanına bağlıdır. Bu nedenle alan bağımlılığından kurtulmak için kısa devre akım yoğunluğuna (J_{sc}) dönüştürülmektedir. Bu durumda, kısa devre akımı, ışık ile üretilen akıma eşit olacaktır. Teorik olarak, AM 1.5 G ve giriş gücü 1000 W/m^2 olan tek bir bağlantı kristal silisyum güneş enerjisinde olası maksimum akım yoğunluğu $46,3 \text{ mA/cm}^2$ 'dir [22].

2.2.2. Açık devre voltajı (V_{oc})

Bir güneş hücresinin maksimum voltajı, cihazdan geçen net akım sıfır olduğunda elde edilmektedir. Bu süre zarfında hücre akımı otomatik olarak sıfır olacaktır. Matematiksel

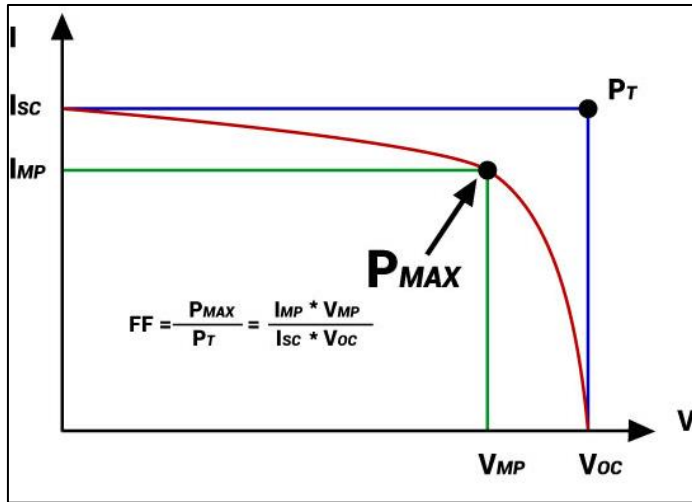
olarak, aydınlatma altındaki bir güneş hücresinin açık devre voltajı Eş 2.2’de gösterilmiştir [23].

$$V_{OC} = \frac{nKT}{q} \ln \left(\frac{I_{SC}}{J_0} + 1 \right) \quad (2.2)$$

Burada n, K, T, q, J_{SC} ve J_0 sırasıyla idealite faktörünü, Boltzmann sabitini, sıcaklığı, yükü, ışıktan üretilen akım yoğunluğunu ve karanlık doyma akımı yoğunluğunu temsil eder.

2.2.3. Dolum faktörü (FF)

Güneş hücresinin gücü, açık devre gerilimi ile maksimum güç noktasındaki (I_{MP}) akımın çarpımı ile belirlenmektedir. Dolum faktörü, maksimum güç noktasının (P_{MP}) açık devre voltajı ve kısa devre akımının (I_{SC}) çarpımına olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.4’te gösterildiği gibi FF, I-V eğrisinin kareliğinin bir ölçüsüdür.



Şekil 2.4. Dolum faktörüne (FF) göre I-V eğrisi

2.2.4. Güç dönüşüm verimliliği (η)

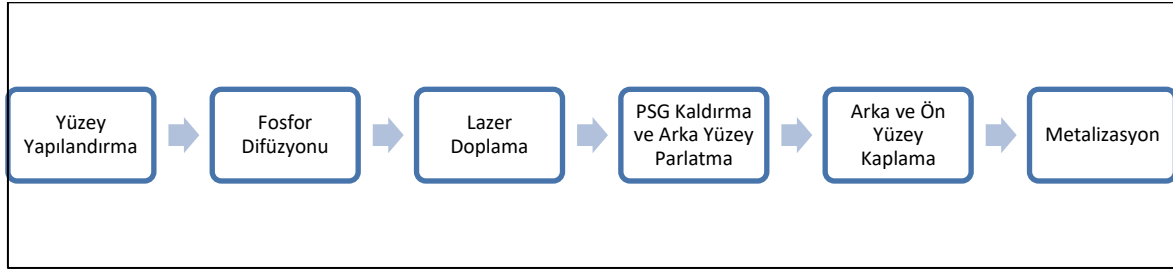
Güneş hücresinin verimliliği, gelen gücün elektriğe dönüştürülen fraksiyonu olarak belirlenir ve Eş 2.3’deki gibi tanımlanmaktadır [23].

$$\eta (\%) = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \times 100 \quad (2.3)$$

Bir güneş hücresinin verimliliği, $P_{in}=1000 \text{ W/m}^2$, AM 1.5 G ve 25°C sıcaklığa karşılık gelen STC (Standart Test Koşulu) altında ölçülmektedir [22].

2.3. Güneş Hücresinin Temel Üretim Adımları

Genel olarak kristal silisyum güneş hücrelerinin üretimi için süreç akış şeması Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Ayrıca süreçler genel olarak tanımlanmıştır. Tez çalışmasında üretilen Pasifleştirilmiş Emitör ve Arka Temas Hücreleri (PERC) tipi güneş hücresinde bu aşamalar uygulanmıştır.



Şekil 2.5. P-tipi güneş hücresi üretim süreci aşamaları

2.3.1. Yüzey yapılandırma

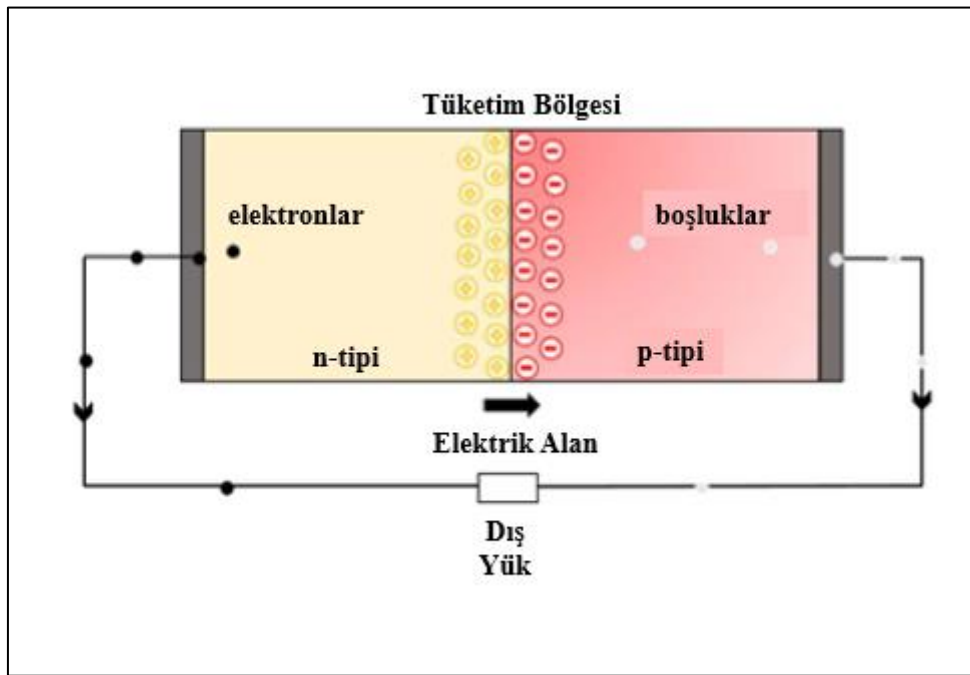
Waferlar yüzey yapılandırma aşaması öncesinde wafer üretiminden kaynaklı testere izlerini kaldırma işlemi uygulanmaktadır. Testere izlerinin oluşum nedeni ise wafer üretimi esnasındaki mekanik işlemlerden kaynaklanmaktadır. Bu mekanik işlemler sırasında, waferın yüzeyi zarar görmekte ve testere hasarını gidermek için kimyasal aşındırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Sodyum hidroksit (NaOH) veya potasyum hidroksit (KOH), wafer yüzeyini 5-10 μm aşındırmak için genel olarak kullanılan kimyasallardır [24].

Mono kristal waferların silisyum yönelimi [100]'dır. [100] yüzeyinin aşındırılması KOH tarafından anizotropik olduğundan, bu işlem wafer yüzeyinde piramitler oluşturmaktadır. Bu piramitlerin oluşumunun arkasındaki sebep alkali aşındırıcıların [100] silisyum yüzeyini

[111] silisyum yüzeyinden daha hızlı aşındırmasıdır. Yapılan bu süreç ile ışığın yüzeyden yansıması azaltılmaktadır [25].

2.3.2. Fosfor (P) difüzyonu

Difüzyon, kontrollü miktarda elementi yarı iletkenlik ve iletkenlik tipini değiştiren önemli bir süreçtir. Fosfor (P), wafer ile temas sağlamak için yüksek sıcaklıklarda yaygın olarak sıvı ya da gaz halinde verilir. Bu difüzyon işlemi, fosfor içeren öncüye bağlı olarak bir emitör oluşturmaktadır. Güneş hücrelerinin üretiminde kullanılan p-tipi waferda fosfor difüzyonu ön yüzeyde n-tipi bir emitör oluşturmaktadır. Oluşturulan p-n bağlantısı, üretilen elektron boşluk çiftlerini birbirinden ayıran bir elektrik alanı meydana getirmektedir. Sonuç olarak, Şekil 2.6'da görüleceği üzere ışık ile üretilmiş taşıyıcılardan oluşmaktadır.



Şekil 2.6. P-N eklem gösterimi

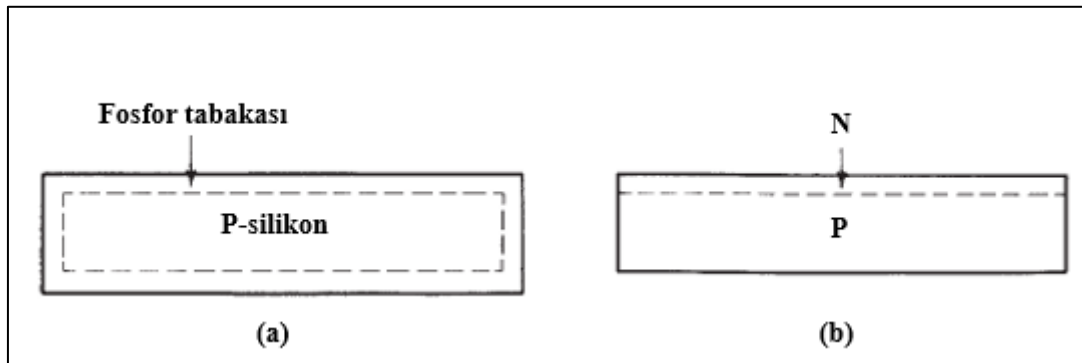
2.3.3. Seçici emitör lazer

Güneş hücresi üretim teknolojisinde seçici emitör lazer doplama ile hücre verimliliği mutlak olarak %0,3'ten fazla artırılabilirdiğinden giderek önem kazanmaktadır [26]. Lazer yardımı ile metalizasyon yapılacak kontak bölgelerine fosfor daha fazla katkılanır. Mevcut standart süreçte emitör tabakası fosfor atomlarının yüksek sıcaklıklarda p-tipi Si waferlar üzerinde

difüzyonu ile oluşturulmaktadır. Fosforun arka plandaki bor katkılama seviyesinden çok daha yüksek konsantrasyonlarda eklenmesiyle yüzey bölgesi p'den n-tipi silisyuma çevrilir ve bir p-n bağlantısı oluşturulmaktadır. Öte yandan, seçici emitörler, lazer tarama ile verimli bir şekilde yapılabilen, metal kontaklar altındaki düşük katkılı bir emitör ve lokal olarak yoğun katkılı bölgelerden yapılmaktadır [27].

2.3.4. PSG kaldırma ve arka yüzey parlatma

Difüzyonda yüzeyde oluşan fosfor silikat camı (PSG) kaldırma ve arka yüzeyi parlatma sürecidir. Hücre kenarlarındaki PSG kaldırmanın amacı ön ve arka yüzeyleri arasındaki elektriksel iletimi kesmektir. Bunun için fosfor katkılayarak oluşturduğumuz arka ve yan yüzeyleri kimyasal aşındırma ile p-n eklemi elde etmek amaçlanmaktadır. Bu durum aşağıdaki Şekil 2.7'de gösterilmiştir [28].



Şekil 2.7. (a) PSG katmanına sahip hücre (b) PSG kaldırılması ile izolasyonu sağlanmış hücre

Waferın arka tarafı, güneş hücresinin arka yüzeyinden yansıma kabiliyetini arttırmak için kimyasal ile aşındırılmaktadır. Güneş ışığı güneş hücresinin ön yüzeyine çarptığında, ışığın bazı dalga boyları (özellikle kızılötesi) arka yüzeye ulaşabilmektedir. Bu ışığı elektrığe dönüştürmek için arka tarafın artan yansıması, elektrik yüküne ek bir akım kazancı sağlamaktadır [29].

2.3.5. Ön ve arka kaplama

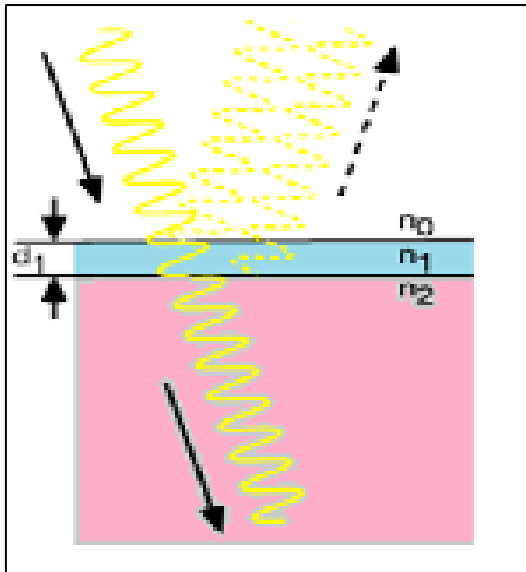
Yansıma önleyici kaplama, hücre tarafından absorplanan fotonların sayısını artırmak için gelen ışığın yüzeyden geri yansıma yüzdesini azaltmayı amaçlamaktadır [30]. Soğurulan

fotonların sayısının artmasıyla üretilen elektron-boşluk çiftleri ve dolayısıyla güneş hücresinin verimliliği de artmaktadır. Fiziksel mekanizma, yüzeyin tepesinden ve birinci sınırdan yansıyan ışığın girişimidir.

Kimyasal buhar biriktirme, spreyci veya serigrafi, yansıma önleyici kaplama teknikleri için üç ana yöntemdir [31]. Bu tez çalışmasında yansıma önleyici kaplama işlemi için plazma ile güçlendirilmiş kimyasal buhar biriktirme yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca silisyum nitrür, yansıma önleyici kaplama olarak kullanılan kimyasal bileşiktir.

Yansıma önleyici kaplama, güneş hücresi yüzeyinin üstüne uygulanan bir tür dielektrik ince filmidir. Yansıma önleyici kaplamanın kırılma indisi (n_a) ve kalınlığı (t_a), yarı iletken malzemenin kırılma indisi (n_s) ve çevreleyen malzemenin kırılma indisi (n_0), güneş hücrelerinin minimum yansıtmasının belirlenmesi için ana dört parametredir. Kristal silisyum güneş hücresi için, 80 nm silisyum nitrit yansıma önleyici kaplama, girişim yoluyla en iyi optik sınırlamaya sahip olmak için çoğunlukla hücrenin yüzeyine uygulanmaktadır [32].

Silisyum wafer üzerine kaplanmış yansıma önleyici tabakadan ışığın yansıması Şekil 2.8’de gösterilmektedir. Yansıma önleyici kaplama ile yansıma önemli ölçüde azalmaktadır.



Şekil 2.8. Silisyum wafer üzerine kaplanmış yansıma önleyici tabakadan ışığın yansıması

2.3.6. Metalizasyon

Metalizasyon üretim süreci ile hücrede oluşan tüm taşıyıcıların (elektron-boşluk) optimum şekilde toplanması hedeflenmektedir. Güneş hücresinin arka ve ön yüzeyi elektrik teması için iletken metal ile kaplanmaktadır. Metal kaplama ince ve kalın kontaklardan oluşmaktadır. Güneş hücresinde gelen ışığın kontaklar tarafından maksimum düzeyde toplanabilmesi için yüzeyinin minimum yansıma oranına sahip olması gerekmektedir [33].

Termal buharlaştırma ve serigrafi, metalizasyon işlemi için iki ana yöntemdir. Bu tez kapsamında serigrafi yöntemi kullanılmıştır. Serigrafi yönteminde proses stabilitesini ve yeterince düşük metal direncini sağlamak için gereken kalın kontak genişlikleri yaklaşık 120 μm 'dir [34].

Kristal silisyum güneş hücrelerinden daha yüksek verim elde etmek için hem V_{OC} ve J_{SC} 'nin iyileştirilmesi gerekir. Bu parametreleri iyileştirmeye yönelik yaklaşım için waferda yüksek tabaka dirençli emitörler oluşturulmak istenmektedir. Fakat, kontak oluşumlarında kullanılan iletken metaller düşük katkılı emitörler ile temas edecek şekilde optimize edilmiştir. Bununla birlikte daha yüksek tabaka direnci, dolum faktörünü azaltırken daha yüksek seri dirence (R_s) yol açmaktadır. Dolum faktörünün azaltmanın ve seri direncin artması ile kaybedilen güneş hücresi verimliliği, kontak genişliklerini azaltarak gölgeleme alanı fraksiyonunu arttırma ile telafi edilebilmektedir. Bu nedenle, gölgeleme kayıplarını en aza indirmek için kontak genişliğinin azaltılması gerekmektedir. Serigrafi yönteminde kullanılan şablondaki kontak açıklığının genişliğinin azaltılması ile kontak genişliği azaltılabilmektedir. Şablon kesitinin azaltılması ile incelen kontaklar daha küçük bir kesit alanına yol açmaktadır ve bu da daha yüksek metal direncine neden olmaktadır. Yapılan çalışmalarda, metal kontakların yüksekliği önemli ölçüde artırılarak iyileştirilebilmektedir. Metal kontakların yüksekliğinin 15 μm veya daha iyi hizalama hassasiyetine sahip bir şablon ile sağlanır [35].

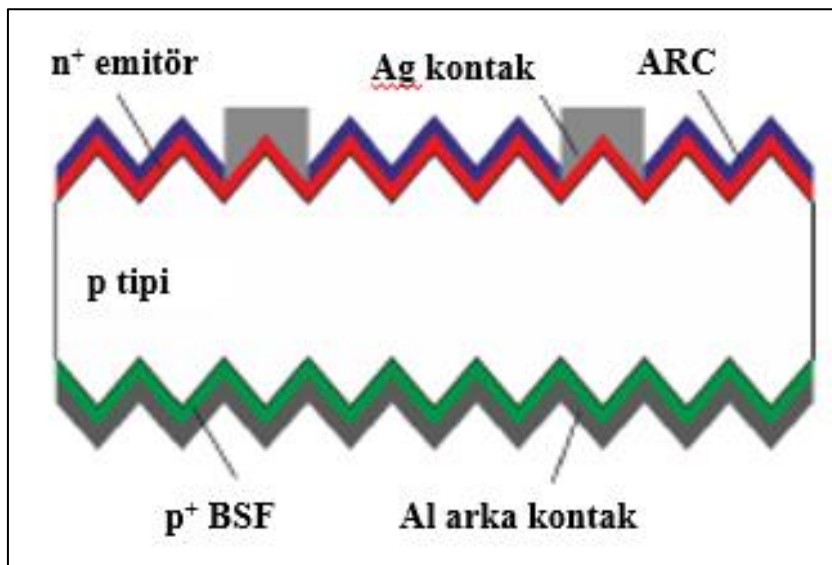
2.4. Kristal Güneş Hücre Örnekleri

Üretim ve malzeme maliyetlerini mümkün olduğu kadar düşürmek için c-Si hücrelerinin verimliliğini artırmaya yönelik birçok çalışmaya odaklanılmıştır. Verimliliği artırmaya yönelik kavramlar arasında 'Seçici Emitör (SE)', 'Pasifleştirilmiş Emitör ve Arka Temas

Hücreler (PERC)', 'Pasifleştirilmiş Emitör Arka Lokal Olarak Yayılan Hücreler (PERL)', ve 'Pasifleştirilmiş Emitör Arka Tamamen Dağınık Hücreler (PERT) örnek olarak verilmiştir. Bu tasarımlar, ileri üretim teknikleri ile geliştirilmiş pasivasyon, katkılama ve metalizasyon şemaları ile daha yüksek verimleri hedeflemektedir. Dolayısıyla verimdeki artış üretim maliyetlerine de artırmaktadır. Son teknoloji c-Si FV cihazlarının kesit yapısı, avantajları ve dezavantajları hakkında kısa açıklamalar ile aşağıda verilmiştir. Tüm şematikler p-tipi için çizilmiştir, yüksek verim gereksinimlerinde n-tipi muadilleri de üretilebilmektedir.

2.4.1. Arka yüzey tam alan güneş hücresi (Al:BSF)

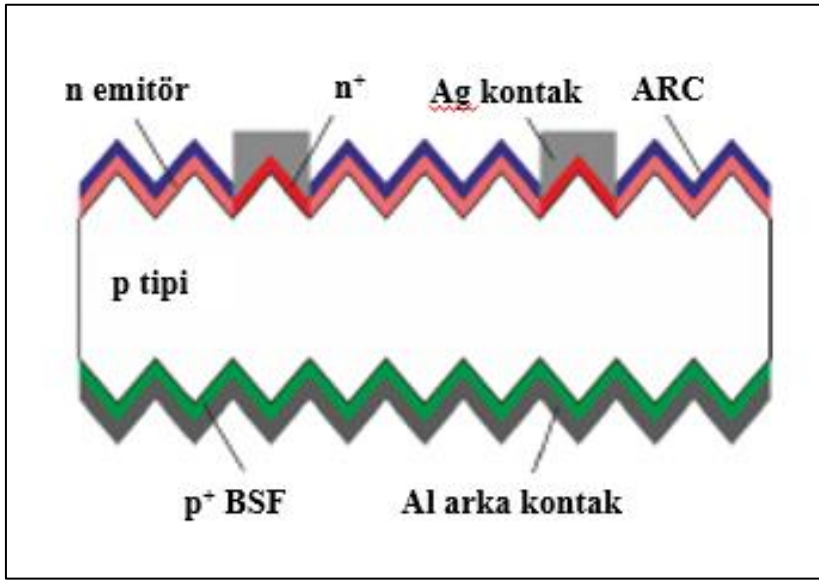
Al:BSF hücreleri olarak adlandırılan arka yüzey tam alanlı p-tipi güneş hücreleri, günümüzde c-Si FV pazarında yer almaktadır. Şekil 2.9'da verilen enine kesit yapısından da anlaşılacağı üzere homojen katkılı emitör, emitörün üstünde pasivasyon görevi gören yansıma önleyici bir kaplama (ARC) ve arka-ön yüzeyi metalizasyona sahiptir. Emitörün homojen katkısı ve arka yüzeyin tam alan Alüminyum (Al) metalizasyona sahip olması, işlem basitliğinden kaynaklanan ana teknolojik avantajıdır. Öte yandan, düşük dirençli Si-metal kontaklarının gerekliliği, yüksek ön yüzey rekombinasyon kayıpları nedeniyle yüksek bir katkılama konsantrasyonu gerektirir. Ek olarak, tam arka alan metalizasyon teması, yüksek arka yüzey rekombinasyon hızlarına neden olur. Sonuç olarak, cihazda, yüksek yüzey rekombinasyon kayıplarına rağmen imal edilmesi kolay bir yapıya sahiptir [36].



Şekil 2.9. Al:BSF güneş hücresi kesiti

2.4.2. Seçkili emitör güneş hücresi

Arka yüzey tam alan hücresinin temas direncini azaltmak ve emitör bölgesinde yüksek rekombinasyonu önlemek için, emitörün geri kalanı düşük katkılı iken kontakların altındaki bölgelerin yüksek katkılı olduğu homojen olmayan bir emitör katkılanması ile üretilmektedir. Şekil 2.10'da hücrenin kesit yapısı gösterilmektedir. Hücreler daha yüksek mavi tepki (kısa dalga boylarında) vermesine rağmen emitörün seçici katkılanması homojen emitör hücrelere göre üretim karmaşıklığı açısından teknolojik bir problemdir.

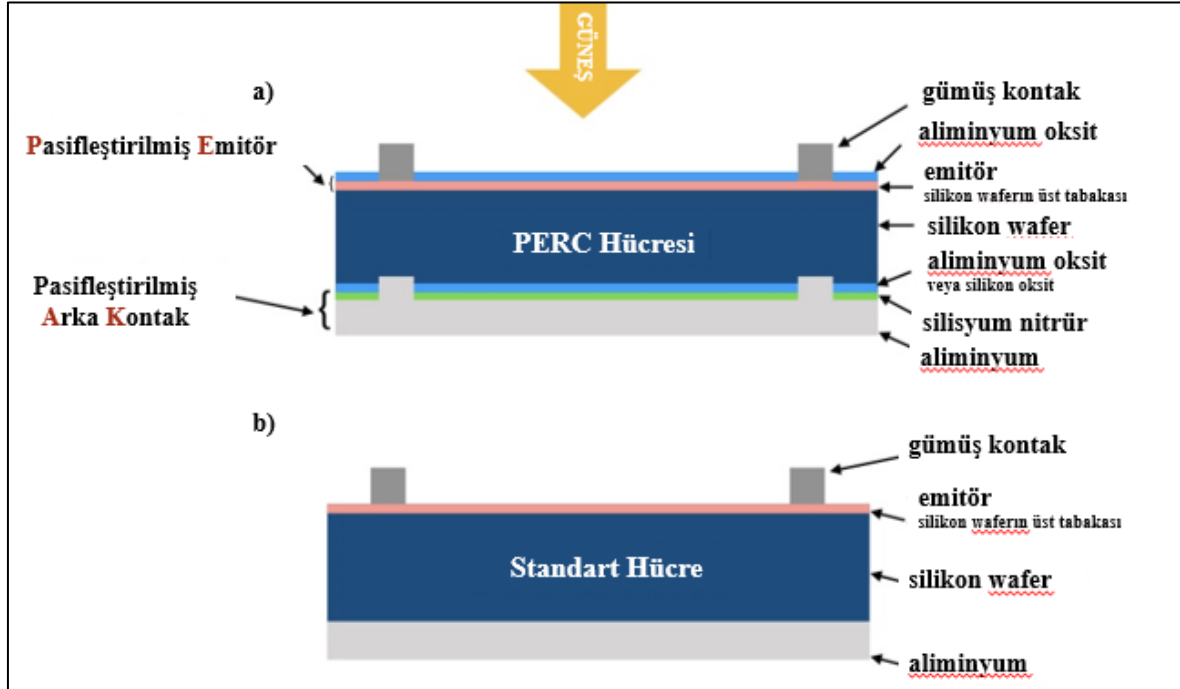


Şekil 2.10. Seçkili emitör güneş hücresi kesiti

2.4.3. Pasifleştirilmiş emitör ve arka temas güneş hücresi (PERC)

Rekombinasyon kayıplarını daha da azaltmak için bu teknolojiye hücrelerin arka yüzeyi $\text{SiO}_x/\text{AlO}_x/\text{SiN}_x$ yığınları ile pasifleştirilmiştir. Şekil 2.11'de hücrenin kesit yapısı gösterilmektedir. Arka yüzeydeki yığını tarafından sağlanan pasivasyon akım akışını engellediğinden, silisyum yüzeye temas sağlamak için dielektrik film üzerinde arka yüzeyde yerel açıklıklar oluşturulur. Direnç kayıpları ve rekombinasyon kayıpları nedeniyle FF (dolum faktörü) ve V_{oc} (açık devre voltajı) arasındaki rekabet, arka yüzeyde belirli bir metal dizaynı sağlanarak optimize edilir. Günümüz PERC hücreleri, tek taraflı aşındırma ile arka yüzey parlatma ve seçkili emitör lazer yapılandırma gibi üretim teknolojisindeki gelişmeler nedeniyle artan pazar payı en yüksek hücreler arasında yer almaktadır ve pazar payı artması

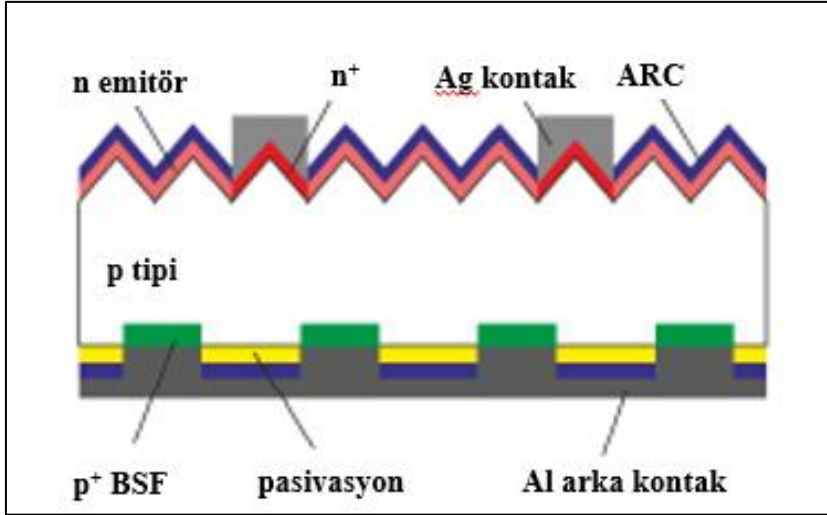
ile üretim maliyeti diğer güneş hücrelerine göre düşüktür [37]. Bu nedenle tez çalışmasında PERC tipi güneş hücresi üretimi üzerinde çalışılmıştır.



Şekil 2.11. Güneş hücresi kesiti (a) PERC tipi (b) standart tip

2.4.4. Pasifleştirilmiş emitör arka lokal olarak yayılan hücreler (PERL)

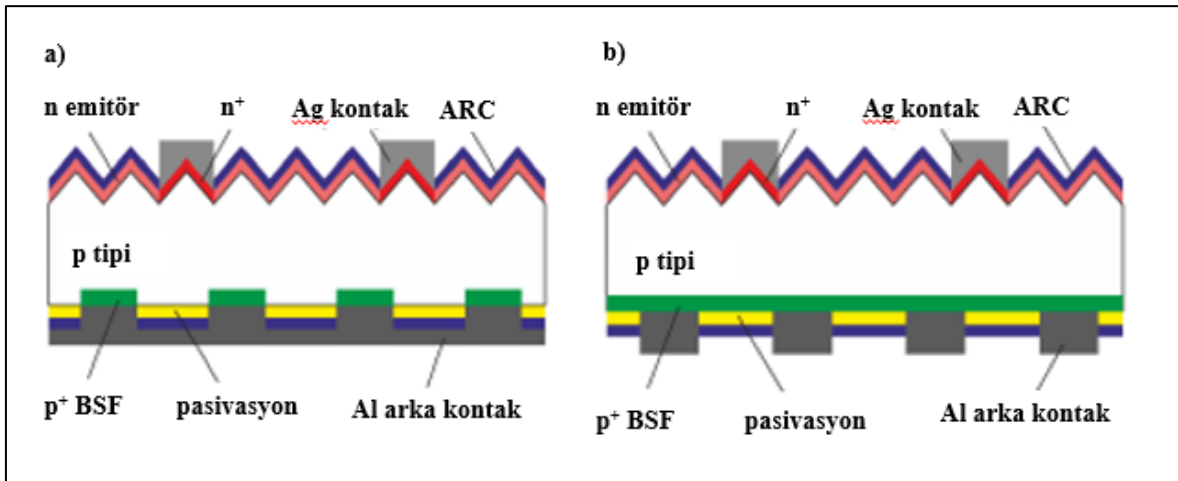
PERC hücresi iyi bir arka yüzey pasivasyonuna sahip olmasına rağmen, metal ile ana malzeme arasındaki temas, waferın katkılama seviyesi genellikle düşük tutulduğu için yüksek direnç kayıplarına neden olur. Bu sorunu çözmek için, hücrenin arka yüzeyi, dielektrik açıklıklar yoluyla lokal olarak yüksek konsantrasyonlarla katkılanır. Böylece metal-Si teması daha düşük bir dirence ulaşır ve yerel katkılama, azınlık taşıyıcılarını yüzeyden uzak tutmak için bir elektrikli ayna görevi görür. Şekil 2.12’de hücrenin kesit yapısı gösterilmektedir. Bu tür bir yapı için %25’e varan verimlilikler bildirilmiştir[40]. Fakat üretim maliyeti oldukça yüksektir.



Şekil 2.12. Pasifleştirilmiş emitör arka lokal olarak yayılan güneş hücresi kesiti

2.4.5. Pasifleştirilmiş emitör arka tamamen dağılık hücreler (PERT)

Hücrelerin arka yüzeyi tamamen yayıldığında, yanıl iletkenlik artacak ve bu da yerel arka temaslar arasındaki mesafeyi %22,5'e varan yüksek verimliliklerle artırma şansı verecektir [38]. PERT yapısı, arka tarafta dağılık aydınlatmayı sağlayacak yüksek perdeli parmaklar oluşturulabileceğinden, çift yüzeyli bir yapıya sahip olma imkanı sağlar. Şekil 2.13'te hücrenin kesit yapısı gösterilmektedir.



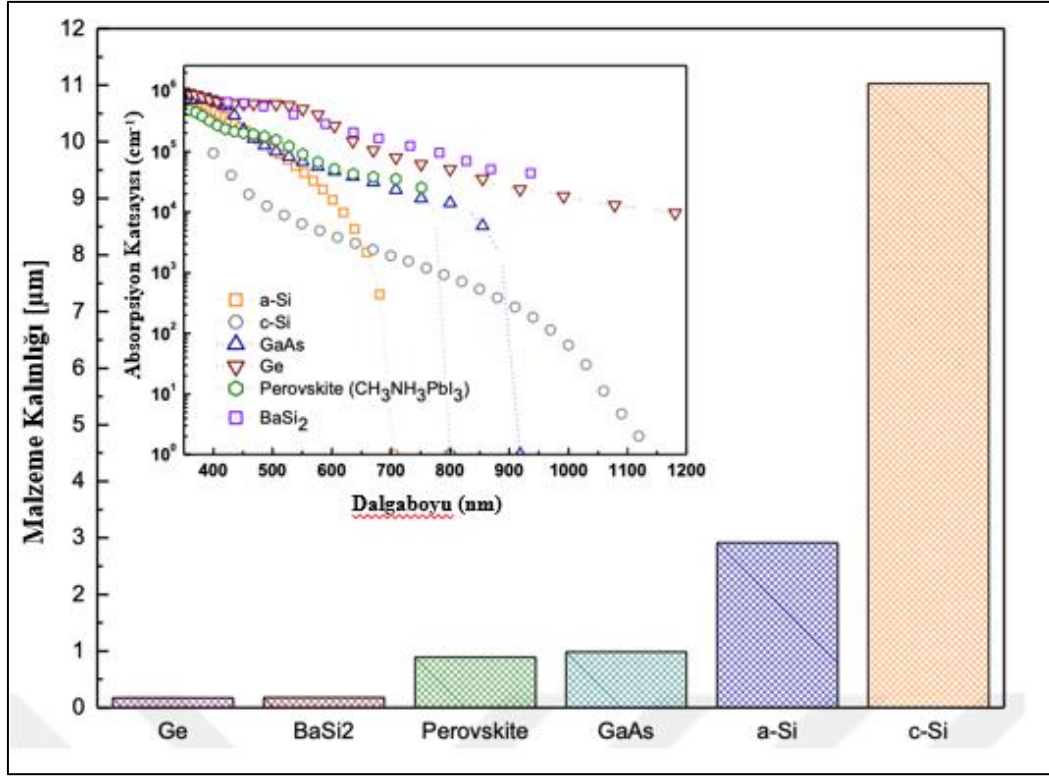
Şekil 2.13. Pasifleştirilmiş emitör arka tamamen dağılık güneş hücresi kesiti (a) tek yüzeyli (b) çift yüzeyli

2.5. Güneş Hücresinde Optik Kayıplar

Tek bir p-n bağlantısı kullanan bir güneş hücresinin maksimum teorik verimi AM 1.5 G ve 1000 W/m^2 koşullarında fotovoltaik cihazlar için maksimum %29,4 verim hesaplaması yapılmıştır. [39]. Ancak hücre verimliliği, güneş hücresindeki çeşitli kayıplardan dolayı bunun çok altındadır. Güneş hücresi bir optoelektronik cihaz olması nedeniyle optik kayıplardan dolayı sorun teşkil etmektedir. Optik kayıplar ise temel olarak ışık soğurmasından kaynaklıdır.

2.5.1. Işık soğurma

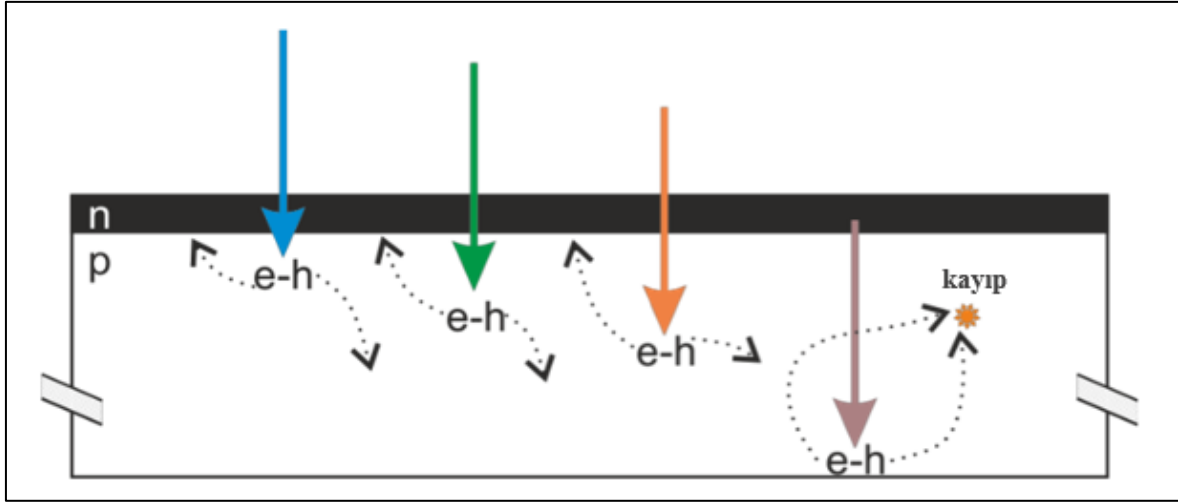
Optik özellikler açısından fotonların soğurulması, FV enerji dönüşümünün en önemli adımıdır. Absorpsiyonun gerçekleşmesi için, gelen fotonların aktif malzeme olarak kullanılan yarı iletkenin bant aralığına eşit veya daha büyük enerjilere sahip olması gerekmektedir. Fotonun enerjisi valans bandında bir elektrona aktarılmakta ve bu elektron enerjisinin korunumunu sağlamak için iletim bandına geçmektedir. m-Si durumunda, 1,12 eV'lik bir bant aralığı enerjisi mevcuttur. Bu nedenle dalga boyları 1100 nm'den kısa olan fotonlar malzeme tarafından emilmektedir. Bununla birlikte, Si dolaylı bir bant aralığı malzemesi olduğundan absorpsiyon işlemi de momentumu koruması gerekmektedir. Kristallerde momentumun korunumu, fotonların absorpsiyonunu veya emisyonunu gerektirmektedir. Dolayısıyla değerlik bandından iletim bandına geçiş için hem enerji hem de momentum korunumu, diğer bir deyişle hem foton hem de foton absorpsiyon - emisyon işlemlerinin aynı anda gerçekleşmesi gerekmektedir. Her bir emisyon-soğurma süreci belirli bir olasılıkla gerçekleştiğinden foton ve foton absorpsiyon-emisyon süreçlerinin aynı anda olması bu süreçlerin olasılıklarını azaltacaktır. İki olasılığın bu çarpımı, dolaylı bant aralığı için absorpsiyon işlemlerini doğrudan bant aralığı malzemesine göre daha küçük hale getirmektedir. Şekil 2.14'te bazı yaygın FV malzemelerinin absorpsiyon katsayılarını ve 600 nm dalga boyunda fotonların %99'unu absorbe etmek için gereken minimum kalınlığa dayalı bir hesaplamayı göstermektedir [40].



Şekil 2.14. Yaygın FV malzemelerinin absorpsiyon katsayıları [40]

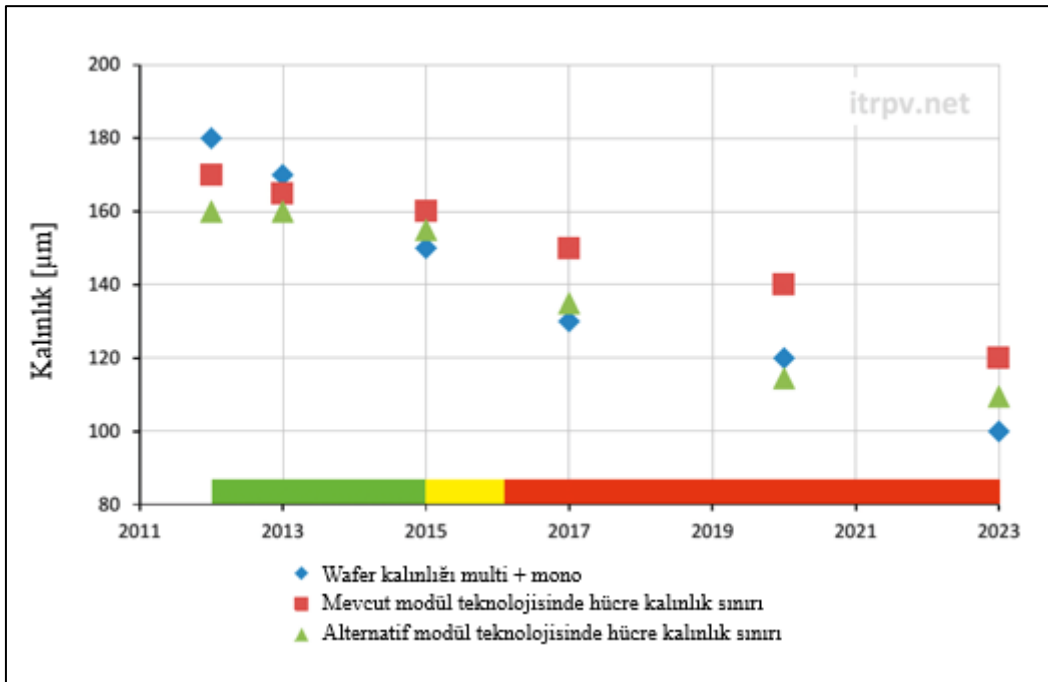
m-Si'nin en düşük absorpsiyona sahip olduğu ve 600 nm'de Ge ile aynı miktarda ışığı absorbe edebilmek için 50 kat daha kalın malzeme gerektirdiği açıktır. Bu nedenle, tüm spektrumun emilimi için çok kalın bir Si wafer kullanılması gerekmektedir. Her dalga boyunun absorpsiyonu, elektron boşluk çiftlerinin üretilmesiyle sonuçlanacak ve yaklaşık 10 mm kalınlığında bir Si levha için mevcut olacaktır.

Düşük absorpsiyonlu malzemeler için daha kalın bir wafer kullanılmasıyla absorpsiyon sorununun çözüleceği gözlemlenmiştir. Öte yandan m-Si FV cihazları, yüzeyden yaklaşık 300 nm derinlikte bulunan çok sık p-n bağlantılarından oluşmaktadır. Bu, difüzyon uzunluğu problemini de beraberinde getirmektedir. Çünkü m-Si cihazlarının çoğu için azınlık taşıyıcılarının difüzyon uzunluğu birkaç yüz mikrometre mertebesinde. Bu durum, birleşimden uzakta birden fazla azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğunda absorbe edilen spektrumun bir kısmının akıma katkıda bulunmayacağı ve rekombinasyon olarak kaybolacağı anlamına gelmektedir ve Şekil 2.15'te gösterilmiştir [41].



Şekil 2.15. Birden fazla azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğunda absorplanan spektrum

İkinci bir sorun olarak, kalın Si waferlerin kullanılması, büyük miktarda malzeme tüketimi nedeniyle maliyeti yüksek cihazların kullanılmasına neden olacaktır. Öte yandan, mevcut m-Si üretim ana akımı 180 μm wafer kullanmakta ve seri üretimde kesilmiş wafer kalınlığı için 2023 yılında Şekil 2.16'da görüleceği üzere tahmini 120 μm 'ye düşmektedir [4]. Maliyeti azaltmak için Si wafer kalınlığını daha da azaltmak kesinlikle uygun olmaktadır. Bununla birlikte, düşük absorpsiyon sorunu, uygun ışık yakalama yaklaşımları ile çözülmesi gerekmektedir.

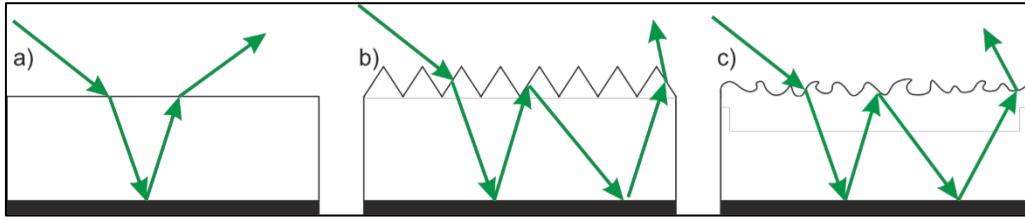


Şekil 2.16. Yıllara göre wafer kullanım kalınlıkları

Yüz mikrometre mertebesinde bir kalınlığa sahip bir m-Si waferının iletim kayıplarından etkileneceği açıktır (Şekil 2.14 ve Şekil 2.16). Bunun sonucunda, m-Si için azınlık taşıyıcılarının absorpsiyonu ve difüzyonu arasında bir rekabet oluşmaktadır.

Yetersiz absorpsiyon ve sınırlı difüzyon uzunluğundan kaynaklanan sorunları çözmek için yarı iletken içindeki fotonun optik yolunun arttırılması yani “ışık tutma” tercih edilmektedir [38]. Işık yakalama ile, gelen foton malzemeyi gerçekte olduğundan daha kalın görürken, oluşturulan e-h çiftleri bağlantı tarafından ayrılana kadar yeniden birleştirme olmadan yarı iletken boyunca seyahat edebilmektedir.

Yüzey yapılandırmasının ışık tutma üzerindeki etkisi, Şekil 2.17'de gösterilen şemalarla anlaşılabilir. Açısal yön sağlayan uygun yüzey yapıları ile, bir ışının yol uzunluğu, önemli bir iyileştirmeye yol açan wafer kalınlığının birçok katına kadar arttırılabilir. Örneğin, piramit dokulu bir Si levhasının toplam ağırlıklı ortalama yansıması, parlak levhadan yaklaşık %25 daha küçüktür [36].



Şekil 2.17. (a) Düz yüzey, (b) piramit dokulu yüzey ve (c) izotropik kazınmış yüzey için yüzey dokusunun gelen fotonun optik yolu üzerindeki etkisi

2.6. Yüzey Yapılandırma Metotları

Işık soğurulmasını arttırmak için birkaç ışık tutma yöntemi ve yansıma önleyici kaplamalar geliştirilmiştir [42]. Bu tez kapsamında çalışılan yüzey yapılandırma metotları gösterilmiştir.

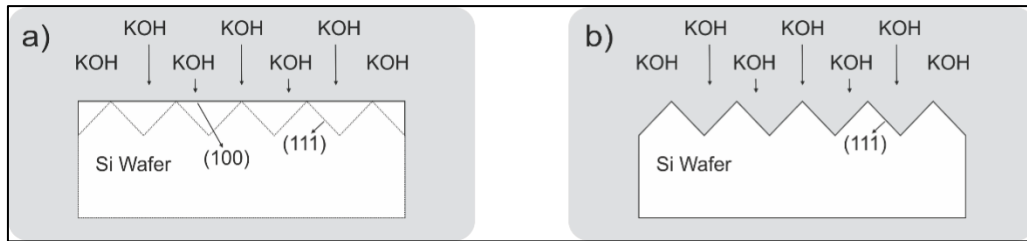
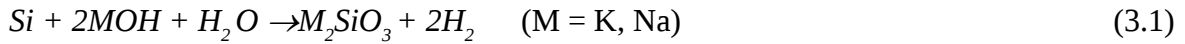
2.6.1. Alkali yüzey yapılandırma metodu

Yüzey yapılandırma, FV teknolojisinde önemli bir konu olan optik kayıpları azaltmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Optik kayıpların azaltılması, ışık soğurulmasını artırarak güneş hücresinin verimliliğinin iyileştirilmesi ile doğrudan ilişkilidir. Anizotropik

aşındırma, yansıyan ışığın toplanabilmesi ve ışık soğurulmasının iyileştirilebilmesi için yüzeyde piramidal yapılar oluşturmaktadır. Silisyum yüzey üzerindeki eğik ışık insidansı, ön p-n bağlantısının yakınında ışığın daha iyi emilmesini sağlamaktadır. Ek olarak, dokulu yüzey ışığından soğurulan ışığın dahili olarak da yakalanmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, ilk geçişte soğurulmayan ışık daha fazla absorbe edilme fırsatına sahiptir ve kısa difüzyon uzunluklarına sahip hücreler için çok faydalı olmaktadır [43].

Alkali hidroksitler, kristal oryantasyona bağlı olarak silisyum ıslak aşındırma için reaktifler olarak yaygın olarak kullanılmaktadır [44]. [100] silisyum düzlemleri, (110) ve (111) gibi diğer düzlemlerden nispeten daha hızlı aşınmaktadır. Bu, aşındırmaya oldukça dirençli bir yüzey olan (111) düzlemlerin kesişmesiyle sonuçlanır. Aşındırma sonucunda açıkta kalan yüzey üzerinde yaklaşık 3-5 µm boyutunda piramitlerdir [45]. Şekil 2.18’de [100] ve (111) yönlü düzlemler ile aşındırma gösterilmiştir.

Sodyum hidroksit/Potasyum hidroksit (KOH/NaOH) ve izopropil alkolün (IPA) bir karışımı, genel reaksiyona öncülük etmektedir:



Şekil 2.18. (a) Aşındırmaya dirençli [100] ve (b) aşındırılmış [111] yüzeyleri

Islanamayan veya zor ıslanabilen yüzeyler, çözelti ile Si wafer arasında büyük temas açıları sunmaktadır. Geliştirilmiş yüzey yapılandırma için, silisyum wafer yüzeyinin yeterli ıslanabilirliğini sağlamak için silisyum ile kimyasal çözeltinin iyonize elektroliti arasındaki arayüz enerjisi azaltılması gerekmektedir. Silisyum yüzeyin ıslanabilirliği zayıf olduğunda, yetersiz bir piramit çekirdeklenmesi meydana gelir ve bu da hidrojen kabarcıklarının katı yüzey üzerinde daha büyük bir kısmı işgal etmesine izin vermektedir. Daha önce belirtildiği gibi, silisyum yüzeyin hidrojen ile işgal edilmesi, onu zayıf ıslanabilir hale getirmektedir. Çözeltide kullanılan IPA gibi ıslatıcı maddeler hidrofilikliğini ve ıslanabilirliği

arttırmaktadır. Ayrıca kabarcıkların silisyum yüzeyine yapışmasına neden olan kuvvetleri azaltmaktadır [46]. Bu şekilde, bir yüzey aktif madde olarak IPA, piramitlerin çekirdeklenmesini geliştirmektedir. Sadece hidrojen kabarcıklarının giderilmesine yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda büyük piramitlerin oluşumunu da teşvik etmektedir [47].

Yüzey yapılandırma işlemin gerçekleştirildiği koşullara ve parametrelere oldukça duyarlıdır. Bu durum alkali yapılandırma için hassasiyet oluşturmaktadır. Oluşabilecek ve elde edilen verimi etkileyen problemler arasında, wafer yüzeyine çok uzun süre yapışık kalan, reaksiyon ürünü olan hidrojen kabarcıklarının lekeleri ve bunun yanı sıra hiçbir reaksiyon ürünü olmayanlar olabilmektedir. Böylelikle, piramitler veya piramidal yapıların homojenliği ortaya çıkmayabilmektedir. Islak kimyasal işlem, düşük maliyeti nedeniyle FV üretiminde yaygın olarak kullanılmasına rağmen, bu kimyasal işlemleri geliştirme eğilimi vardır. Deneme, kimyasalları ve zaman sürecini azaltmak, süreçleri basitleştirmek ve hatta toksik olmayan ve düşük maliyetli kimyasalların kullanımı yoluyla bu tür süreçlerin maliyetini ve çevresel etkisini azaltmak ve son olarak yansıma oranının %10'un altına düşmesi için farklı metotlar ilgi artmıştır.

Son yıllarda, metal destekli kimyasal aşındırma yöntemi geliştirilmiştir ve Si güneş hücresi için yansıma kayıplarını daha da azaltmak için uygulamada kapsamlı çalışmalar yapılmaya başlanmıştır [48]. Metal destekli kimyasal aşındırma yöntemi genellikle oda sıcaklığında birkaç dakika boyunca gerçekleştirilmektedir. Bu da nispeten yüksek bir sıcaklıkta onlarca dakika süren geleneksel alkali kimyasal aşındırma yöntemine kıyasla enerji tüketimini büyük ölçüde azaltmaktadır. Ek olarak, c-Si için mikroskobik düzeydeki piramit yapıları ve m-Si için geleneksel dokulama yöntemleriyle elde edilen mikroskobik düzeydeki solucan benzeri yapılarla karşılaştırıldığında, genellikle nano teller ve nano gözenekler elde edilmektedir [49].

2.6.2. Metal destekli kimyasal aşındırma

Si, nitrik asit (HNO_3) gibi bir oksitleyici ajan içeren hidroflorik asidin (HF) sulu çözeltilerinde aşındırma, ilk olarak 50 yıldan fazla bir süre önce çalışılmıştır [50]. Araştırmacılar, Si yüzeyinde nano yapıların oluşabileceğini göstermiştir. Yüksek oranda HF ve oksidan seyreltisi kullanan bu Si dağlama yöntemine yaygın olarak "leke aşındırma" denir. 1997'de leke aşındırma, aşındırma hızının bir metal katalizör eklenerek

hızlandırılabilmesiyle daha da geliştirilmiştir. Gözenekli Si, bir HF/HNO₃/H₂O aşındırma çözeltisine batırılmış Si substratı üzerinde biriken Al filminin bir katalizörü kullanılarak oluşturulmuştur. Al ve HNO₃ arasındaki reaksiyon, kimyasal aşındırmanın hızlı başlatılması için gerekli yükleri üretmiş, bu da gözenekli Si oluşumu için gerekli olan kuluçka süresini önemli ölçüde azaltmıştır [51]. Bu, metal destekli kimyasal aşındırmanın ilk gösterimidir. Kısa bir süre sonra, daha basit bir varyant Li ve Bohn tarafından araştırılmış ve sulu HF'ye daldırılmadan önce Si [100] yüzeyinde ince bir Au, Pt veya Au/Pd tabakasının (nominal kalınlık 10 nm'den küçük) biriktiğini bulmuştur. Hidrojen Peroksit (H₂O₂) aşındırma işlemini kolaylaştırmış, bu da farklı morfolojilere ve ışık yayan özelliklere sahip gözenekli Si üretmenin basit ve etkili bir yolunu sağlamıştır. Li ve Bohn tarafından açıklanan bu aşındırma yöntemleri, Si tabanlı nano yapıların üretilmesi için çeşitli yaklaşımlara ilham vermiştir [52].

MDKA işlemini basitleştirmek için, metal biriktirme ve elektrokimyasal dağlamanın aynı anda gerçekleştiği tek aşamalı metal destekli kimyasal dağlama yöntemi geliştirilmiştir. Si yapılarının topolojisi, aşındırma koşulundan ve biriktirme yönteminden ve katalizör olarak kullanılan asil metallerin morfolojilerinden ve çözeltinin bileşiminden önemli ölçüde etkilenmektedir.

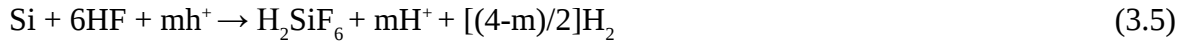
MDKA'da, kısmen ince bir metal tabakasıyla kaplanmış olan silisyum, HF ve H₂O₂'nin aşındırıcı çözeltisine tabi tutulmaktadır. Metal ile temas halinde olan silisyum bölgeleri daha hızlı oksitlenir ve sonuçta ortaya çıkan SiO₂, metalin battığı boşluklar oluşturmak için HF ile aşındırılır. Sürecin kimyasını açıklamak için önerilen birkaç reaksiyon mekanizması vardır [53]. Bu reaksiyonlar aşağıda verilmiştir. Ayrıca Şekil 2.19'da gösterilmiştir.

Katot reaksiyonu;

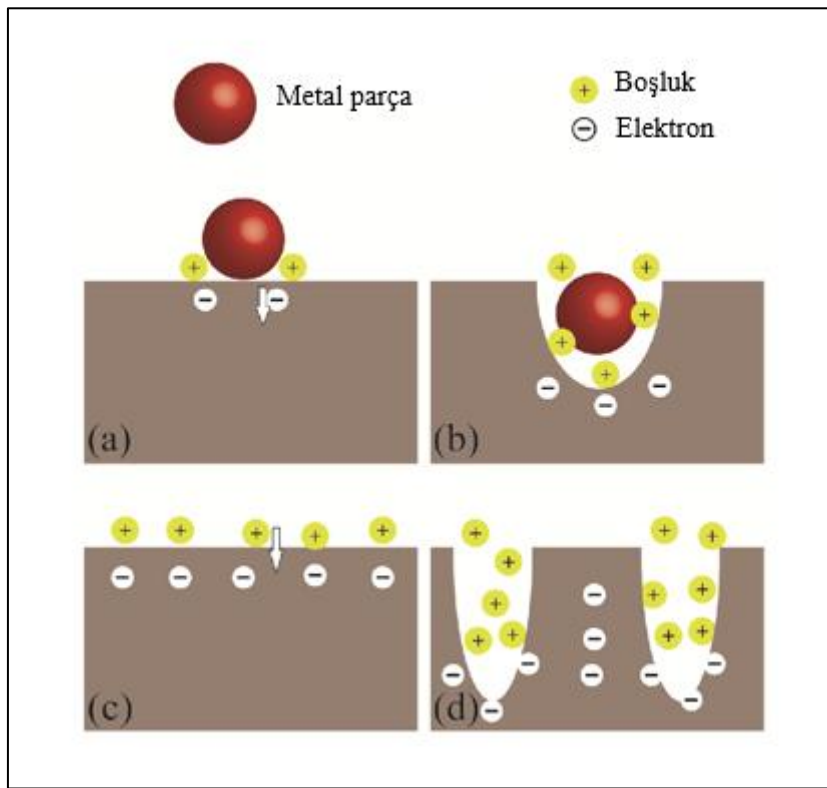
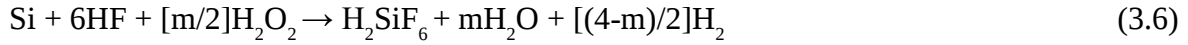


burada M bir metaldir ve n değerlidir.

Anot reaksiyonu;



m, çözülmüş Si atomu başına delik sayısıdır; 2 ile 4 arasında değişen H₂O₂'nin katodik indirgenmesi dikkate alındığında, genel reaksiyon:

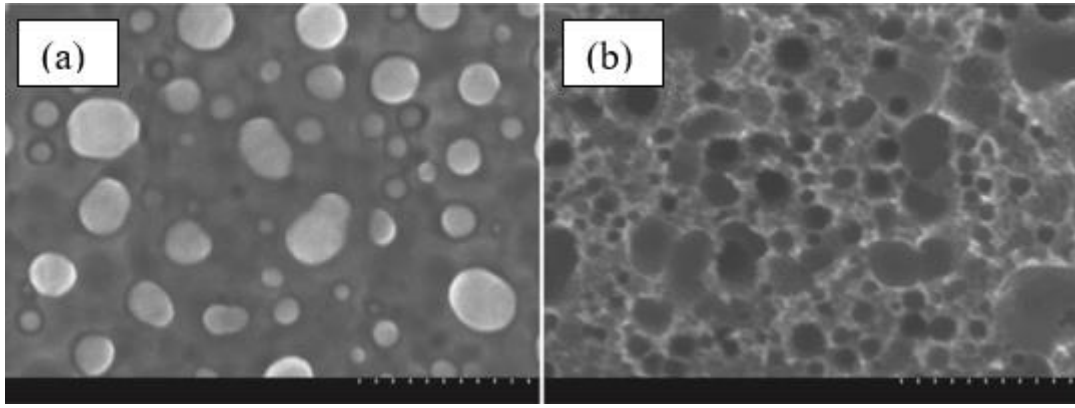


Şekil 2.19. Metal destekli kimyasal aşındırma reaksiyon mekanizmaları

Branz ve diğerleri (2009) yaptıkları çalışmada, HAuCl₄/HF/H₂O₂'den oluşan aşındırıcılarla nano gözenekli m-Si üretmek için tek adımlı Au destekli kimyasal aşındırma yöntemi geliştirmiştir. HAuCl₄'ün indirgenmesinden kaynaklanan Au nano parçacıklarının oluşumu, bir Au nano parçacığının yerel katalitik etkisi nano gözenekleri oluşturmuştur. Nano gözenekler, yansımanın azalmasına neden olmaktadır. 5 nm koloidal Au çözeltisinde 900 s boyunca aşınmış ve 20 ~ 180 s boyunca HAuCl₄ çözeltisinde aşınmış özdeş waferlar ile karşılaştırmıştır. Yansıma koloidal Au ile kazınmış numune, 300 ila 1 000 nm arasında

yaklaşık %8'in altındadır. Ek olarak, Si'nin yansıması, wafer arka yüzeyinden ve numune tutucudan yansıyan ışık nedeniyle λ , 1 000 nm'yi geçtiğinde yükselmektedir [54].

AgNO₃'ün maliyeti HAuCl₄'ün maliyetinden çok daha düşüktür ve bu nedenle AgNO₃, Si'nin ticari üretimi ve Si tabanlı güneş hücrelerinin seri üretimi için umut vericidir [55]. Resim 2.1, p-tipi Si [100] düzlemlı yüzeyinin HF/AgNO₃ solüsyonunda 30 saniye boyunca kazındıktan sonra ve çıkarıldıktan sonra taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerini göstermektedir.



Resim 2.1. (a) 30 saniye boyunca HF/AgNO₃ çözeltisi ile kazınmış Si üzerindeki Ag nano parçacıklarının taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (b) Ag sonra Si substratının üst yüzeyinde oluşan sığ nano gözenekler [55].

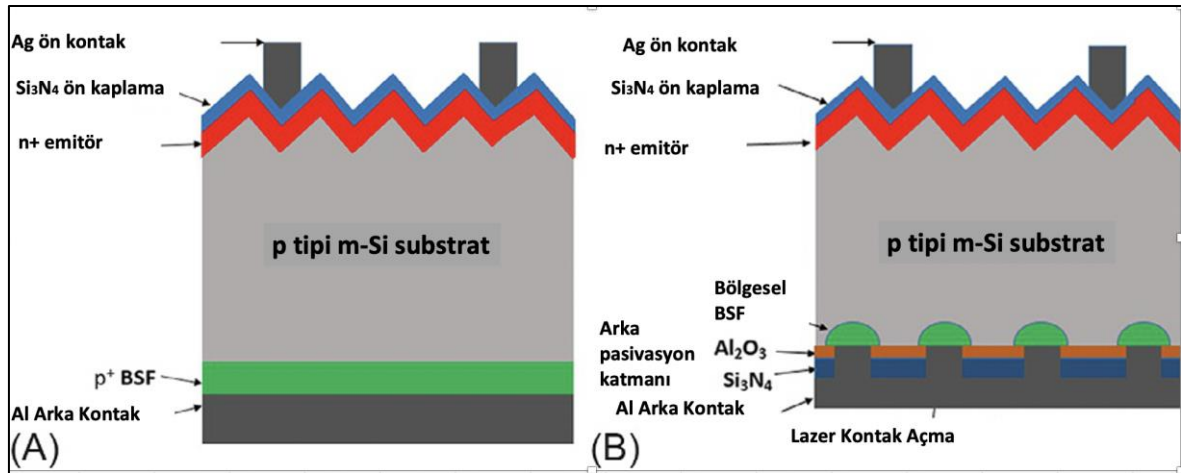
3. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Tez kapsamında üretilen pasifleştirilmiş emitör ve arka temas hücresi (PERC) ve optik kayıpların azaltılması için yüzey yapılandırılması için uygulanan metal destekli kimyasal aşındırma (MDKA) metodu için yapılan literatür çalışmaları iki aşamada incelenmiştir.

3.1. Pasifleştirilmiş Emitör ve Arka Temas Güneş Hücresi (PERC) Literatür Çalışmaları

Mono silisyum wafer üzerindeki pasifleştirilmiş emitör ve arka temas güneş hücresi (PERC), endüstriyel seri üretimi nedeniyle güneş hücreleri arasında ana araştırma alanı haline gelmiştir. Birçok m-Si tabanlı güneş hücre teknolojisi arasında, şu anda %30 pazar payına sahip olan arka yüzey alanı (BSF) hücreleri 2024 yılına kadar üretiminin durdurulması ve PERC/PERL/PERT güneş hücreleri bir sonraki pazara hâkim olması beklenmektedir [40].

Alüminyum arka yüzey alanı (BSF), ekran baskılı Alüminyum (Al) BSF güneş hücresinin arka tarafında standart bir pasivasyon kalitesi sağlamaktadır. Ayrıca arka alüminyum kontağa ulaşan kızılötesi ışığın önemli bir bölümünün silisyum alt tabakaya geri yansıtılmaması nedeniyle daha az optik üretim vardır; daha ziyade, güneş spektrumunun IR kısmını emecek ve hücre sıcaklığında bir artışa yol açacaktır. Bu optik ve elektriksel kayıplar, Şekil 3.1’de gösterildiği gibi PERC dizaynı ile en aza indirilebilmektedir [49].

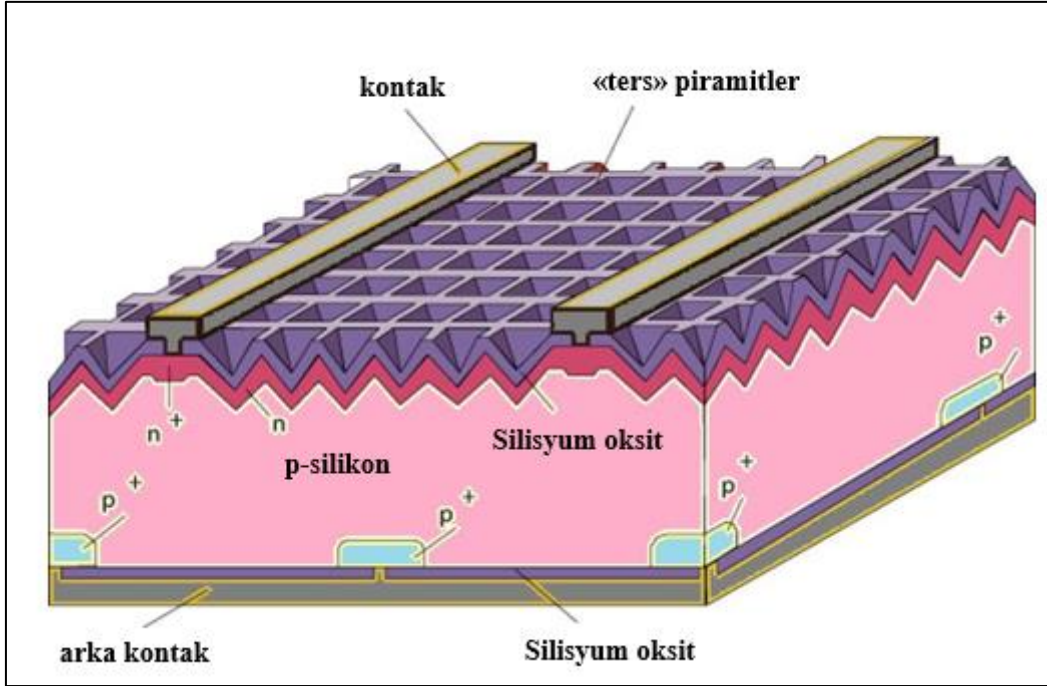


Şekil 3.1. (a) P tipi Al-BSF kesiti (b) P tipi PERC güneş hücresi [49]

1989'da UNSW'de (New South Wales Üniversitesi), A.W. Blakers ve diğerleri, PERC güneş hücresini geliştirmeye çalışan ilk kişilerdir [56]. 2002'de Fraunhofer ISE enstitüsünden araştırmacılar, bir lazer yangın teması (LFC) işlemi uygulayarak PERC güneş hücrelerinin dönüşüm verimliliğinin %22,1 olduğunu bildirmiştir [57].

SiO₂ (Silisyum Oksit) orijinal olarak hem p-tipi hem de n-tipi PERC güneş hücreleri için arka pasifleştirici katman olarak kullanılmış olmasına rağmen Al₂O₃ (Alüminyum Oksit), negatif sabit yüklerin varlığı nedeniyle bor katkılı silisyum yüzeyi ile mükemmel kimyasal pasivasyon ve alan etkili pasivasyon sağladığından, p-tipi altlık için pasivasyon katmanı olarak kullanılan en yaygın malzemelerdir. Silisyum Nitrür (Si₃N₄) genellikle arka tarafta kapak katmanı olarak kullanılmaktadır. Arka taraftaki Si₃N₄ kapak katmanı, pasifleştirici katmanları temas oluşumu sırasında Al macunundan zarar görmekten korumakta ve ışığı dahili olarak yansıtmaktadır. Bu da daha iyi optik üretim sağlamaktadır. Al₂O₃/Si₃N₄ dielektrik katman yığını sırasıyla üç önemli rol oynamakta ve iyi kimyasal pasivasyon sağlamaktadır. Ayrıca alan etkisi pasivasyonu sağlamakta ve ışığın arka tarafa daha iyi yansımalarını da desteklemektedir [58].

Solar Fotovoltaik Laboratuvarı ISFH (Avustralya) ilk PERC hücre yapısını 4 cm² alan üzerinde %22,8 verimle, p-tipi, 0,2 Ω.cm öz dirençli, float zone tekniği Si substratı ile hücreyi üretmiştir. Fabrikasyon hücre tasarımı Şekil 3.2'de görülmektedir. Açık devre gerilimi 696 mV, kısa devre akım yoğunluğu 40,3 mA/cm² ve doldurma faktörü %81,4 olarak ölçülmüştür. Güneş hücresinin yapısı incelendiğinde yüzey morfolojisi ters piramitler ile oluşmaktadır. Tersine çevrilmiş piramit yapısı oluşturmak için, seyreltik KOH çözeltisi içinde anizotropik olarak kimyasal aşındırma metoduyla üst yüzeyde bir oksit deseni oluşturulmuştur. İkinci olarak, oksit tabakası çıkarılmıştır ve ardından metal-silisyum teması oluşturmak için diğer bir oksit tabakası büyütülmüştür. Üçüncü aşamada, oksit bölgeleri ağır fosfor difüzyonuna maruz bırakılmıştır. Daha sonra üst yüzey difüzyonu için bir pencere açılmış ve oksit tabakası uzaklaştırılmıştır. Güneş hücresinin pasivasyonunu sağlamak için oksit tabakası ve yansıma önleyici kaplama yapılmıştır. Metal-silisyum temas kontak bölgelerinin ve arka temas deliklerinin aşındırılması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra titanyumun üst temas metalleri ve kurşun ve arka Al kontağı buharlaştırılmıştır. Son olarak, ön yüzey metal teması sinterlenmiştir [56].

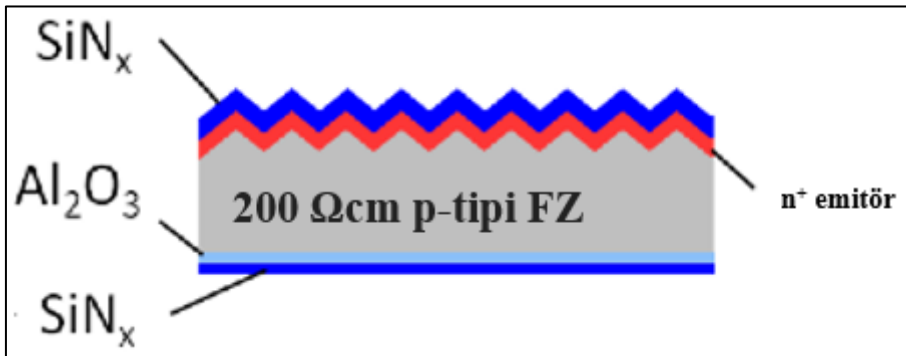


Şekil 3.2. Blakers grubu tarafından üretilen PERC hücresinin şematik diyagramı [56]

ISFH grubu (2013), PERC hücre üretimi üzerine beş araştırma yayınlamıştır. İlk makaleleri, %21,7 verimlilik, 673 mV açık devre voltajı, 40,3 mA/cm² kısa devre akımı PERC hücresinin 100 yönelimli, 300 µm başlangıç kalınlığına sahip bor katkılı Fz-silisyum waferlar üzerinde üretildiğini bildirmektedir. İşleme ilk olarak KOH testere hasarı giderme ile başlanmıştır. İkinci aşamada standart RCA temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Üçüncü aşamada, PECVD ile difüzyon bariyeri için 100 nm kalınlığında silisyum nitrit kaplaması yapılmıştır. Dördüncü aşamada, frekans katlamalı Nd:YVO₄ lazer ile pencere açma işlemi uygulanmıştır. Pencere açıldıktan sonra beşinci aşamada, bir KOH-IPA solüsyonunda ön tarafa rastgele piramit dokusu işlenmiştir. Altıncı aşamada, POCl₃ kaynağından bir n⁺ yayıcı difüzyonu bir kuvars fırınında işlenmiştir. Yedinci aşamada, HF solüsyonunda waferın ön yüzeyinden PSG ve arka yüzeyinden SiN_x kaldırılmıştır. Sekizinci aşamada, atomik katman biriktirme (ALD)'de 30 nm kalınlığında Alüminyum Oksit tabakası ile arka yüzeyin 200 °C'de pasifleştirilmesi yapılmıştır. Dokuzuncu aşamada, hücreler azot atmosferinde 425 °C'de 15 dakika boyunca tavlansmıştır. Onuncu aşamada, 100 nm kalınlığında silisyum nitrat kaplama tabakası biriktirilmiştir. Alüminyum Oksit ve Silisyum Nitrat yığınının hücrenin arka tarafında lazer ile 2,1 mm aralık-kare nokta geometrisi ile açılmıştır. On birinci aşamada, RCA temizliği tekrar uygulanarak waferlar HF'ye daldırılmıştır. On ikinci aşamada, 10 µm kalınlığında alüminyum tabaka, hücrenin arka yüzeyinde e-ışın buharlaşması ile biriktirilmiştir. Tünelleme katmanı, AlO_x'in biriktirdiği atomik katman

tarafından oluşturulmuştur. 10 nm kalınlık waferın ön tarafında çift katmanlı SiN_x yansıma önleyici kaplama biriktirilmiştir. Son olarak, alüminyum ızgaralı buharlaştırma, elektron ışını buharlaştırma yöntemi ile işlenmiştir [59].

PERC hücreleri üzerine ISFH grubunun ikinci araştırması %20,7'lik maksimum verimliliğe sahiptir. Araştırmaları, $\text{AlO}_x/\text{SiN}_y$ pasivasyonu için pSC1-HF/HCL, pSC1-HF/HCL-HFO₃, HF/O₃ ve PSG-etch gibi farklı temizleme işlemlerinin etkisini, RCA temizleme işleminin sonuçlarını waferlar üzerinde karşılaştırarak ve 1,5 $\Omega\cdot\text{cm}$ yüzey bölge p-tipi waferlarını da içermektedir. Waferlar üzerinde temizleme prosedürlerinin azınlık taşıyıcı yaşam boyu etkilerini araştırmışlardır. Sonuçlar incelendiğinde, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ pasivasyonundan önce pSC1, HF-HCL, HFO₃ veya HF/O₃ olarak HF/O₃ ile sonlandırılan temizleme dizilerinin 1 ms'den daha uzun etkin ömürler, 80-140 fA/cm^2 emitör doyma akımları ve karşılık gelen yüzey ile sonuçlandığını göstermiştir ve rekombinasyon hızları da 15 cm/sn 'dir. Ayrıca, PERC hücre üretiminin kontrollü testi için iki farklı üretim yöntemi kullanmışlardır. Prosedür farkı, yüzey yapılandırma ve arka yüzey alanı parlatma adımı için arka yüzeyin korunmasıdır. Wafer deneme temizleme dizilerini uygulayan PERC güneş hücreleri, 50 cm/s 'den daha düşük etkili yüzey yeniden birleştirme hızları göstermektedir. Üretilen PERC hücresi Şekil 3.3'te görülmektedir. pSC1, HF-HCL temizleme prosedürleri %19,4 verim gösterirken pSC1, HF-O₃ temizleme ile imal edilmiş hücreler %20,4 verim ile sonuçlanmıştır. Bununla birlikte, en iyi verim, arka pasivasyondan önce RCA temizleme prosedürü ile fabrikasyon yönteminden elde edilmiştir [45].



Şekil 3.3. ISFH grubu tarafından üretilmiş PERC hücre tasarımı [45]

Imec araştırma grubu (2014), p-tipi Cz-Si 1.5 $\Omega\cdot\text{cm}$ waferlarda %20,1 verimlilik rekorunu kırmıştır. Araştırmalarında monokristal PERC güneş hücresinin arka tarafının parlatılması incelenmiştir. Parlatmanın etkisi, temas oluşumu, ışık tutma ve yüzey rekombinasyonu

ölçümleri ile araştırılmıştır. P tipi silisyum wafer üzerinde iki taraflı rastgele piramit dokulu PERC hücresinin üretimine başlanmıştır. İşleme, aşındırma hızı $2 \mu\text{m/sn}$ olan HF/HNO_3 çözeltisi ile tek taraflı aşındırma ile devam edilmektedir. Parlatma işleminden sonra gözenekli silisyum KOH solüsyonu ile uzaklaştırılmıştır. PEVCD ile arka ve ön taraflar için yansıma önleyici kaplamalar ile işleme devam edilmiştir. Arka taraf ve ön taraf için SiN_x ve SiO_2 biriktirilmiştir. Daha sonra dielektrik tabakanın lazer ablasyonu yapılmıştır. Al püskürtme, tek Ag serigrafi ve son olarak birlikte ateşleme işlemleri son 3 adımda uygulanmıştır. İlk çalışma sonucunda arka yüzeyi tamamen pürüzsüz olan güneş hücresinin verimliliği azalmaktadır. Çizelge 3.1'de gösterilen sonuçlar, 5-6 μm piramit aşındırmanın, 8-10 μm piramit bazlı dokulu waferlar için hücre performansı üzerinde en iyi etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Başka bir deyişle, 200-500 nm aralığındaki pürüzlülük, ışık tutma ve temas oluşumu için daha verimli iken mükemmel düz bir arka yüzey, yüzey rekombinasyonu için daha etkilidir [60].

Çizelge 3.1. Si aşındırmasına bağlı verimlilik çizelgesi

	Si Aşındırması (μm)	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (mV)	FF (%)	Verimlilik (%)
0	Ortalama	37,99	650	78,80	19,50
	En İyi Sonuç	38,04	651	79,30	19,60
3	Ortalama	38,34	652	79,20	19,80
	En İyi Sonuç	38,41	654	79,60	19,90
6	Ortalama	38,38	651	79,70	19,90
	En İyi Sonuç	38,52	653	80,10	20,10
10	Ortalama	38,25	646	78,60	19,40
	En İyi Sonuç	38,48	649	79,10	19,70

3.1.1. Çift yönlü PERC

Çift yönlü PERC, PERC teknolojisinin en etkileyici yönüdür. Diğer gelişmiş hücre mimarilerin aksine, PERC temelde iki yüzeyli değildir. Bunun nedeni, PERC hücresinin konfigürasyonunun katı bir yerel-BSF oluşturan Al macunu katmanı içermesidir. Bununla birlikte, PERC'yi iki yüzeyli bir güneş hücresine dönüştürmek için gereksinimler nispeten küçüktür ve yalnızca tüm alana yayılan macunun yerine bir Al ızgara uygulamaktır [61].

PERC'in iki yüzeyli potansiyeli, teknolojinin tahmin edilenden daha fazla yayılmasını ve daha uzun süre devam etmesini sağlayacak belki de en önde gelen özelliğdir. PERC yaklaşımı, en kolay ve en uygun maliyetli iki yüzeyli yapıdır. Tartışılmaz avantajı, tek yüzü

PERC hücre işlemine aşağı yukarı eşdeğer olan maliyettir. PERC, Ag'nin arka tarafta kullanılmasını neredeyse önlerken diğer iki yüzeyli konfigürasyonlar çok daha pahalı metal gerektirmektedir. Yine de, standart güneş hücrelerinde olduğu gibi, şeritler Al ile lehimlenemez, bu nedenle arka kontaklar hala Ag tabanlıdır.

EUPVSEC 2015'te ISFH grubu tarafından sunulan araştırma makalelerinden biri, iki yüzeyli PERC teknolojisini FV topluluğuna ilk kez gerçekleştirme yolunu göstermiştir. Çalışmalarında, çift yönlü PERC için tek yüzlü PERC üretim dizisini kullanırken geleneksel tam alanlı Al arka katmanı yerine arka Al kalın kontak ızgarasının optimizasyonunu önermektedir [61].

Chunduri ve diğerleri (2019), 2015 yılında ISFH grubu tarafından sunulan araştırma sonrasında, önde gelen hücre üreticileri tarafından tanınmış araştırma enstitüleri veya üniversitelerin işbirliği ile yoğun ARGE faaliyetleri yürütüldüğünü bildirmişlerdir. Günümüzde, çift yüzeyli PERC oldukça köklü bir teknolojidir ve 2020 Uluslararası Fotovoltaik Teknoloji Yol Haritasında yakın gelecekte solar FV alanında önde gelen teknoloji olacağını öne sürmüşlerdir. Alüminyum kontakları azaltarak çift yüzeyliliği günümüzün %70-75 seviyelerine çıkarmak için macunlardaki çalışmaların arttırılacağını ve çoklu baralar gibi tamamlayıcı modül teknolojilerine geçileceğini bildirmişlerdir [62].

Zhang ve diğerleri (2020) çalışmalarında, çift yüzeyli PERC hücreleri üreterek ön yüzeyde %22,27 maksimum verim ve arka yüzeyde %15 verim elde etmişlerdir. Araştırmalarında lazer doplama ile çalışarak p-n eklemine ve yüzey direncinin ilişkisi açıklanmıştır. Yapılan çalışmada belirli lazer tarama hızı, frekansı ve lazer gücü ile farklı kalınlıktaki SiN_x tabakasını optimize etmişlerdir. 23,4 W lazer gücü, 85 Ω /kare film direnci ile 50 nm PSG ile lazer doplama sonrası daha yüksek ön verimlilik için fosfor difüzyonunun 130 Ω /kare direnci ile iyi bir uyum içinde olduğu belirtilmiştir. Lazer doplamanın iyileştirilmesi sayesinde %0,35'lik bir mutlak verimlilik kazancı elde edilmiştir. I_{sc} değeri 100 mA kazanç ile 9,93 A'dan 10,03 A'ya yükseltilmiş ve V_{OC} değeri 0,657'ye ulaştırılmıştır. Arka verimlilik için 95 $\pm$ 6 nm kalınlıktaki SiN_x ile en iyi çift yüzey elde edilmiştir. P-tipi çift yüzlü PERC için çift yüzölçüm oranı %69,11 elde edilmiştir [63].

3.2. Metal destekli kimyasal aşındırma metodunun literatür araştırması

Kristal güneş hücrelerinin yüzey yapılandırılması için uygulanan MDKA yönteminde kullanılan metal çeşidine göre literatür çalışmaları gümüş (Ag) destekli, gümüş/bakır (Ag/Cu) destekli ve tez çalışmasında da uygulanan bakır destekli olarak üç'e ayrılmıştır.

3.2.1. Ag destekli kimyasal aşındırma metodunun literatür araştırması

Hongcheng ve diğerleri (2020) yaptıkları çalışmada Ag metalini kullanarak MDKA metodu ile PERC güneş hücresi üretmişlerdir. Mono kristal Si waferlar, 65 °C'de NaOH (0,12 M) ve H₂O₂ (0,30 M) ile önce temizlenmiştir. Ters piramit elde etmek için H₂O₂ (2,49 M), AgNO₃, HF ve NH₄HF₂ (0,35 M) içeren solüsyonlar kullanılmıştır. Her kimyasal işlem sonrası deiyonize su ile durulama yapılmıştır. Biriken Ag çıkarılması için oda sıcaklığında 5 dakika boyunca H₂O₂ (0,50 M) ve sulu amonyak (0,19 M) çözeltileri uygulanmıştır. Daha sonra 2 dakika HF (0,06 M) solüsyonunda durularak yüzeydeki sulu amonyak uzaklaştırılmıştır. Hemen ardından, ters piramitli Si yapıları, 55 °C'de H₂O₂ (2,99 M), NH₄HF₂ (0,53 M) ve %0,5 ticari katkı maddesi ile yeniden yüzey yapılandırma (NSR) uygulanmıştır. 1 µm çapında ve %8,62 yansıma oranına sahip ters piramitli Si'nin çapı ve derinliği sırasıyla Ag iyonları ve HF konsantrasyonu ile kolayca kontrol edilmiştir. Güneş hücresinin verimliliği %22,06 elde edilmiştir [64].

Gao ve diğerleri (2020) yaptıkları çalışmada MDKA metodu Ag metalini kullanarak yüzeyde ters piramit elde ederek PERC hücresi üretmişlerdir. Substrat olarak ticari 180 µm kalınlığında 156 mm x 156 mm [100] yönelimli kristal silisyum (m-Si), bor katkılı (1–3 Ω·cm) p-tipi wafer kullanmışlardır. Standart temizleme işleminden sonra, Si waferların yüzeyinde ters piramit dokuları hazırlanmıştır. İlk olarak temizlenen Si waferlar, AgNO₃ (0,0001 M) /HF (4 M) /H₂O₂ (1 M) solüsyonunda 300 saniye işlem ile gözenekli Si ile sonuçlanmıştır. İkinci aşamada gözenekli Si'ye sahip waferlar, artık Ag nano parçacıklarını çıkarmak için bir NH₄OH:H₂O₂: H₂O = 1:1:6 (hacim) solüsyonlarında 200 saniye boyunca dağlanmıştır. Üçüncü aşamada ise gözenekli Si waferlar, nano delikler hazırlamak için bir HNO₃: H₂O: HF = 4:2:1 (hacim) solüsyonunda modifiye edilmiştir. Son olarak Si wafer yüzeyinde, sırasıyla anizotropik aşındırma için 60 °C NaOH için 30, 60 ve 90 s süreleri denenmiştir. Ters piramit üretimi sonrası standart PERC üretimine ait diğer işlemler tamamlanmıştır. Yapılan süre çalışmasında alkali aşındırma süresinin artması ile ters piramit

boyutunun arttığı tespit edilmiştir. Güneş hücrelerinin elektriksel parametreleri standart test koşulları altında akım-voltaj ($I-V$) ölçümü ile incelenmiştir. Yansıma oranının %3,91'e kadar azaltıldığı ve ters piramitlerin FV cihazı için ideal bir ışık tutma yapısını ortaya çıkardığını göstermektedir. Yapılan çalışmada %21,4'lük en yüksek verimlilik elde edilmiştir ve V_{oc} 0,677 V'ye, I_{sc} 9,63 A'ya ve FF %80,30'a ulaşılmıştır [65].

Huang ve diğerleri (2019) yaptıkları çalışmada MDKA metodu ile substrat olarak 156×156 mm² boyutunda, 2 Ω .cm-dirençli ve 190 ± 10 μ m kalınlığında endüstri standardı p-tipi waferlar kullanarak ters piramit yapısına sahip PERC güneş hücresi üretmişlerdir. Ters piramit yapısına sahip waferları elde etmek için öncelikle standart temizleme ve sonrasında ilk önce temizlenen waferlar, 8 dakika boyunca $AgNO_3$ (0,0005 M)/HF (4 M)/ H_2O_2 (1 M) karışık çözeltilerine daldırılarak gözenekli Si elde edilmiştir. İkinci aşamada, gözenekli waferlar, yüzey morfolojisini yumuşatmak ve modifiye edilmiş nano delikleri elde etmek için 3 dakika boyunca 6 °C'de bir HF:HNO₃ = 1:3 (hacim) solüsyonunda aşındırılmıştır. Son olarak, Wafer yüzeyinde 2 dakika boyunca 80 °C NaOH çözeltilerinin anizotropik aşındırılmasıyla nano ters piramit dokuları oluşturulmuştur. Karşılaştırma için geleneksel dik piramit dokuları oluşturulmuştur. Ölçülen yansıma eğrisi, PECVD-SiO_x/SiN_x ile kapatılan ters piramitlerin geleneksel mikro piramitlerden daha düşük bir yansıma gösterdiğini göstermiştir. Ardından, simülasyon kullanarak ters piramitli hücre düzeyinde (PERC) analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçlarında, Ters piramitli PERC güneş hücresinin hem kısa hem de uzun dalga boyu aralığında daha iyi yansıma performansının bir sonucu olarak geleneksel PERC'den %1,4 daha yüksek olan %22,1'lik bir verimliliğe ulaşabileceğini göstermiştir [66].

Zhang ve diğerleri (2018) yaptıkları çalışmada standart $156,75 \times 156,75$ mm² boyutunda %20,19 verimliliğine sahip ters piramit mikroyapı bazlı tek kristalli silisyum (m-Si) güneş hücresini Ag metalini kullanarak üretmişlerdir. Tersine çevrilmiş piramit mikro yapıları, ultra düşük konsantrasyonda gümüş iyonları ve optimize edilmiş alkalın anizotropik tekstüre işlemi ile metal destekli kimyasal aşındırma işlemi (MKDA) ile ortaklaşa çalışılmıştır. Ters çevrilmiş piramit boyutları hem MACE hem de alkalın anizotropik dokulamadaki parametreler değiştirilerek kontrol edilmiştir. waferların yüzey kirliliklerini gidermek için NaOH ve H_2O_2 'den (ağırlıkça %30) oluşan sulu bir çözelti içinde durulanmış ve daha sonra ultra saf su içinde durulanmıştır. MACE işleminde ilk olarak waferlar 25 °C'de HF (0,2 M) ve $AgNO_3$ (3×10^{-5} M) içeren sulu bir çözeltiye daldırılmıştır. Daha sonra, Ag nano

parçacıkları ile kaplanmış waferlar, %0,1 ticari katkı maddesi içeren H_2O_2 (3,13 M) ve HF (2,46 M) karışık asit çözeltisinde 3 dakika boyunca dağıldığında nano gözenekli silisyum yapılar üretilmiştir. Nano gözenekli yapılara sahip waferlar, kalıntı Ag nanoparçacıklarını çıkarmak için 5 dakika boyunca H_2O_2 (0,1 M) ile amonyak suyu (0,1 M) içinde durulanmıştır. Ultra saf suda durulandıktan sonra, nano gözenekli silisyum yapılar, sulu bir NaOH (0,003 M) çözeltisi ve %0,4 ticari katkı maddesi içinde 60°C'de modifiye edilmiştir. Son olarak, sm-Si güneş hücresi standart PERC işlemlerini tamamlamışlardır. İndirgenmiş Ag nano parçacıkları, oksitleyici reaksiyonun meydana geldiği ve silisyum substrat üzerinde dağılmıştır. 15 nm çapındaki Ag nano parçacıkları, 5 ppm $AgNO_3$ varlığında eşit ve yoğun bir şekilde dağılmıştır. Ancak 10 ppm $AgNO_3$ veya daha yüksek konsantrasyonda, Ag nanoparçacıklarının çapları düzensiz bir şekilde artmıştır. Ag nano parçacıklarının çapı 10 ppm'de 80 nm'ye yükseldi ve 15 ppm'de 100 nm'ye kadar çıktı. Sırasıyla 1, 3, 5, 7 ve 9 dakika boyunca alkali anizotropik dokulu ters piramit yapılarının, 1 dakika boyunca işlendiğinde büyük miktarlarda nanoyapı çözünmesi nedeniyle orijinal nano gözenekli silisyum ile karşılaştırıldığında ışık tutma yeteneğinin azaldığını göstermiştir. 300 ila 1000 nm dalga boyu aralığında ortalama yansıma oranı %15,45'tir. Yani tekstüre süresi arttıkça, ters çevrilmiş piramit yapılarının oluşumu için ışık Emilimi kademeli olarak arttırılmıştır. 7 dakika boyunca tekstüre işlendiğinde yansıtma %9,2'ye düşürülmüş ve ters çevrilmiş piramit sm-Si waferların tekdüzeliği diğerlerine kıyasla en iyi seviyeye ulaşmıştır. Böylece nano gözenekli silisyum yapılar, spesifik bileşik katkı maddesi içeren sulu NaOH çözeltisi içinde tekstüre edilmiştir ve 60 °C'de 7 dakika boyunca 1 µm genişliğinde düzgün dağılmış ters piramit yapılarına erişilmiştir [67].

Peng ve diğerleri (2002) teflon astarlı paslanmaz çelik otoklavda $AgNO_3$:HF sulu çözeltisi kullanarak MACE ile yüksek yoğunlukta dikey olarak hizalanmış Si nanoteller elde etmiştir. Wafer yüzeyinde bulunan organik yağları ve doğal oksidi çıkarmak için aseton, etanol ve seyreltilmiş sulu HF çözeltisi içinde üç temizleme adımından sonra, temizlenmiş waferlar 5,0:0,02 M HF: $AgNO_3$ çözeltisi ile aşındırılmış ve 50 °C'de 60 dakika süreyle işleme tabi tutulmuştur. Aşındırma işlemi sırasında, silisyum waferlar, nanotellerin üstünde kalın bir Ag tabakasının oluşumunu göstermiştir ve bu tabaka, nitrik asit çözeltisi (%70) tarafından uzaklaştırılmıştır. Temizleme prosedüründen sonra numune sulu $AgNO_3$:HF çözeltisine daldırılmıştır ve $AgNO_3$ katalizörü, çözelti içindeyken çökerek, silisyum düz yüzey üzerine rastgele dağıtılan Ag nanopartikülleri hem oksidan hem de metal kaynağı olarak hareket ettiği öngörülmüştür. Daha önce belirtildiği gibi, NW dizisinin uzunluğu aşındırma

süresi ile birkaç yüz nm'den birkaç on mikrona kadar artırılabilir ve bu da en boy oranı 200'ün üzerinde olan nano yapılara yol açtığı tespit etmişlerdir [68].

3.2.2. Ag/Cu destekli kimyasal aşındırma metodunun literatür araştırmaları

Pu ve diğerleri (2021) yaptıkları çalışmada Ag/Cu diatomik metalini kullanarak MDKA metodu ile ters piramitli yüzeye sahip PERC üretimi gerçekleştirmişlerdir. İlk olarak, m-Si waferlar aşındırma için AgNO_3 , $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, HF ve H_2O_2 karışımına yerleştirilmiştir. Aşınmış waferlar daha sonra yüzeydeki artık Cu partiküllerinin çıkarılması için 5 dakika boyunca $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2 = 3:1$ hacim oranına sahip bir NH_4OH ve H_2O_2 karışımına yerleştirilmiştir. Daha sonra waferlar, artık kimyasalları durulamak için ağırlıkça %5 HF içeren deiyonize su kullanılmıştır. Son olarak, gofretlerin yüzeyi bir NSR çözeltisinde ($\text{HF}:\text{HNO}_3 = 1,6:8$) farklı sürelerde (75 s, 150 s ve 250 s) $8^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}$ aralığında düşük bir sıcaklıkta işlenmiştir. Yüzey morfolojisinin Cu katalizör konsantrasyonuna bağımlılığını araştırmak için, MDKA çözeltisine eklenen $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 'nin kütlesi değiştirilmiştir (yani 0,002 mol/L, 0,0025 mol/L ve 0,0040 mol/L). NSR çözeltisini kullanarak, m-Si Wafer yüzeyindeki nano gözenekler yavaş yavaş çok yüzlü iç gövde ile düzenli nano yapılar haline gelmiştir. Ters piramit dokusu ve karşılaştırma olarak normal bir alkali yukarı piramit dokusu hazırlanmıştır. Ters piramit derinliğinin dik piramitten daha büyük olduğu gözlenmiştir. Bu, ters piramitin kısa dalga boyu bölge tepkisinin normal alkali dokudan çok daha iyi olduğu kritik faktördür. MDKA çözeltisindeki Cu konsantrasyonu arttıkça nano gözeneklerin derinliği, gözenek çapında önemli bir fark olmaksızın artmaktadır. Daha sonra, nano gözenekli silisyum waferlar, 75 saniyenin altında düşük bir sıcaklıkta NSR çözeltisi ile işlenmiştir. Zaman arttıkça bazı alanlar düzleşme eğilimi göstermekte ve bu da anizotropik aşındırma oluşumunu göstermektedir. NSR işleminin ve Cu/Ag diatomik MACE koşullarının optimizasyonu yoluyla, çok yüzlü bir iç kısma sahip, son derece ışık tutucu bir NH yapısı ilk kez başarıyla hazırlandı. NH yapısının oluşumu, esas olarak c-Si gofretinin düşük aşındırma çözeltisi konsantrasyonunda ve işlem sıcaklığında hem anizotropik hem de izotropik aşındırılmasından kaynaklanmaktadır. Optik ve elektrik performansına dayanarak m-Si yüzeyinde ters piramit yapısı, %22,80 verimlilik, 0,684 V, I_{sc} 10,401 A ve %80,72 FF elde edilmiştir [69].

Wu ve diğerleri (2019) yaptıkları çalışmada Ag/Cu diatomik metalini kullanarak MDKA metodu ile ters piramitli yüzeye sahip PERC üretimi gerçekleştirmişlerdir. Tersine çevrilmiş

piramit numuneleri, 20 mM $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, 4,6 M HF, 0,55 M H_2O_2 ve spesifik AgNO_3 konsantrasyonları (0,5 mM, 0,06 mM ve 0,002 mM) çalışılmıştır. Referans olarak, dikey piramit dokusu, ağırlıkça %2 potasyum hidroksit (KOH) ve hacimce %10 IPA içeren alkali çözeltilerde 75°C'de 20 dakika boyunca aşındırılarak elde edilmiştir. Farklı boyutta ters piramitler oluşturmak için Cu kimyasal aşındırma sisteminde Ag'nin rolünü daha fazla detaylandırmak için, farklı Ag konsantrasyonu arttıkça aşındırma sürecini hızlandırmaktadır. Ters piramitlerin boyutu Ag konsantrasyonu ile güçlü bir şekilde ilişkilidir. Burada Ag konsantrasyonu ne kadar düşükse, yapı boyutu o kadar büyük olmaktadır. Nanometreden mikrometre ölçeğine kadar farklı büyüklükteki ters piramitler, Ag'nin Cu aşındırma sisteminde verimli bir katalizör olarak yeniden dahil edilmesiyle üretilmiştir. Ag'nin farklı büyüklükteki ters piramit dokusundaki rolü, Ag'nin Cu birikiminden önce çekirdeklenme noktalarını önemli ölçüde artırabilmesidir; bu nedenle, daha yüksek bir Ag konsantrasyonu, daha fazla çekirdeklenme noktası ve daha küçük bir yapı boyutu ile sonuçlanmaktadır. Ayrıca, optik özelliklerden hücre performanslarına kadar detaylı karşılaştırmalar, hücre verimliliğini artırmada en büyük avantaja sahip olan yüzeyin en büyük yapı boyutuna sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Böylece, en büyük yapı boyutuna sahip ters piramitlerin ortalama hücre verimliliği, dik piramitten %1,5 daha yüksek olan U_{oc} 638,6 mV ve $38,58 \text{ mA/cm}^2 J_{sc}$ ile %19,955 kadar yüksektir. Ayrıca en büyük boyutlu ters piramit numunesi ile elde edilen en iyi hücre verimliliği %20'yi aşarak %20,094'e ulaşarak daha büyük boyutlu IP'lerin hücre verimliliğini artırmada büyük avantajlara sahip olduğunu doğruladı [70].

3.2.3. Cu destekli kimyasal aşındırma metodunun literatür araştırmaları

Zhang ve diğerleri (2022) yaptıkları çalışmada Cu metalini kullanarak MDKA metodu ile ters piramitli yüzeye sahip PERC üretimi gerçekleştirmişlerdir. İlk olarak, tüm m-Si waferlar, testere hasar tabakasını kaldırmak için ağırlıkça %25 KOH çözeltisine 80 °C'de işlem yapılmıştır. İkinci olarak, 50 °C'de nanoyapılar oluşturmak için $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2/\text{HF}/\text{H}_2\text{O}_2$ solüsyonunun karışık sulu solüsyonlarında 15 dakika boyunca dağlanmıştır. Tek kristalli silisyumun yüzey morfolojisinin hücre performansı üzerindeki etkisini araştırmak için, p değeri değiştirilerek yüzey morfolojisi elde edildi ve diğer koşullar sabit tutuldu. p değeri $p = [\text{HF}]/([\text{HF}]+[\text{H}_2\text{O}_2])$ olarak tanımlanır. p değerleri sırasıyla %25, %50, %75 ve %90'dır. Üçüncüsü, nano yapıları waferlar 1 dakika HF/ HNO_3 karışım çözeltisine daldırılmıştır ve ters çevrilmiş piramitlerin yüzeyini düzleştirmek için 1 dakika boyunca oda sıcaklığında

seyreltilmiş KOH çözeltisi uygulamışlardır. Son olarak, kalıntı bakır nanoparçacıklarını çıkarmak için 5 dakika boyunca oda sıcaklığında konsantre nitrik asit (HNO_3) içinde işlenmiştir. Düşük ρ değerinin sıg sünger benzeri yapılara neden olduğu ve ρ yaklaşık %75 yanal ortalama boyutu 1,4 - 2,4 μm olan rastgele dağılmış ters çevrilmiş piramit yapılar ve biraz pürüzlü yan duvarlar ile kaplanmıştır. ρ yaklaşık %90 olduğunda, ters çevrilmiş piramitlerin yan duvarları aşınmakta ve bu da bazı ters çevrilmiş piramitlerin birleşip üst üste binerek oyuntu yapıları ve yarım daire yapıları oluşturmalarına neden olmaktadır. Düşük ρ değeri, zayıf ışık yakalama kabiliyetine sahip küçük sıg nano deliklere yol açarken, yüksek ρ değeri, güneş hücresi performansını bozan örtüşen yapılar ve derin gözenekler ile sonuçlanmaktadır. ρ yaklaşık %75 grubu, wafer yüzeyinde düzgün ters çevrilmiş piramit yapıları elde edilmiştir. Tek tip ters çevrilmiş piramit yapısının, güneş hücresinin performansını iyileştirmede faydalı olan optik absorpsiyonda önemli avantajlara sahip olduğunu göstermiştir. Ters piramitli PERC V_{oc} 680,42 mV, J_{sc} 41,20 mA/cm^2 , FF %80,94 ile %22,69 yüksek verimlilik elde edilmiştir [71].

Zhao ve diğerleri (2020) yaptıkları çalışmada Cu metalini kullanarak MDKA metodu ile ters piramitli yüzeye sahip Si güneş hücresi üretimi gerçekleştirmişlerdir. İlk önce, m-Si wafer 30 mm x 30 mm boyutlarında küçük parçalar halinde kesilerek, ultrasonik temizleme için art arda aseton, etanol ve deiyonize suya daldırılmıştır ve ardından N_2 gazı ile kurutulmuştur. Temizlenen numuneler daha sonra farklı yüzey yapıları elde etmek için Cu (NO_3)₂, HF ve H_2O_2 içeren karışık bir çözelti içinde aşındırılmıştır. Numunelerin yüzeyinde biriken Cu partiküllerini çıkarmak için numuneler 20 dakika boyunca sulu bir HNO_3 çözeltisinde bekletilerek kurutulmuştur. Cu^{2+} konsantrasyonu 0,1 M'de tutulurken, numunelerin tümü 300 s boyunca 30 °C'de dağlanmış. Yüzey morfolojilerinin değişimi dokulu yapılara göre üç aşındırma vakası tanımlanmıştır. HF konsantrasyonu 4.75 M olduğunda, aşındırma çözeltisindeki H_2O_2 konsantrasyonu düşük olduğu için Cu-DKA işlemi ile dik piramit yapısı elde edilmiştir. H_2O_2 konsantrasyonu 1.20 M'ye yükseldiğinde, yüzey yapısı kademeli olarak dikey piramitten, V şeklindeki oluklardan oluşan hibrit bir yapıya dönüşmüştür. H_2O_2 konsantrasyonu daha da arttıkça, substratlar üzerinde ters piramitler oluşmuştur. Ayrıca, aşındırıcıdaki H_2O_2 konsantrasyonu yeterince yüksek olduğunda, m-Si numunelerinin yüzeyi rastgele dağılmış ters piramitler ile kaplanmıştır. Farklı dokulu yapılar arasındaki dönüşüm tartışılmıştır ve Cu metalinin kontrol edilerek istenen yapıların elde edilebileceği belirtilmiştir. Dağlayıcı çözeltideki HF ve H_2O_2 konsantrasyonlarından büyük ölçüde

etkilenen biriken Cu partiküllerinin önemli bir faktör olduğu kanıtlanmıştır. 300 - 1000 nm dalga boyu aralığında minimum ortalama %6,19 yansımaya elde edilmiştir [72].

Tang ve diğerleri (2019) yaptıkları çalışmada Cu metalini kullanarak MDKA metodu ile ters piramitli yüzeye sahip Si güneş hücresi üretimi gerçekleştirmişlerdir. Oluşturulan piramitlerin ve ön ve arka yüzey yapı açılarının etkisi incelenmiştir. 5 mM $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, 4,6 M HF, 0,55 M H_2O_2 ve deiyonize su karışımı ile 5 dakika boyunca aşındırılmıştır ve ön/arka taraflar yaklaşık $54,74^\circ$ açılarda ters çevrilmiş piramitler oluşturulmuştur. Standart Cu partiküllerini temizleme işlemi yapılmıştır. Daha sonra 2,21 M HF, 4,75 M HNO_3 ve deiyonize sudan oluşan bir asit karışımı ile arka tarafta tek taraflı dağlama yapılmıştır. Arka taraf aşındırma süresini uzatarak, arka taraf ters çevrilmiş piramitlerin açısı $54,74^\circ$ 'den 0° 'ye doğrusal değil, kademeli olarak azaltılmıştır. Arka açı 40° , 28° , 20° , 24° ve 0° 'ye sırasıyla 0,5, 1,5, 3, 4,5 ve 7,5 dakika boyunca aşındırma ile düşmüştür. Ters piramit dokulu güneş hücrelerinin genel optik özellikleri, ön ve arka yüzey morfolojilerinin kombinasyonuna güçlü bir şekilde bağlıdır. Farklı ön ters çevrilmiş piramit açılarıyla, belirli bir arka ters çevrilmiş piramit açısı tüm optik kazancı en üst düzeye çıkarır. Ön yüzey ters piramit dokusu yaklaşık 10° - 20° ters piramit açısına sahip arka taraf, tamamen düz bir arka tarafa kıyasla ışık yakalamada daha iyi sonuç vermektedir [73].

Wang ve diğerleri (2016) diğer yaptıkları çalışmada DWS (Elmas Telli Testere İle İşlem Görmüş), bor katkılı p-tipi [100] yönelimli tek kristalli silisyum waferları kullanarak ters piramit nanoyapısını Cu metalini MDKA metodunu uygulayarak elde etmişlerdir. 5 mM $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, 4,6 M HF, 0,55 M H_2O_2 ve deiyonize su çözeltisinde 5 dakika boyunca bakır kataliz kimyasal aşındırma ile her iki tarafta ters çevrilmiş bir piramit dokusu üretmişlerdir. Bundan sonra numuneler, yüzeyde kalan Cu partiküllerini çıkarmak için sulu bir seyreltik nitrik asit çözeltisine batırılmıştır ve herhangi bir çözelti kalıntısını yok etmek için her adım arasında deiyonize su ile yıkamıştır. Daha sonra 2,21 M HF, 4,75 M HNO_3 ve deiyonize sudan oluşan bir asit karışımına sadece arka tarafı daldırılarak arka tarafta tek taraflı dağlama yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda ters piramit dokulu güneş hücrelerinin genel optik özellikleri ön ve arka yüzey morfolojilerinin kombinasyonuna güçlü bir şekilde bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Farklı ön ters çevrilmiş piramit açılarıyla belirli bir arka ters çevrilmiş piramit açısı tüm optik kazancı en üst düzeye çıkarttığı açıklanmıştır [74].

Son yıllarda yapılan önemli çalışmaların özeti Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Literatür özet çalışma tablosu

Çalışmayı Gerçekleştiren	Kullanılan Metal	Elde Edilen Yapı	Elde Edilen Yansıma Oranı	Verim Net Kazanımı	Kazanılan Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Reaksiyon Süresi (dakika)
Hongcheng ve diğerleri (2020)	Ag	1)Nano çubuklar 2)Ters piramit	2,69%/7,9%	0,05%	0,29	5
Gao ve diğerleri (2020)	Ag	1)Nano çubuklar 2)Ters piramit	3,69%	0,10%	0,49	5
Pu ve diğerleri (2021)	Ag/Cu	Ters piramit	-	0,30%	0,25	5
Zhang ve diğerleri (2022)	Cu	Ters piramit	4,01%	1,11%	1,23	15
Zhao ve diğerleri (2020)	Cu	Ters piramit	6,19%	-	-	-

4. DENEY METODU

Tez çalışmasında güneş hücrelerinin optik özelliklerini iyileştirme kapsamında metal destekli kimyasal aşındırma metodu uygulanarak yüzey yapılandırması klasik olan dik piramit yerine ters piramit elde ederek m-Si yüzeyin yansıma oranı düşürülmüştür. Uygulanan metotta metal olarak Bakır (Cu) kullanılmıştır. Metal destekli kimyasal aşındırma çözeltisinde farklı HF konsantrasyonu ve reaksiyon sürelerinin etkisi incelenmiştir. Karakterizasyon çalışması nedeniyle aşındırma ve ters piramit oluşma mekanizması ve hazırlanan numunelerin yüzey morfolojisi SEM ile incelenmiştir. Yansıma ölçümleri yapılmıştır. Yüzey yapılandırma süreci tamamlanan ürünler PERC prosesleri uygulanarak üretilmiştir. Güneş hücresinin optik ölçümleri EQE ve akım-voltaj ölçümleri ile tamamlanmıştır.

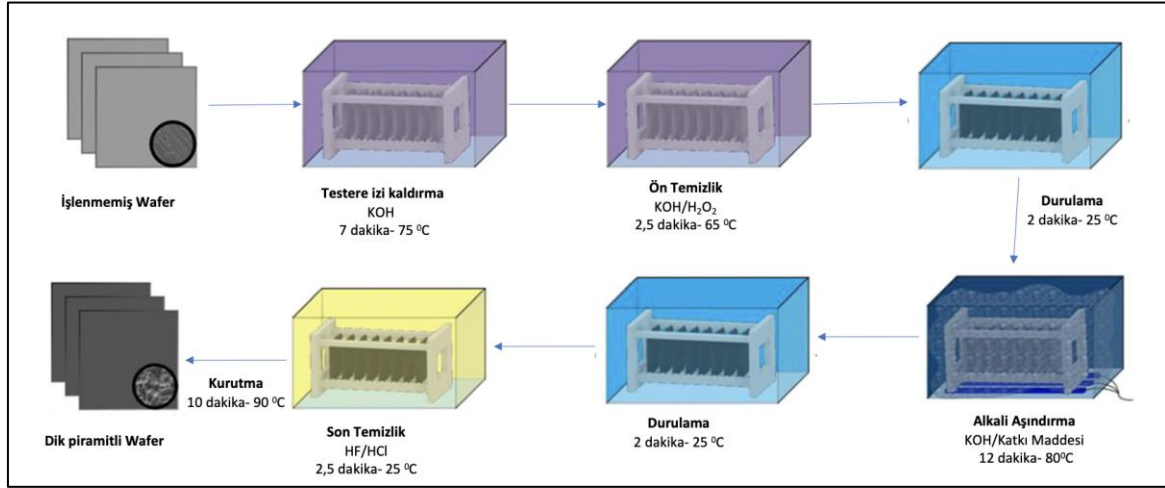
4.1. Yüzey Yapılandırma Çalışmaları

Tez çalışmasında iki farklı yüzey yapılandırma metodu uygulanmıştır. Çalışmaların detayı iki kısımda detaylı olarak anlatılmıştır.

4.1.1. Alkali kimyasal aşındırma

İşlem görmemiş boyutu 158,75 mm × 158,75 mm, bor katkılı p-tipi [100] yönelimli, elmas tel testere ile kesilmiş (DWS), direnci 0,5–1,1 $\Omega \cdot \text{cm}$ ve kalınlığı $170 \pm 10 \mu\text{m}$ (Kalyon PV) waferlar kaset içerisine kenarlarından tutularak dizilir. İşlemler arası bekleme olmaması için yüksek hacimli cam balonda 80 °C kadar deiyonize su ısıtılır. Sonrasında başka bir cam balon içerisine ağırlıkça %25 potasyum hidroksit (KOH, CAS No:1310-58-3), (%40 saflıkta ve solar sınıfı, Kunshan Chengxin) olacak şekilde tartılarak sulu çözelti hazırlanır ve işlem süreci boyunca sıcaklık 75 °C’de sabit tutularak termokupl ile kontrol edilir. Sıcaklık gerektiren tüm çözeltiler termokupl ile kontrol edilir. Çözelti teflon malzemeden yapılmış kaba aktarılır. Deney boyunca kullanılan tüm kaplar teflon malzemeden yapılmıştır. Kasete dizilen waferlar hazırlanan çözeltiye daldırılır ve 7 dakika boyunca işlem devam ettirilir. İşlem bitmeden sonraki aşama olan ön temizlik için mezür ile ölçülerek 7 ml KOH ve 3 ml hidrojen peroksit (H_2O_2 , CAS No:7722-84-1), (%31 saflıkta ve solar sınıfı, Kunshan Chengxin) 100 ml sulu çözelti için hazırlanır ve kaba aktarılır. Testere izleri kaldırılmış waferlar hazırlanan çözeltiye daldırılır ve 65 °C’de 2,5 dakika boyunca işlenir. İşlem sonrası

deiyonize su ile oda sıcaklığında 2,5 dakika boyunca durulanır. Temizlenen waferlar 80 °C'de 12 dakika boyunca 7 ml KOH ve 0,0125 ml katkı malzemesi (K01-T21 model, Xiaochen Chemicals) 100 ml çözelti için hazırlanarak wafer yüzeyi yapılandırılmıştır. Sonrasında metal temizliği için oda sıcaklığında 2,5 dakika boyunca 5 ml hidroflorik asit (HF, CAS No:7664-39-3, %49 saflıkta ve solar sınıfı, Kunshan Chengxin) ve 5 ml hidroklorik asit (HCl, CAS No:7647-01-0), (%37 saflıkta ve solar sınıfı, Kunshan Chengxin) 100 ml için çözeltiye daldırılarak son işlem tamamlanır. Metal temizliği sonrası waferlar 10 dakika süre boyunca 90 °C'de fan ile kurutulmuştur. Her kimyasal işlem sonrası oda sıcaklığında 2,5 dakika boyunca deiyonize su ile durulanmıştır. İşlemler çeker ocakta yapılmıştır ve çözelti hazırlarken kimyasala dayanıklı eldiven ve maske kullanılmıştır. Ayrıca HF çözeltisi hazırlanırken kullanılan mezür plastik seçilmiştir. İşlemlerin sistematik olarak şeması Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

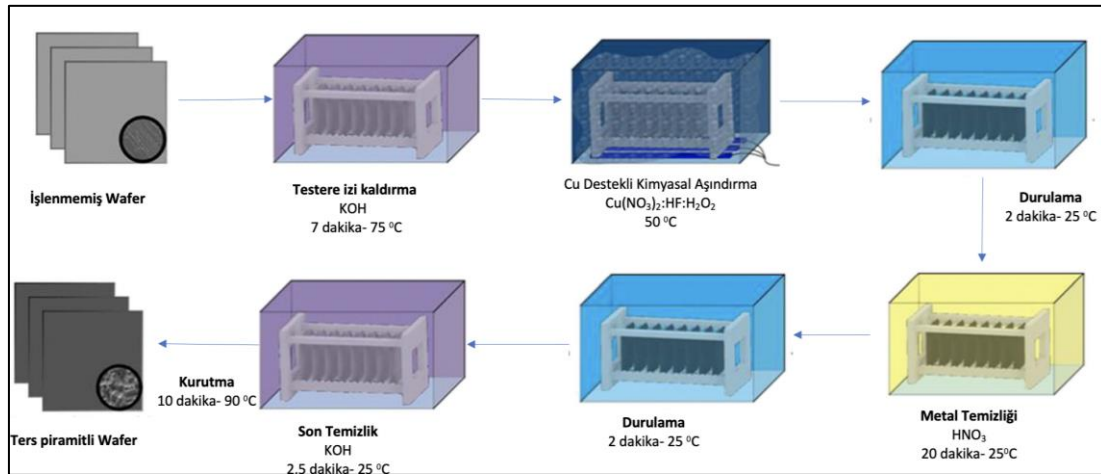


Şekil 4.1. Alkali kimyasal aşındırma işlem sırası

4.1.2. Cu destekli kimyasal aşındırma

İşlem görmemiş waferlar kaset içerisine kenarlarından tutularak dizilir. İşlemler arası bekleme olmaması için yüksek hacimli cam balonda 75 °C kadar deiyonize su ısıtılır. Sonrasında başka bir cam balon içerisine ağırlıkça %25 KOH olacak şekilde tartılarak sulu çözelti hazırlanır ve işlem süreci boyunca sıcaklık 75 °C'de sabit tutularak termokupl ile kontrol edilir. Sıcaklık gerektiren tüm çözeltiler termokupl ile kontrol edilir. Çözelti teflon malzemeden yapılmış kaba aktarılır. Deney boyunca kullanılan tüm kaplar teflon malzemeden yapılmıştır. Kasete dizilen waferlar hazırlanan çözeltiye daldırılır ve 7 dakika

boyunca işlem devam ettirilir. İşlem bitmeden sonraki aşama olan ön temizlik için mezür ile ölçülerek 7 ml KOH ve 3 ml H₂O₂ 100 ml sulu çözelti için hazırlanır ve hassas terazide 0,145 gram/100 ml için Bakır (II) Nitrat Trihidrat (CuN₂O₆.3H₂O, CAS No:10031-43-3), (%99-104 safsızlık, Sigma Aldrich) tartılır ve çözelti içerisine ilave edilerek kaba aktarılır. Deneyde HF konsantrasyonuna bağlı performans değerlendirmesi için dört farklı çözelti (HF sırasıyla 0,5 M; 1,5 M; 4,5 M ve 13,5 M) hazırlanır ve 50 °C'de 10 dakika boyunca işlenir. Hazırlanan Cu(NO₃)₂:HF:H₂O₂ çözeltilerinde HF 4,5 M'da işlem tekrar dört aşamaya ayrılarak süreye bağlı çalışılmıştır. Bu aşamada işlem süresi 5, 10, 15 ve 20 dakika olarak ayrılır. Yapılmak istenen çalışma Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Sonrasında deiyonize su ile oda sıcaklığında 2,5 dakika boyunca durulanır. Bakırın waferlardan temizlenmesi için ağırlıkça %20 nitrik asit (HNO₃, CAS No:7697-37-2), (%68 saflıkta ve solar sınıfı, Kunshan Chengxin) çözelti hazırlanarak oda sıcaklığında 20 dakika işlenir. Silisyum yüzeyindeki kalıntıları temizlemek için ağırlıkça %2 KOH çözeltisi hazırlanarak 2,5 dakika işlem yaptırılır. Son işlem olarak waferlar 10 dakika süre boyunca 90 °C'de fan ile kurutulmuştur. Her kimyasal işlem sonrası oda sıcaklığında 2,5 dakika boyunca deiyonize su ile durulanmıştır. İşlemler çeker ocakta yapılmıştır ve çözelti hazırlarken kimyasala dayanıklı eldiven ve maske kullanılmıştır. Ayrıca HF çözeltisi hazırlanırken kullanılan mezür plastik seçilmiştir. İşlemlerin sistematik olarak şeması Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

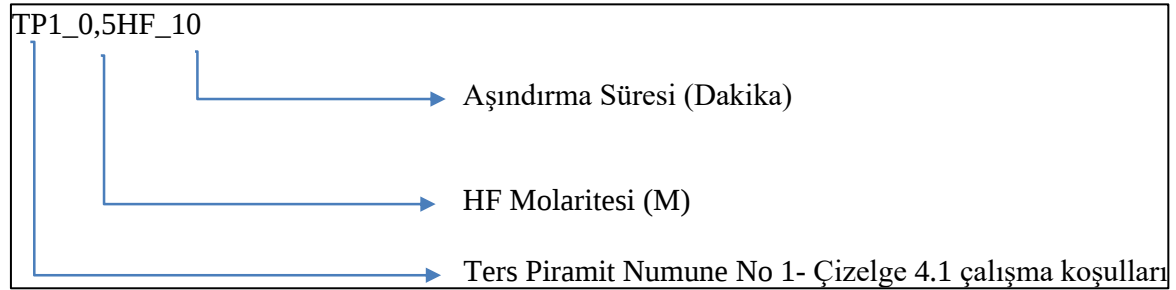


Şekil 4.2. Bakır destekli kimyasal aşındırma işlem sırası

Çizelge 4.1. Yüzey yapılandırma çalışmalarına ait çizelge

Numune No	Cu (NO ₃) ₂ (M)	H ₂ O ₂ (M)	HF (M)	Zaman (dakika)	Sıcaklık (°C)
1	0,006	0,6	0,5	10	50
2	0,006	0,6	1,5	10	50
3	0,006	0,6	4,5	10	50
4	0,006	0,6	13,5	10	50
5	0,006	0,6	4,5	5	50
6	0,006	0,6	4,5	15	50
7	0,006	0,6	4,5	20	50

Yapılan çalışmada toplamda değerlendirilen 8 farklı grup mevcuttur. Bu nedenle numune isimlendirilmesi yapılmıştır. Numune isimlendirmelerinin açıklamaları;



Şekil 4.3. Numune isimlendirmeleri

8. numune alkali aşındırma ile elde edilen dik piramit ise DP_Ref ile gösterilmektedir.

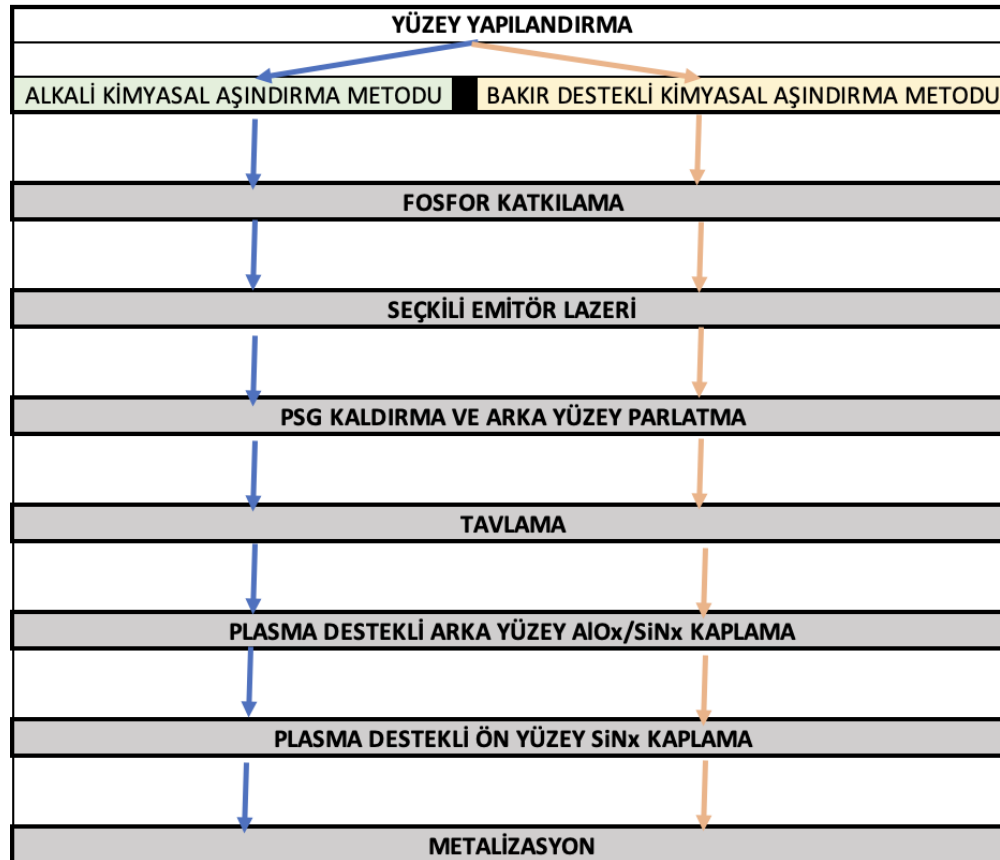
Numunelerin konsantrasyonlarına göre hesaplama Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Konsantrasyona bağlı kullanılan kimyasal miktarları

Kullanılan Kimyasallar	İstenilen Molarite	100 ml solüsyon için
Cu(NO ₃) ₂ (241,6 g/mol)	0,006 M	0,145 g
H ₂ O ₂ (%31 saflık, 10,02 M)	0,6 M	6 ml
HF (%49 saflık, 29,14 M)	0,5 M	1,72 ml
HF (%49 saflık, 29,14 M)	1,5 M	5,15 ml
HF (%49 saflık, 29,14 M)	4,5 M	15,45 ml
HF (%49 saflık, 29,14 M)	13,5 M	46,33 ml

Yüzey yapılandırma çalışmaları tamamlandıktan sonra Kalyon PV güneş hücresi üretim fabrikasında çift yüzü PERC üretimi için standart işlem sıraları takip edilmiştir. Yüzey yapılandırma sonrası 850 °C’de fosfor kaynağı olarak kullanılan POCl₃ ile difüzyon işlemi gerçekleştirilerek p-n eklemi oluşturulmuştur. Yapılan işlemler sonrasında waferların film direnci (Rsheet 130-160 Ω/•) arasında dağılmıştır. Fosfor katkılama sonrasında waferlar

seçkili emitör oluşturmak için lazer uygulanmıştır. Lazer ile işlem yapılan waferların yüzeyinden PSG katmanını kaldırılarak, arka yüzeyi 5 μm aşındırılmıştır. Arka yüzeyi aşındırılan waferlar O_2 ile 700 $^\circ\text{C}$ 'de tavlama uygulaması ile SiO_2 katmanı oluşturulmaktadır. SiO_2 katmana sahip Waferlar plazma destekli ekipman ile arka yüzeyi $\text{AlO}_x/\text{SiN}_x$ ile kaplanmıştır. Arka yüzey kaplaması tamamlanan waferların ön yüzeyi ise yansıma engelleyici kaplama (SiN_x), plazma destekli buhar biriktirme yöntemi ile kaplanmıştır. Ön ve arka kaplama işlemleri tamamlanan m-Si waferlara son olarak arka ve ön yüzde gümüş ve alüminyum macunlar kullanılarak metalizasyon işlemi uygulanmıştır. Kontakların silisyum ile alaşım oluşturması amacıyla 800 $^\circ\text{C}$ 'de hızlı yakma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan işlemler Şekil 4.4'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Yüzey yapılandırma işlemleri

4.2. Karakterizasyon Çalışmaları

Tez çalışmasında iki farklı metotta yapılan silisyum wafer yüzey yapılandırma işleminin güneş hücresinin optik özelliklerini analiz edebilmek amacıyla fiziksel, kimyasal ve

elektriksel özelliklerini belirlemek amacıyla reaksiyon mekanizması, aşındırma hızı, SEM, yansıma spektrometre ölçümü, kuantum verimlilik analizi ve akım-voltaj ölçümleri, lüminesans çalışmaları yapılmıştır.

4.2.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

SEM analizi numunenin yüzeyine vakum ortamında yüksek voltaj ile hızlandırılan elektronların yüzey ile etkileşime girmesi ile odaklanır ve malzemenin morfolojik yapısını tanımlamaktadır. Numuneye ait yüzey morfolojisinin tanımlanması için numunelerin elektrik iletkenliğine sahip olması gerekmektedir. waferlar elektrik iletkenliğine sahip olması nedeniyle ekstra kaplamaya ihtiyaç duyulmamıştır. İki farklı metot ile yüzeyleri yapılandırılan waferların yüzeyde bulunan piramitlerin boyutları analiz edilmiştir. SEM analizi, QUANTA 400F Field Emission SEM yüksek çözünürlüklü (1,2 nm çözünürlükte) taramalı elektron mikroskobu cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

4.2.2. Yansıma spektrometre ölçüm analizi

Yansıma spektrometre ölçümlerinde arasında ölçümünde belirli bir dalga boyu aralığında kullanılan ışık kaynağı ile numune yüzeyine gönderilerek ışığın ne kadarının yüzeyden soğurulduğu ve geri yansıyan oran hakkında bilgi veren bir tekniktir. Tez çalışması kapsamında iki farklı metot ile yüzeyleri yapılandırılan waferların ve ön ve arka yüzey yansıma engelleyici kaplamalar tamamlandıktan sonra güneş hücresinin ışığı soğurma analizleri yapılmıştır. Yansıma spektrometre ölçümleri 220-2500 nm dalga boylarında çalışabilen ve yansıma aralığı %0-100 oranında bilgi verebilen Raditech marka D8-4 modeli (dalga boyu çözünürlüğü 1 nm) ile 300-1100 nm aralığında 851 nokta seçilerek yapılmıştır.

4.2.3. Kuantum verimlilik analizi

Kuantum verimlilik analizinde harici kuantum verimliliği (EQE), ışık kaynağından gelen her bir foton için harici devreye sağlanan elektron sayısıdır. Güneş hücresinde belirli bir dalga boyunda ışık soğurulduğunda elektron-boşluk çifti oluşmaktadır. Tek renkli ışık aydınlatması altında numunenin optik davranışını sergilemektedir. Ölçüm yapılırken sıcaklık 25 °C’de sabit tutulur. EQE ölçümleri 300-1100 nm aralığında güneş hücresi numuneleri tarafından toplanan yük taşıyıcı sayısının, güneş hücresi üzerine dışarıdan gelen

foton sayısı oranı ile hesaplanır. Kuantum verimlilik analizinde ayrıca dahili kuantum verimliliği (IQE) ölçümleri yapılır. IQE, güneş hücresi tarafından toplanan yük taşıyıcı sayısının, güneş hücresi üzerinde dışarıdan yansıyan ve hücre tarafından emilen foton sayısına oranıdır. IQE, görünür spektrumda her zaman EQE'den daha büyüktür. IQE'yi ölçmek için, önce güneş cihazının EQE'si ölçülür, ardından yansıması ölçülür ve IQE'yi anlamak için bu veriler birleştirilir. IQE/EQE ölçümleri 280-1600 nm dalga boylarında çalışabilen Loana marka (dalga boyu çözünürlüğü 1 nm) ile 300-1100 nm aralığında yapılmıştır.

4.2.4. Akım-Voltaj ölçüm analizi (I-V)

Güneş hücresinin elektriksel parametrelerine ait değerlerini tanımlamaktadır. Güneş hücresi hava kütlesi ışık kaynağı (AM) 1,5 G standart spektrum altında 1000 W/m² ve 25 °C'de ölçüm yapılmaktadır. Işık kaynağı sabit 1000 W Xenon lamba içermektedir. Lamba ışığı toplayan bir elipsoidal bir reflektör ile çevrilidir. Reflektörde toplanan ışık bir ayna yardımı ile kolimatör merceğe yönlendirilir. Yönlendirme merceği ile ayna arasına özel bir filtre yerleştirilerek radyasyon spektrumunun şiddeti hava kütlesi ile eşleştirilir. Hücre üzerinde bulunan kontak sayısına göre alt ve üst bölgelerine prob kullanılarak hücreye temas ettirilerek verilen akım ile güneş hücresinin verimliliği ile I_{sc} , V_{oc} , I_{max} , V_{max} , P_{max} , FF, R_{sh} veya R_s gibi değerler ölçülmektedir. Tez çalışmasında güneş hücresinin I-V ölçümleri Halm marka cihaz ile yapılmıştır.

4.2.5. Lüminesans analizi

Elektrolüminesans (EL) ve Foto-Lüminesans (PL) güneş hücresi lüminesans analizleri için uygulanmaktadır. Fotolüminesans (PL), fazla taşıyıcılar (elektron-boşluk) yeterince yoğun bir ışık kaynağına maruz bırakılarak ışıkla uyarılır ve ışıma rekombinasyonundan yayılan lüminesans toplanır. waferın güneş hücresi elde etme prosesleri için bu görüntüleme yapılabilmektedir. EL'de görüntü fazla taşıyıcıların akım enjeksiyonu sonucunda yayılan ışıma ile elde edilir. Bu nedenle EL yalnızca güneş hücresine uygulanabilmektedir. PL, esas olarak malzemenin optik özelliklerini belirlemede kullanılır ve EL, numunenin optik özelliklerini, optik olarak aktif katmanların fiziksel yapılarını ve kontak bölgelerinin durumunu tanımlar. Güneş hücrelerinin EL görüntüleri için Kopad marka 5 milyon piksele sahip kameralı cihaz kullanılırken arka ve ön yüzey yansıma engelleyici kaplama sonrası ve

güneş hücresine ait PL görüntüleri BT imaging markalı infrared kızılötesi kameraya sahip cihaz kullanılmıştır. PL ölçümlerinde poz süresi 0,1 saniye, aydınlatma alanı ‘large’ seçilerek, görüntüler rainbow olarak alınmıştır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

“Metal Destekli Kimyasal Aşındırma Metodu ile Güneş Hücrelerinin Optik Özelliklerinin İyileştirmesi” adlı tez çalışmasının amacı güneş hücrelerinin ışık soğurma kapasitesini artırmak için m-Si wafer yüzeyinden yansıyan güneş ışığının yansım oranını mevcut düzensiz dik piramit yerine düzensiz ters piramit yüzey morfolojisini elde ederek azaltmaktır. Amaç doğrultusunda ters piramit yapısı Cu destekli kimyasal aşındırma metodu ile elde edilmiştir. Silisyum waferlara klasik olarak uygulanan alkali kimyasal aşındırma dik piramit elde edilerek ışık soğurmaları karşılaştırılmıştır. Farklı yüzey morfolojisi elde etmek için uygulanan alkali ve MDKA metodu öncesi tüm m-Si waferların testere izleri giderilmiştir. Ters piramit yüzeye sahip waferlar tek aşamalı $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2/\text{HF}/\text{H}_2\text{O}_2$ çözeltisine daldırılarak m-Si ile kimyasal reaksiyonu ile izotropik aşındırılmıştır. MDKA methodu 50°C 'de gerçekleştirilirken, alkali aşındırma 80°C 'de 12 dakika süresince KOH ve katkı maddesi ile gerçekleşmiştir.

Cu metali ile yapılan aşındırma çözeltisinde HF farklı konsantrasyon 0,5; 1,5; 4,5 ve 13,5 M denemeleri 50°C ve 10 dakika reaksiyon süresinde gerçekleştirilmiştir. Bu çözelti sonrasında elde edilen çalışmalar ile farklı aşındırma süreleri 5-15-20 dakika test edilmiştir. Düzensiz ters piramit elde edilmesi için çalışılan parametreler ile teorik olarak incelenen aşındırma mekanizması ve aşındırma öncesi ve sonrası hassas terazi ile kütle kaybı sonuçları doğrultusunda aşındırma hızları çalışılmıştır. Yüzey yapılandırma sonrası yüzey morfolojisi ve yüzey morfolojisine bağlı ışık soğurma oranları SEM ve yansım ölçümü ve arka ve ön yüzey yansım engelleyici kaplama aşamaları sonrasında yansım ölçümü ve fotoluminesans karakterizasyon teknikleri uygulanmıştır. Güneş hücresi üretiminin tamamlanması sonrasında IQE/EQE, akım-voltaj ölçümü ve elektrolüminesans karakterizasyon teknikleri uygulanmıştır.

Bu bölümde aşındırma mekanizması, aşındırma hızı, yüzey yapılandırma sonrası ve güneş hücresi üretimi sonrası yapılan karakterizasyon çalışmalarının sonuçları ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

5.1. Cu Destekli Kimyasal Aşındırma Mekanizması ve Aşındırma Hızı Çalışmaları

Tez çalışması kapsamında Cu Destekli kimyasal aşındırma ile düzensiz ters piramit elde edilmiştir. Ters piramit oluşum mekanizması ve Cu metali ile yapılan aşındırma çözeltisinde HF farklı konsantrasyon 0,5; 1,5; 4,5 ve 13,5 M denemeleri 50 °C ve 10 dakika reaksiyon süresinde gerçekleştirilmiştir. Bu çözelti sonrasında elde edilen çalışmalar ile farklı aşındırma süreleri 5, 10 ve 15 dakika test edilmiştir. Düzensiz ters piramit elde edilmesi için çalışılan parametreler ile teorik olarak incelenen aşındırma mekanizması ve aşındırma öncesi ve sonrası hassas terazi ile kütle kaybı sonuçları doğrultusunda aşındırma hızları hesaplanmıştır.

Tek aşamalı Cu(NO₃)₂/HF/H₂O₂ çözeltisi ile m-Si wafer yüzeyinde kimyasal aşındırma ile ters piramit oluşturulmaktadır. Si ve Cu²⁺/Cu arasında elektrokimyasal bir reaksiyon oluşmuştur. Reaksiyondaki itici güç Si ve Cu²⁺ arasındaki farklı elektrokimyasal potansiyeldir.

Reaksiyon, iki yarı hücre reaksiyonu olarak tanımlanmaktadır.

Katot reaksiyonu;



Anot reaksiyonu;



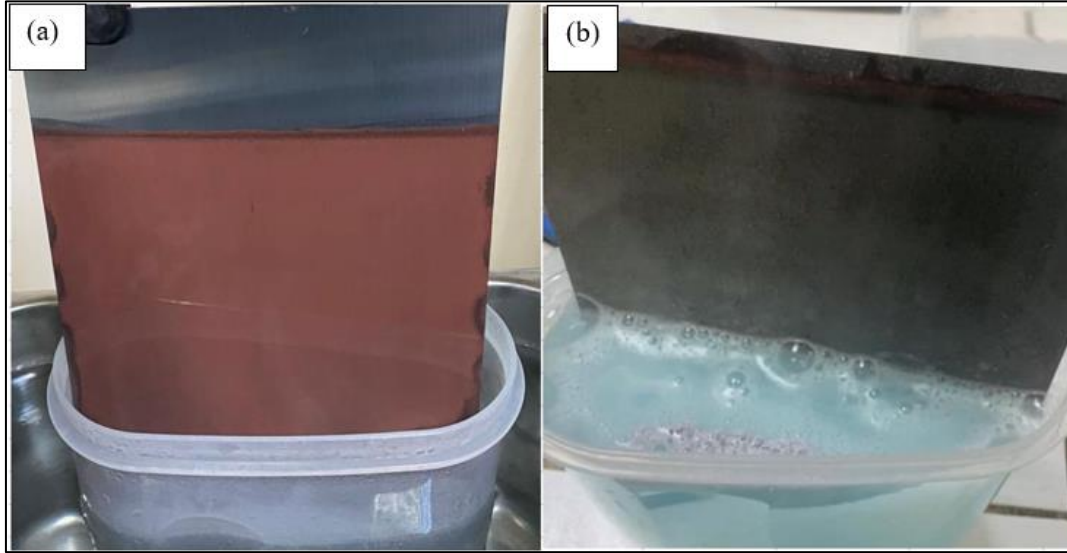
Si/Cu(NO₃)₂/H₂O₂/HF sistemi redoks çiftinden oluşmaktadır. Cu²⁺ iyonlarının H₂O₂ ile indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonu ile Cu nanoparçacıkları silisyum içerisine çözülerek yerleşmektedir. Cu nano parçacıkları Si yüzeyinde anizotropik olarak depolanmaktadırlar. Bunun nedeni, Cu²⁺ iyonlarının indirgeme potansiyelinin düşük olması nedeniyle elektronları yakalama kabiliyetini sınırlamaktadır. Cu²⁺ iyonlarının elektronları yakalama kabiliyetini geliştirmek için Cu destekli kimyasal aşındırma işlemi 50°C'de

gerçekleştirilmiştir. Ag^+ iyonlarının, Au^+ iyonlarının veya diğer asil metal iyonlarının indirgeme potansiyeli Cu^{2+} iyonlarından çok daha güçlüyken, güçlü bir elektron yakalama yeteneği sergilerken, bu nedenle Ag destekli kimyasal dağlama veya Au destekli kimyasal dağlama tekniği genellikle oda sıcaklığında ilerlemekte ve yalnızca birkaç dakika sürmektedir [75]. Ayrıca Si [100] ve (111) düzlemlerinin elektriksel özellikleri yüzey bağ yoğunlukları bakımından farklıdır [76]. Bunu hesaba katarsak, Si [100] düzleminde mevcut elektronların sayısı Si (111) düzlemindekinden daha fazladır, bu nedenle Cu^{2+} iyonları tercihen Si [100] düzlemlerinden elektronları yakalayarak Cu nanopartikül oluşumunu daha tercih edilir hale getirir, böylece Cu nanoparçacıklarının Si [100] düzlemlerinde Si (111) düzlemlerinden daha hızlı büyümesine neden olur. Sonuç olarak, Cu nanoparçacıkları altındaki Si, oksitlenir ve daha sonra HF tarafından aşındırılır, bu da Si boyunca daha hızlı bir aşındırmaya yol açar. Si yüzeyinde oluşan Cu nanoparçacıkları $\text{HF}/\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ çözeltisinde kompakt metal taneli filmler oluşturulur, bunların maske etkisinden dolayı SiO_2 'nin HF tarafından aşındırılmasını kısıtlamaktadır. Bu nedenle, Cu'yu oksitlemek için bir oksidan gereklidir. Yapılan çalışmada H_2O_2 oksidan olarak kullanılmıştır.

H_2O_2 , seçici dağlamada önemli ve özel bir rol oynamaktadır. Enerji olarak, H_2O_2 'nin elektrokimyasal potansiyeli, Si'nin valans bandından veya Cu^{2+}/Cu 'nun indirgeme elektron potansiyelinden çok daha pozitifdir [77]. H_2O_2 'nin indirgenmesi metalin yüzeyinde gerçekleşmekte, dolayısıyla $\text{Si}/\text{Cu}(\text{NO}_3)_2/\text{H}_2\text{O}_2/\text{HF}$ sisteminde H_2O_2 'nin indirgenmesi metalin yüzeyinde gerçekleşmektedir. Cu nano parçacıkları orta düzeyde H_2O_2 konsantrasyonu eklendiğinde, Cu nanoparçacıkları anizotropik olarak biriktirilir, bu da ters piramitlerin HF ile aşınmasına yardımcı olmaktadır. Bu sebeple, yapılan çalışmada H_2O_2 0,6 M olarak belirlenmiştir. Enjekte edilen delikler iki yoldan tüketilir. Delikler, Cu nano parçacıkları tarafından tüketilerek, Cu nano parçacıklarının birikmesi ve çözünmesi arasında kinetik denge sağlanmaktadır. Bazı delikler ayrıca Cu nano parçacıkları boyunca dağılır ve Si substratına enjekte edilerek c-Si'nin Cu nanoparçacıklarının altında dağlanmasını seçici olarak hızlandırmaktadır.

H_2O_2 yokluğunda, H_2O_2 konsantrasyonu 0,3 M'dan küçük olduğu durumlarda Cu^{2+} iyonlarının indirgenmesi daha hızlıdır ve Cu^{2+} iyonlarının sınırsız kaynağı nedeniyle Si yüzeyinde daha fazla Cu nanopartikül oluşacaktır. Cu nano parçacıkları hızla büyür ve Si wafer yüzeyinin çoğunu kaplar, yapılan deneyde H_2O_2 konsantrasyonu 0,3 M ile başladığındaki Cu wafer yüzeyini kaplamıştır ve Resim 5.1'de gösterilmiştir. Bu durum,

örtüşen oksidasyon bölgelerine ve buna bağlı olarak daha izotropik Si aşındırmasına neden olur. 50°C'de çok hızlı bir şekilde ince bir Cu filmi oluşur ve Si ile dağılayıcılar arasında bir bariyer görevi görerek Si'nin aşınmasını engeller. Yüksek H_2O_2 konsantrasyonlarında, H_2O_2 konsantrasyonu 1,0 M'dan büyük olduğu durumlarda ise Cu nano parçacıklarının oksidasyonu, Cu^{2+} iyonlarının indirgenmesinden daha hızlıdır, bu da birkaç küçük rasgele Cu nanoparçacıklarının Si üzerinde birikmesiyle sonuçlanır. Bu nedenle, Si'nin orijinal morfolojisi, birkaç sığ çukurun oluşumu dışında önemli ölçüde değişmemektedir. Özetle, Cu^{2+} iyonlarının elektronlarını yakalama konusundaki sınırlı yeteneği ve Si [100] düzlemleri ile Si (111) düzlemlerinin elektron sağlama oranlarının farklı olması nedeniyle, orta seviye konsantrasyonlarda kullanılan H_2O_2 (0,6 M) durumu Resim 5.1'de gösterilmiştir ve Cu nano parçacıkları arasındaki etkileşimi birleştirerek, ters piramit yapıları üretilir.



Resim 5.1. H_2O_2 konsantrasyonu bağlı Cu partiküllerinin yüzeyde dağılımı (a) H_2O_2 konsantrasyonu 0,3 M'den küçük yüzey dağılımı (b) H_2O_2 konsantrasyonu 0,6 M'den büyük yüzey dağılımı

Düzensiz dağılan ters piramit yüzey yapısını elde etmek için aşındırma mekanizması doğrultusunda tez çalışmasında 0,006 M $Cu(NO_3)_2$ ve 0,6 M H_2O_2 konsantrasyonu sabit tutularak aşındırmanın temel fonksiyonunu oluşturan HF konsantrasyonuna bağlı olarak aşındırma hızları hesaplanmıştır. Aşındırma süresi 10 dakika ve reaksiyon sıcaklığı 50 °C'de sabit tutulmuştur. Aşındırma hızını hesaplamak için testere izleri aşındırıldıktan sonra ürünler hassas terazi ile ölçülerek, belirlenen kondisyonlarda aşındırma tamamlanması sonrası tekrar ölçüm alınarak kütle kaybı hesaplanmıştır. HF konsantrasyonuna bağlı ölçülen kütle kaybı ve aşındırma hız hesaplamaları Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. HF konsantrasyonuna bağlı ölçülen kütle kaybı ve aşındırma hız hesaplamaları

Numune	HF (M)	Aşındırma Süresi (dakika)	Silisyum yoğunluğu (g/cm ³)	Yüzey Alanı ¹ (cm ²)	Kütle Kaybı (g)	Aşındırma Hızı (R) (µm/dakika)
TP1_0,5HF_10	0,5	10	2,33	252,02	0,15	0,128
TP2_1,5HF_10	1,5	10	2,33	252,02	0,26	0,221
TP3_4,5HF_10	4,5	10	2,33	252,02	0,48	0,409
TP4_13,5HF_10	13,5	10	2,33	252,02	0,64	0,545

HF konsantrasyonuna bağlı aşındırma hızının değişimi gözlemlenmiştir. Konsantrasyonun artışı ile aşındırma hızı da artmıştır. HF konsantrasyonun 0,5 M ile 4,5 M arasında doğrusal bir kütle kaybı elde edilirken, HF konsantrasyonunun 0,5 M ile 13,5 M artışı kütle kaybı doğrusal olarak ilerlememiştir. 4,5 M HF ile 0,409 µm/dakika aşındırma hızı elde edilirken, HF konsantrasyonunun üç katı olan 13,5 M 0,545 µm/dakika aşındırma hızı alınmıştır. HF konsantrasyonuna bağlı aşındırma hızı grafiği Şekil 5.1.'de gösterilmiştir.

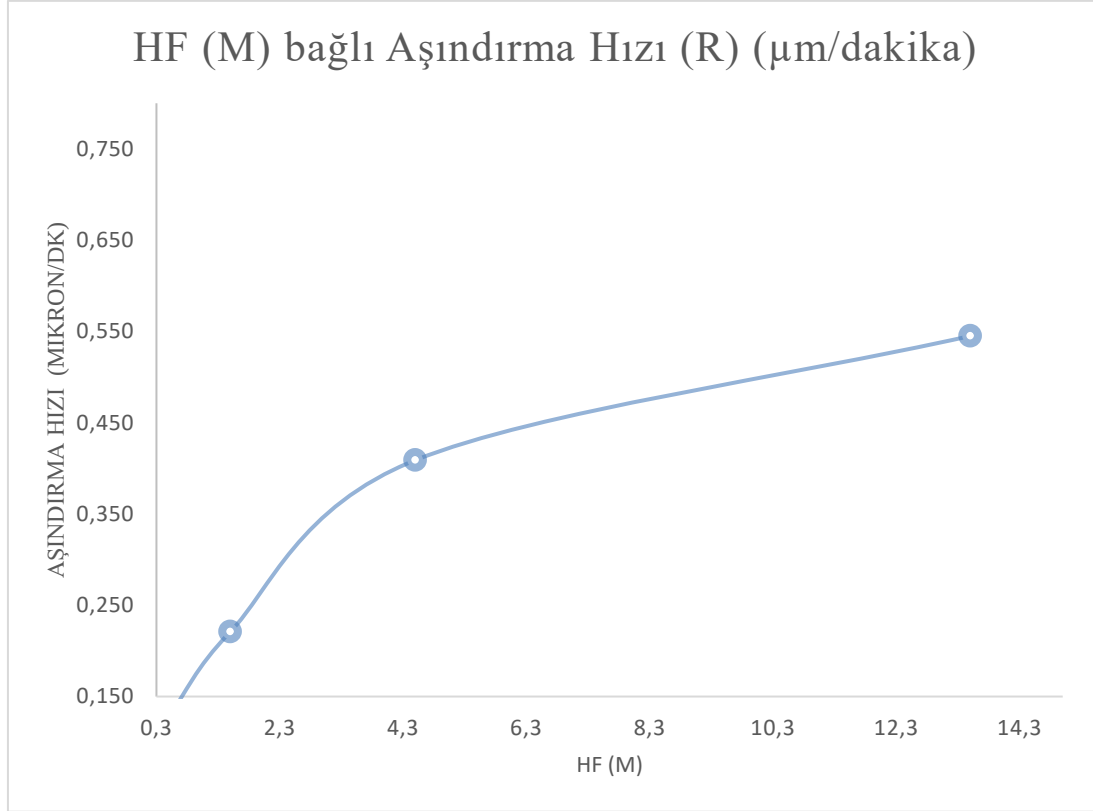
Numune TP1_0,5HF_10 için örnek hesaplama Çizelge 5.1'de verilen değerler kullanılarak Eş 5.1 ile yapılmıştır.

$$R = \frac{\text{Kütle kaybı(gram)}}{2 \times \text{silisyum yoğunluğu} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) \times \text{yüzey alanı}(\text{cm}^2) \times \text{aşındırma süresi}(\text{dakika})} \quad (5.1)$$

$$R = \frac{0,15 \text{ gram}}{2 \times 2,33 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) \times 252,02(\text{cm}^2) \times 10(\text{dakika})} \times \frac{10000 \text{ } \mu\text{m}}{1 \text{ cm}}$$

$$R_{\text{TP1}_0,5\text{HF}_10} = 0,128 \text{ } \mu\text{m/dakika}$$

¹ Yüzey alanı wafer boyutları kullanılarak 158,75 mm x 158,75 mm'den hesaplanmıştır.



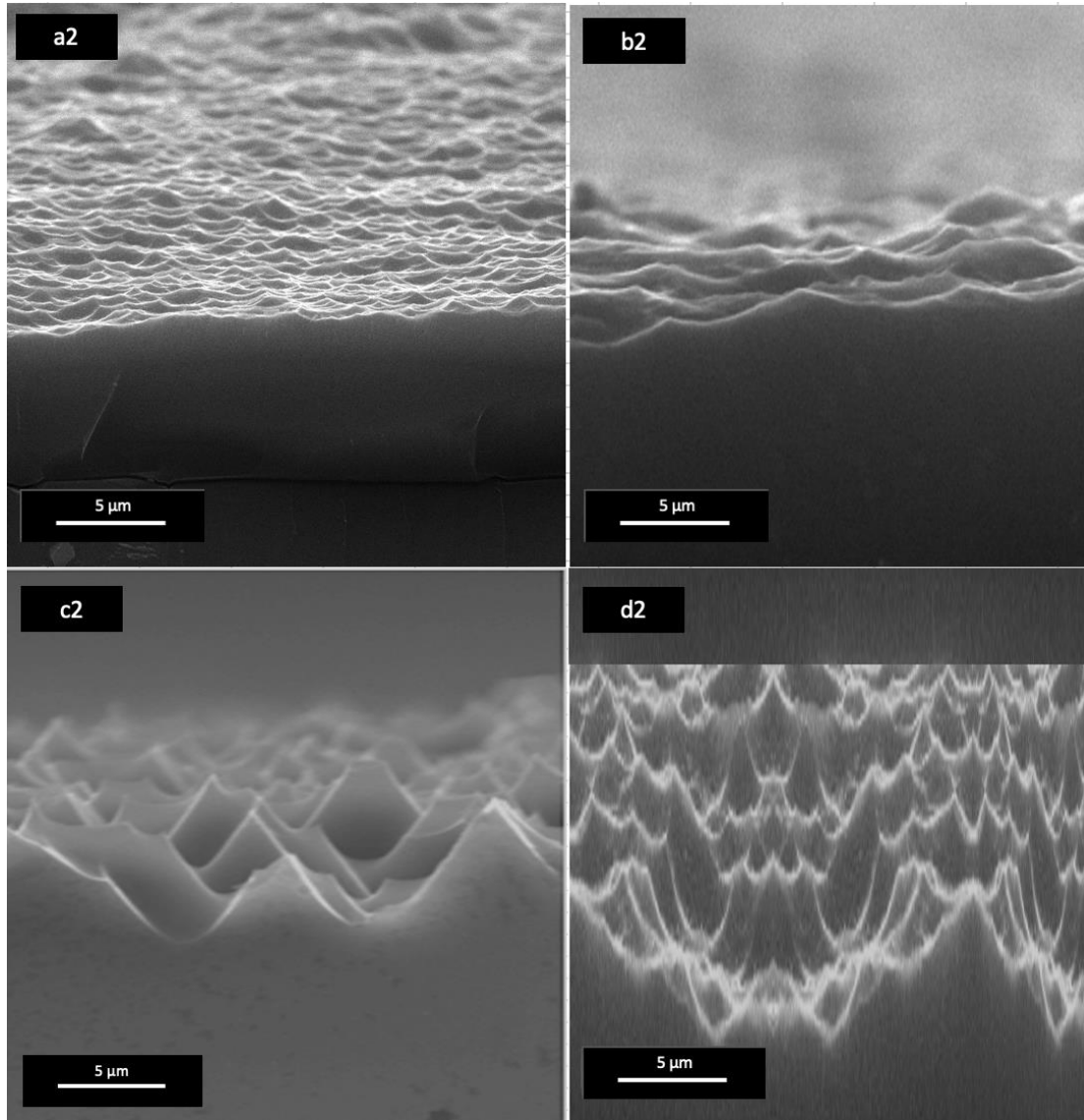
Şekil 5.1. HF konsantrasyonuna bağlı aşındırma hızı grafiği

Cu destekli aşındırma ile istenen piramit yapılarının 2-6 μm olması nedeniyle ve waferin mekanik kuvvetini azaltmamak amacı ile HF konsantrasyonu 4,5 M seçilerek aşındırma süresi çalışılmıştır. Tez çalışmasının ilerleyen kısımlarında aşındırma hızı ile yüzey morfolojisi incelenerek, yüzey yansımaya ait sonuçlar da tartışılmıştır.

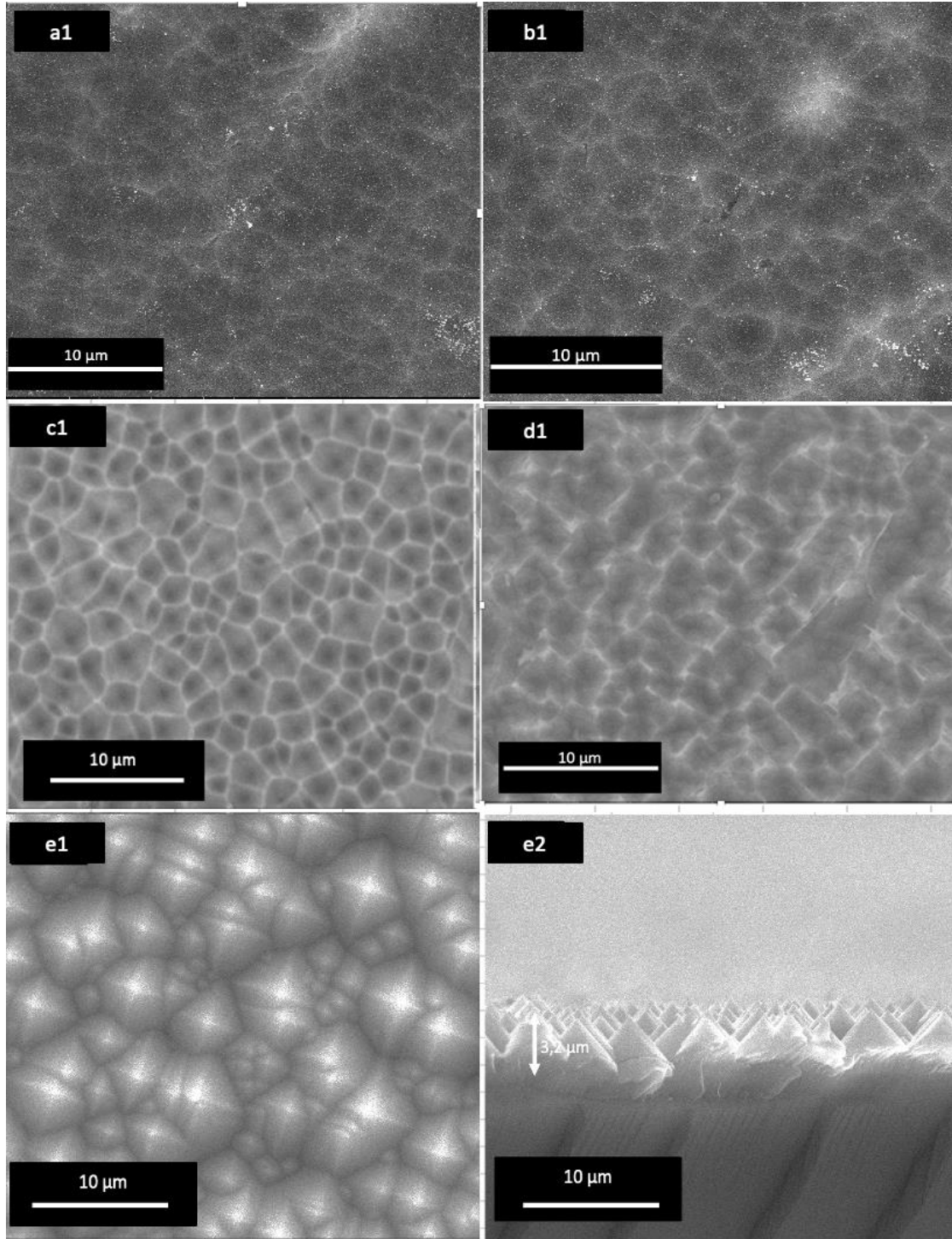
5.2. Optik Özelliklerin İyileştirilmesi İçin Yapılandırılan Yüzeyin Karakterizasyon Çalışmaları

Tez çalışması doğrultusunda güneş hücrelerinin ışık soğurma kapasitesini artırmak için m-Si wafer yüzeyinden yansıyan güneş ışığının yansımaya oranını mevcut düzensiz dik piramit ve daha fazla ışık soğurması için düzensiz ters piramit yüzey morfolojisini elde edilmiştir. Ters piramit yapısı Cu destekli kimyasal aşındırma metodu ile elde edilmiştir. Ayrıca, m-Si waferlara klasik olarak uygulanan alkali kimyasal aşındırma dik piramit elde edilerek ışık soğurmaları karşılaştırılmıştır. Farklı yüzey morfolojisi elde etmek için uygulanan alkali ve MDKA metodu öncesi tüm m-Si waferların testere izleri 3 μm aşındırılarak giderilmiştir. Ters piramit yüzeye sahip waferlar tek aşamalı $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2/\text{HF}/\text{H}_2\text{O}_2$ çözeltisine daldırılarak, m-Si ile kimyasal reaksiyonu ile izotropik aşındırılmıştır. Önceki aşındırma

mekanizmasında tartışıldığı gibi Cu^{2+}/Cu 'nun Si göre elektrokimyasal potansiyelinin düşük olması nedeniyle MDKA methodu 50°C 'de gerçekleştirilirken alkali aşındırma 80°C 'de 12 dakika süresince KOH ve katkı maddesi ile gerçekleşmiştir. Standart alkali aşındırma derecesi ve reaksiyon süresi Kalyon-pv de uygulanan reçete referans kabul edilmiştir. İlk aşamada aşındırma hızını optimize etmek amacıyla Cu metali ile yapılan aşındırma çözeltisinde HF farklı konsantrasyon 0,5, 1,5, 4,5 ve 13,5 M denemeleri 50°C ve 10 dakika reaksiyon süresinde gerçekleştirilmiştir. Aşındırma hızlarına bağlı olarak ilk önce SEM analizleri ve yansıma oranları çalışılmıştır. SEM yanal görüntüleri Resim 5.2 üstten bakış görüntüleri Resim 5.3'de verilmiştir.



Resim 5.2. HF konsantrasyonuna bağlı SEM yanal görüntüleri (a2) HF 0,5 M 10 dakika (b2) HF 1,5 M 10 dakika (c2) HF 4,5 M 10 dakika (d2) HF 13,5 M 10 dakika



Resim 5.3. HF konsantrasyonuna bağlı SEM üstten bakış görüntüleri (a1) HF 0,5 M 10 dakika (b1) HF 1,5 M 10 dakika (c1) HF 4,5 M 10 dakika (d1) HF 13,5 M 10 dakika (e1) DP_Ref alkali aşındırma ile dik piramit (e2) DP_Ref alkali aşındırma ile dik piramit yanal bakış

SEM görüntüleri Resim 5.3'te a1'den d1'e kadar incelediğinde m-Si waferin yüzey morfolojisinin HF konsantrasyonuna bağlı olarak değişim gösterdiği görülmüştür. Tüm numune yüzeylerinde bulunan yapıların yoğun olarak düzensiz bir biçimde değişmiştir. HF konsantrasyonu ile nano yapıların morfolojisi ve boyutlarının değişimi incelendiği zaman, HF konsantrasyonun büyük bir etkisinin olduğu gözlemlenmiştir. Resim 5.3 a1, düşük 0,5 M HF konsantrasyon değerinin m-Si wafer yüzeyinde sık süngerimsi yapılara katkıda bulunduğunu göstermektedir. HF konsantrasyonunun düşük olması nedeniyle yanal görüntüsüne bakıldığında piramit derinliğinin 1,0 μm 'dan daha küçük bir biçimde düzensiz ters piramit yapıları ile dağılmıştır. Yapılan ölçümlerde 0,9 μm olarak ölçülmüştür. Resim 5.3 b1, 1,5 M HF konsantrasyon değerinde ise m-Si wafer yüzeyinde ters piramit yapıları 0,5 M HF konsantrasyonuna göre daha sık ve derin görülmeye başlanmıştır. Ayrıca ters piramit boyutlarında büyüme gözlenmiştir. HF konsantrasyonunun düşük olması nedeniyle yanal görüntüsüne bakıldığında piramit derinliğinin 1,5 μm ile 2,5 μm arasında düzensiz ters piramit yapıları ile dağılmıştır. Resim 5.3 c1, 4,5 M HF konsantrasyonunda ise m-Si wafer yüzeyinde yanal ortalama boyutu 2,80 μm ile 3,5 μm arasında olan düzensiz dağılmış ters piramit yapıları ile dağılmıştır. Son olarak, Resim 5.3 d1, 13,5 M HF konsantrasyon değerinin m-Si wafer yüzeyinde ters piramit yapılarının yanal duvarlar ile çevrelendiği ve düzensiz yapının tamamen arttığı gözlemlenmiştir. Bu çevrelenen yan duvarlar ters piramit yapılarına pürüzlü olduğunu ve bozunmaya başladığını göstermektedir. Resim 5.2 d2, yanal görüntüde piramit derinliğinin 4 μm ile 7 μm arasında değiştiği gözlenmiştir.

HF konsantrasyonunun düşükten yüksek doğrultuda yanal görüntüsüne bakıldığında piramit derinliğinin Resim 5.2 a2, b2, c2 ve d2 açıkça değiştiğini göstermektedir. Tüm numunelerde düzensiz ters piramit yapıları ile dağılmıştır ve yapı dağılımları konsantrasyona bağlı değişiklik göstermiştir. Bu sonuçlar muhtemelen bakır parçacıklarının anizotropik aşındırma özellikleriyle ilgilidir. Nihai farklı yapı morfolojileri, sabit tutulan diğer koşullarla HF konsantrasyon değerlerinin değişiminden büyük ölçüde etkilenmektedir. Ayrıca, Resim 5.2 ve 5.3'te alkali kimyasal aşındırma yanal ve üstten görüntüsüne göre dik piramitlerin çok daha fazla düzensiz dağıldığı ve aşındırmanın eşit olmadığı gözlenmiştir. Dik piramitlerin 2 μm 'dan büyük olduğu tespit edilmiştir. HF konsantrasyon ve yüzey morfoloji dağılımı aşındırma mekanizması ile daha net açıklanmaktadır.

Resim 5.2 ve 5.3'te, farklı boyut ve özelliklere sahip dokuların oluşumunu göstermektedir. Farklı HF konsantrasyon değerleri altında üretilen yüzey morfolojileri. 0,5 M HF

konsantrasyon değeri kullanıldığında, HF konsantrasyonu çözeltide çok düşüktü, dolayısıyla çözeltide HF yokluğunda oksit tabakası hızla giderilemedi. Mono silisyum wafer yüzeyinde biriken Cu nanoparçacıkları hızla tüketildi ve kayboldu. Bu nedenle Cu nanopartiküllerin kısa ömürlerinden dolayı sığ ve küçük yapılar wafer yüzeyinde kaplanmıştır. 1,5 M HF konsantrasyon değeri kullanıldığında, ters piramit yapıları adım adım derinleşti. Kimyasal reaksiyonlar, aşındırma çözeltisinde kademeli olarak dinamik dengeye ulaştı. Anizotropik aşındırma, m-Si waferin yüzeyinde meydana geldi. Aşındırma solüsyonunda uygun oranda HF (4,5 M) ile tekdüze ters piramitler elde edildi. Yüksek HF (13,5 M) konsantrasyonunda, hızlı silisyum aşınmasına ve aşındırma çözeltisinde hızlı H₂O₂ tüketimine yol açarak son derece düzensiz doku yapılarına neden olmuştur.

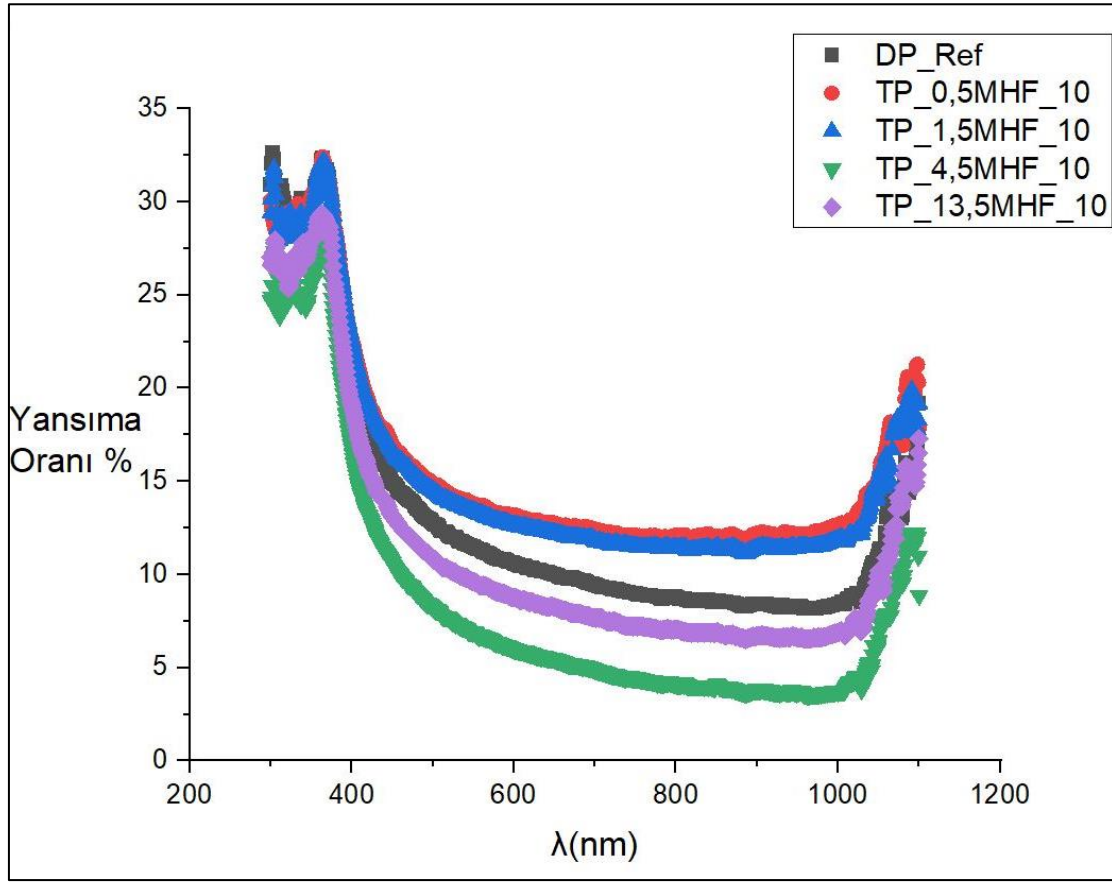
Yüzey yapılarının incelenmesi sonrasında gelen güneş ışığının 300-1100 nm aralığında yansıma oranları incelenmiştir. HF konsantrasyonuna bağlı m-Si waferların sonuçları ve alkali kimyasal aşındırma ile elde edilen dik piramitli yüzeye sahip numunenin sonucu Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. HF konsantrasyonuna bağlı m-Si waferların sonuçları ve alkali kimyasal aşındırma ile elde edilen dik piramitli yüzeye sahip numunenin sonucu

Numune Adı	HF (M)	Aşındırma Süresi (dakika)	300-1100 nm WAR (%)	400-1100 nm Ortalama Yansıma Oranı (%)
TP_0,5MHF_10	0,5	10	14,75	13,78
TP_1,5MHF_10	1,5	10	14,27	13,20
TP_4,5MHF_10	4,5	10	7,92	6,12
TP_13,5MHF_10	13,5	10	10,49	8,97
DP_Ref	-	12	12,22	10,69

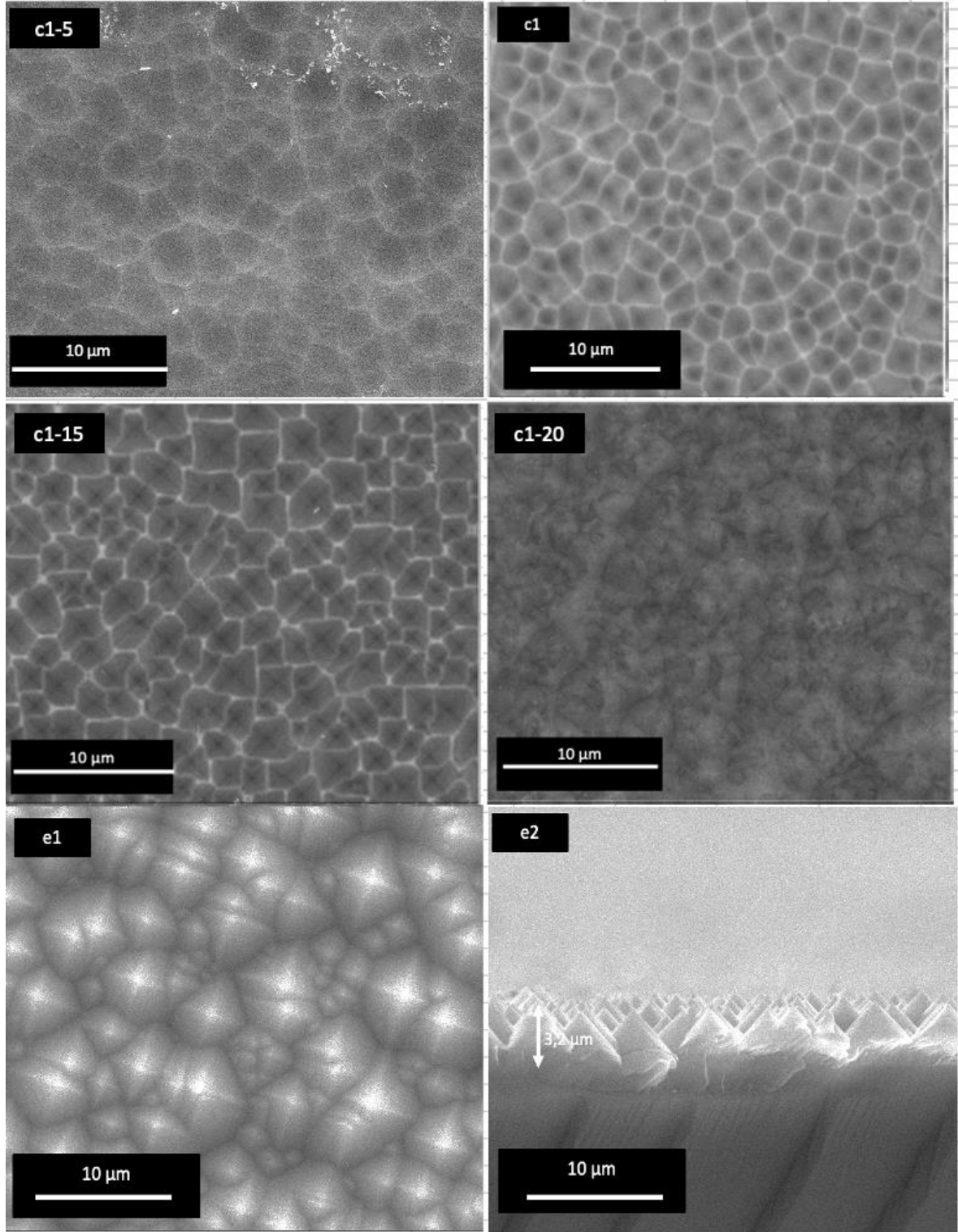
HF 0,5 M ile 13,5 M konsantrasyon arasında m-Si wafer yüzey yansıma oranlarına bakıldığında aşındırma solüsyonunda kimyasal reaksiyonu dengeli sağlanan ve ters piramitli yanal aşındırması 2,80 µm ile 3,5 µm arasında düzensiz dağılımın yüzey yansıma oranı %10 altında elde edilerek, 300-1100 nm arasında WAR %7,92 oranı alınmıştır. Ayrıca 400-1100 nm arasında ise %6,12 oranı ölçülmüştür. Yüzey yapılandırması en az olan ve ters piramitleri derinleşmeyen en az konsantrasyona sahip 0,5 M HF ile en yüksek 13,78% yüzey yansıma oranı elde edilmiştir. 1,5 M HF olan çözeltide de dik piramitli yüzeyden daha yüksek oran ile 13,20% yansıma oranı ölçülmüştür. 13,5 M HF ters piramit yapısını değişime uğratmasına rağmen, dik piramitli yüzeyden daha iyi bir oran elde edilmiştir. Konsantrasyon artışı ile yansıma oranlarının doğrusal dağılım sergilenmediği gözlenmemiştir.

Konsantrasyona bağı 300 ile 1100 nm arasında dağılım grafiğı Şekil 5.2’de verilmiştir.

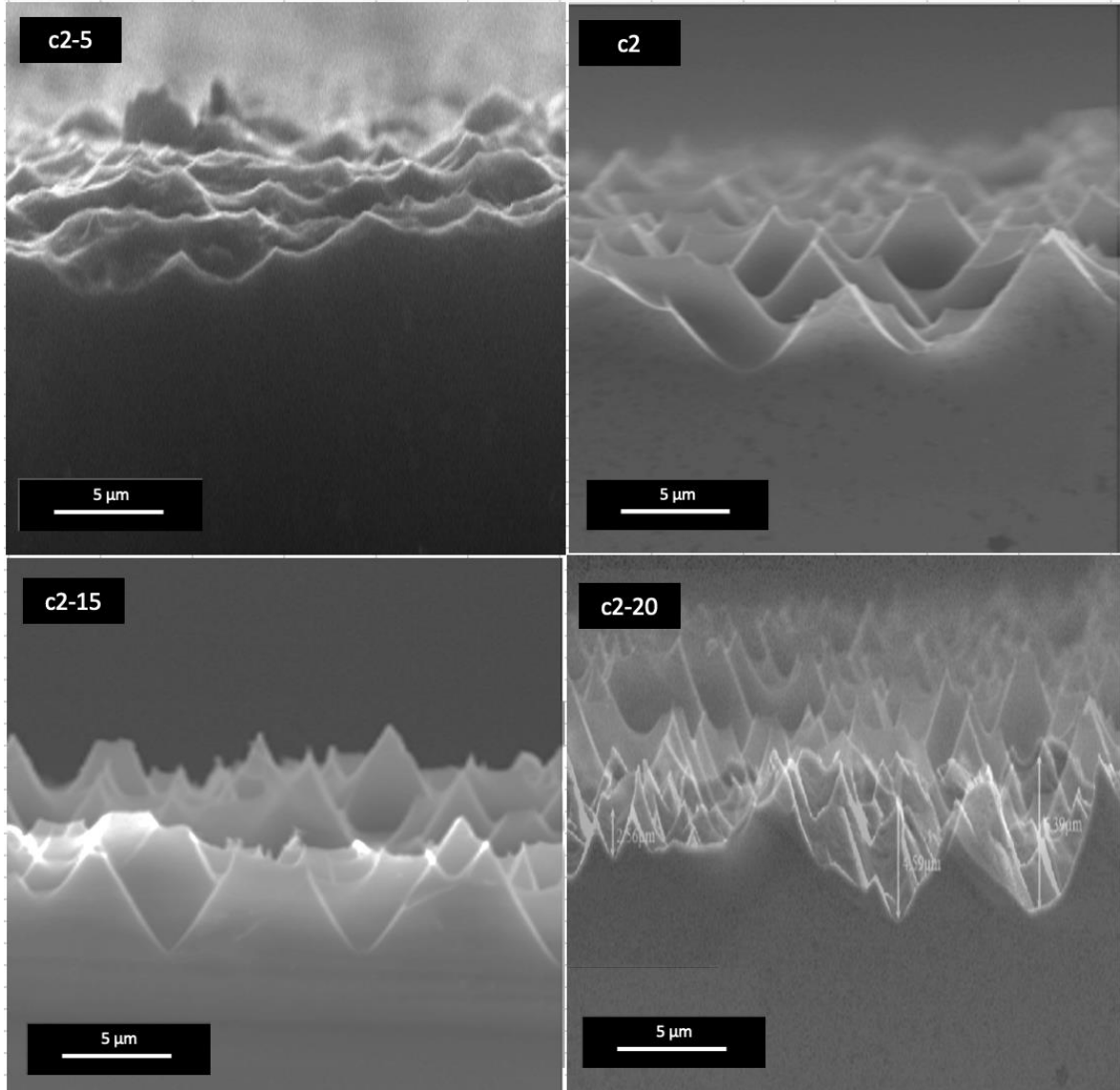


Şekil 5.2. HF konsantrasyonuna bağı yüzey yansım oranı grafiğı

En az HF konsantrasyonu en yüksek yansımaya sahipken, en yüksek konsantrasyona sahip aşındırma en iyi ikinci yansım oranına sahiptir. Bunun nedenlerinden biri aşındırmada reaksiyon süresinin 10 dakika ile sınırlı olmasıdır. Bu nedenle, yansım oranının daha düşük oranda elde edebilmek ve yanal aşındırmanın artırılması için en iyi sonuç alınan 4.5 M HF konsantrasyonunda çözelti sabit tutularak 5,10, 15 ve 20 dakika reaksiyon süresi denenmiştir. Reaksiyon süresi ile ilgili alınan yüzey morfolojilerinin üstten bakış ve yan kesit görüntüleri Resim 5.4 ve Resim 5.5’te verilmiştir.



Resim 5.4. Yüzey morfolojilerinin üstten bakış SEM görüntüleri (c1-5) 4,5 M HF ile 5 dakika aşındırma süresi (c1) 4,5 M HF ile 10 dakika aşındırma süresi (c1-15) 4,5 M HF ile 15 dakika aşındırma süresi (c1-20) 4,5 M HF ile 20 dakika aşındırma süresi (e1) DP_Ref alkali aşındırma ile dik piramit (e2) DP_Ref alkali aşındırma ile dik piramit yanal bakış



Resim 5.5. Yüzey morfolojilerinin yanıl bakış SEM görüntüleri (c2-5) 4,5 M HF ile 5 dakika aşındırma süresi (c2) 4,5 M HF ile 10 dakika aşındırma süresi (c2-15) 4,5 M HF ile 15 dakika aşındırma süresi (c2-20) 4,5 M HF ile 20 dakika aşındırma süresi

Tüm parametreler sabit tutularak m-Si waferın aşındırma süresi 5-10-15 ve 20 dakikaya çıkarıldığında, Si ile Cu^{2+}/Cu arasındaki elektrokimyasal reaksiyonun süre ile ilişkisi incelenmiştir. Resim 5.5'te gösterildiği gibi, düzensiz ters piramit yapılarının oluşumundan yapının tekrar bozunuma ait aşamalar net bir şekilde görülmektedir. Resim 5.5'c2- 5 dakika reaksiyon süresindeki süreci literatürde yer alan bir çalışmada 0-5 dakika arasındaki oluşumun Cu^{2+} iyonlarının elektronları tercihen m-Si waferın kıvrımlarından yakalayarak ve Cu nanopartiküller yüzey serbest enerjisinin düz alanlardan çok daha yüksek olması nedeniyle orada adsorbe olduğunu belirtir [78]. Yüzeydeki çukurlaşma Cu destekli

aşındırma ile büyümeye ve derin gelmeye başlamıştır ve derinliğin arttığı kısımlarda Cu partiküllerinin bulunmadığı görülmüştür. Bunun nedeni, Si [100] yüzeyinde daha fazla ve daha büyük Cu nano partiküller gözlenirken ve Si (111) yüzeylerinde daha az ve daha küçük gözlenmektedir. Cu nano partiküllerin yüzeyde anizotropik birikimi nedeniyle kare şeklinde hale geliyor ve Au ve Ag nanopartiküllerin birikiminden farklı olan anizotropik aşınmayı katalize ediyor [79]. Cu^{2+} 'nın Ag^{+} 'ninkinden çok daha zayıf elektron yakalama kabiliyeti ve Si [100] ve (111) düzlemlerindeki elektron sağlama oranlarındaki farklılık nedeniyle, m-Si üzerindeki Cu nano partikül popülasyonu anizotropik görünmektedir; anizotropik dağlama ve ters piramit oluşumuna neden olmaktadır [75]. Tersine çevrilmiş piramit, Resim 5.4 c1 ve Resim 5.4 c1-15'te gösterildiği gibi standart hale geliyor ve zamanla hızla büyüyor. 10 dakika reaksiyon süresinden sonra ters piramitler tamamen oluşmuştur, fakat Si(111) düzlemleri arasındaki eklemler hala yuvarlaktır. Buradaki yapının tam oluşması için halen zamana ihtiyaç olduğunu göstermektedir. 15 dakikalık reaksiyon süresi sonrası Si (111) yan duvarlarla daha standart hale geliyor ve yüzeyin köşe noktalarında yan duvarın arttığı gözlenmiştir. Reaksiyon süresi 20 dakika olduğunda ters piramitlerin yan duvarları aşınmaya başladı, bu da bazı ters piramitlerin oluk yapıları ve yarım daire yapıları oluşturmak üzere birleşmesi ve üst üste binmesiyle sonuçlandı. Ayrıca oluk yapısının yan duvarlarında bazı üçgenler ve küçük ters piramit yapılar oluşturulmuştur. Yüzeyin dik piramit oluşumuna bezemektedir.

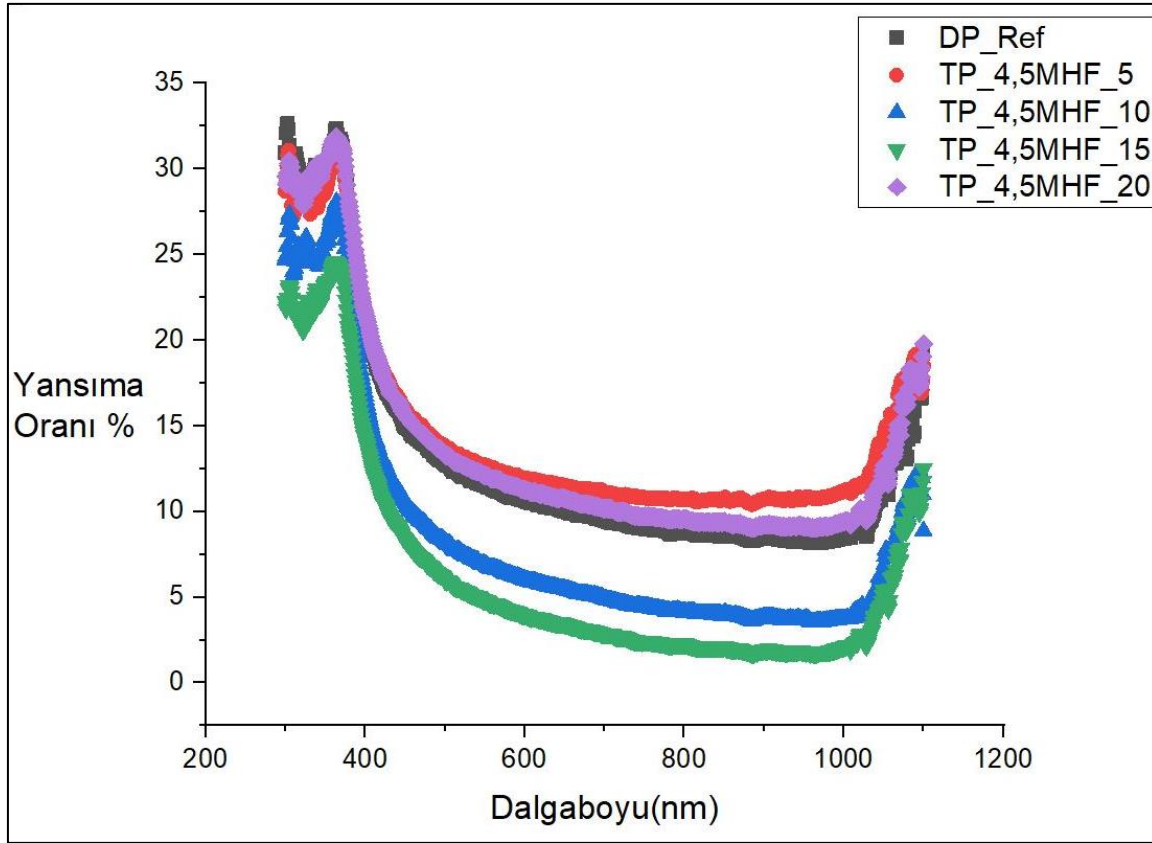
Resim 5.5 yanal kesitten sonuçlara bakıldığında, Resim 5.5 c2-5 dakika işlem süresinde piramit boyutları $1,6\ \mu\text{m}$ ile $2,2\ \mu\text{m}$ arasında değiştiği gözlenmektedir. Fakat 0,5 M ve 1,5 M HF konsantrasyona göre aşındırma dağılımı daha iyidir. Resim 5.5 c2-15 dakika reaksiyon süresi sonrası elde edilen piramit derinlikleri $2\ \mu\text{m}$ ile $5,6\ \mu\text{m}$ arasında değişmektedir. Resim 5.5 c2-20 dakika aşındırma süresi sonrası ise piramit boyutlarının dağılımı çok geniştir, $1,5\ \mu\text{m}$ ile $6,8\ \mu\text{m}$ arasında değişmektedir.

Yüzey yapılarının incelenmesi sonrasında gelen güneş ışığının 300-1100 nm aralığında ağırlıklı ortalama yansıtma oranları (%WAR) ve 400-1100 nm aralığındaki yansıma oranları incelenmiştir. Reaksiyon süresine bağlı m-Si waferların yüzey yansıma sonuçları Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Reaksiyon süresine bağlı m-Si waferların yüzey yansımaları

Numune Adı	HF (M)	Aşındırma Süresi (dakika)	300-1100 nm WAR(%)	400-1100 nm Ortalama Yansım Oranı (%)
TP_4,5MHF_5	4,5	5	13,61	12,50
TP_4,5MHF_10	4,5	10	7,92	6,12
TP_4,5MHF_15	4,5	15	5,97	4,17
TP_4,5MHF_20	4,5	20	12,84	11,47
DP_Ref	-	12	12,22	10,69

HF 4,5 M sabit tutularak, reaksiyon süresi 5, 10, 15 ve 20 dakika arasında m-Si wafer yüzey yansım oranlarına bakıldığında aşındırma solüsyonunda kimyasal reaksiyonu dengeli sağlanan ve ters piramitli yanal aşındırması 10 dakika ile 2,8 μm ile 3,5 μm ve 15 dakika sürede 2 μm ile 5,6 μm arasında ve düzensiz dağılımın yüzey yansım oranı %10 altında elde edilerek, 300-1100 nm arasında WAR yüzdeleri sırasıyla %7,92 ve %6,12 oranları alınmıştır. Ayrıca 400-1100 nm arasında sırasıyla %6,12 ve %4,17 oranları ölçülmüştür. Yüzey yapılandırma süresi en az olan ve ters piramitleri derinleşmeyen yüzeyde Cu nanopartikülleri bulunan m-Si wafer en yüksek %13,61 yüzey yansım oranı elde edilmiştir. Diğer yüksek ise 20 dakika işleme tabi tutulan m-Si waferda %12,84 olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu en yüksek yansım oranları dik piramitli yüzeye sahip m-Si waferdan daha yüksektir. Aşındırmada önemli faktör olan HF konsantrasyonu en iyi oranda sabit tutulmasına rağmen, aşındırma süresinin diğer önemli bir parametre olduğu ortaya konulmuştur. Dik piramitli yüzey 5 ve 20 dakika işlem süresinden daha iyi ışık yakalama oranına sahipken, 10 ve 15 dakika olan işlem sürelerinden oldukça yüksektir. Yüzey morfolojilerinin ışık soğurma ile bağlantılı olduğu anlaşılmıştır. Aşındırma süresine bağlı 300 ile 1100 nm arasında dağılım grafiği Şekil 5.3'te verilmiştir.



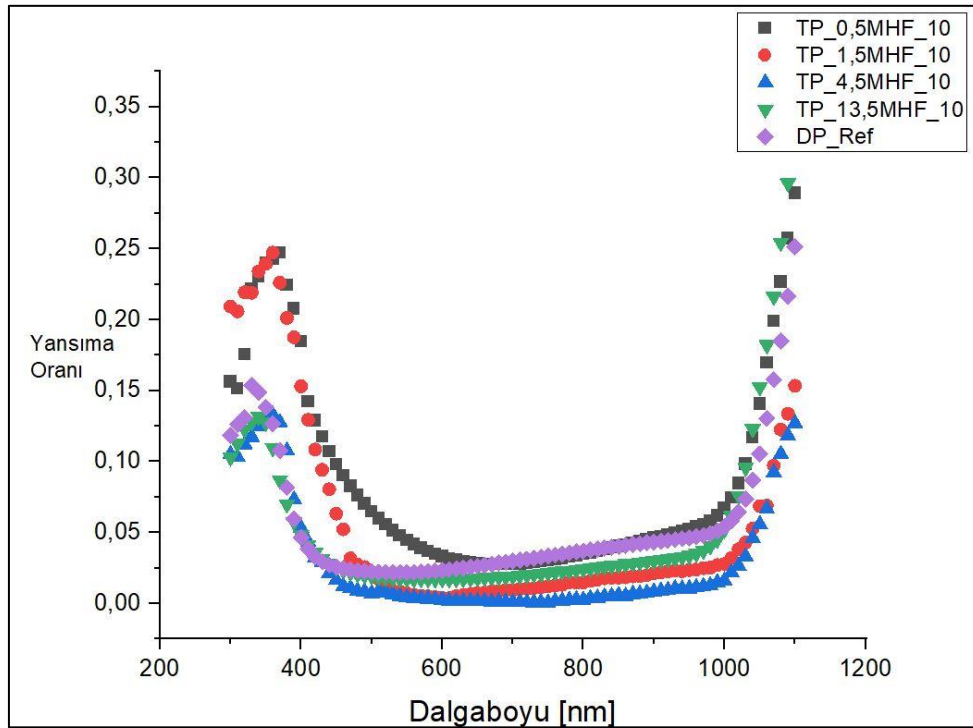
Şekil 5.3. Aşındırma süresine bağlı yüzey yansım oranı grafiği

Mono silisyum waferlar yüzey yapılandırma ve sonrasında bakır temizleme işlemleri tamamlandıktan sonra difüzyon, seçici emitör, arka yüzey parlatma, tavlama ve ön ve arka yüzey plazma destekli ile yansım önleyici SiN_x kaplamalar tamamlandıktan sonra da ışık soğurmaları incelenmiştir. Yansım engelleyici kaplama sonrası HF konsantrasyonuna bağlı ve aşındırma süresine bağlı yansım oranları Çizelge 5.4’te verilmiştir.

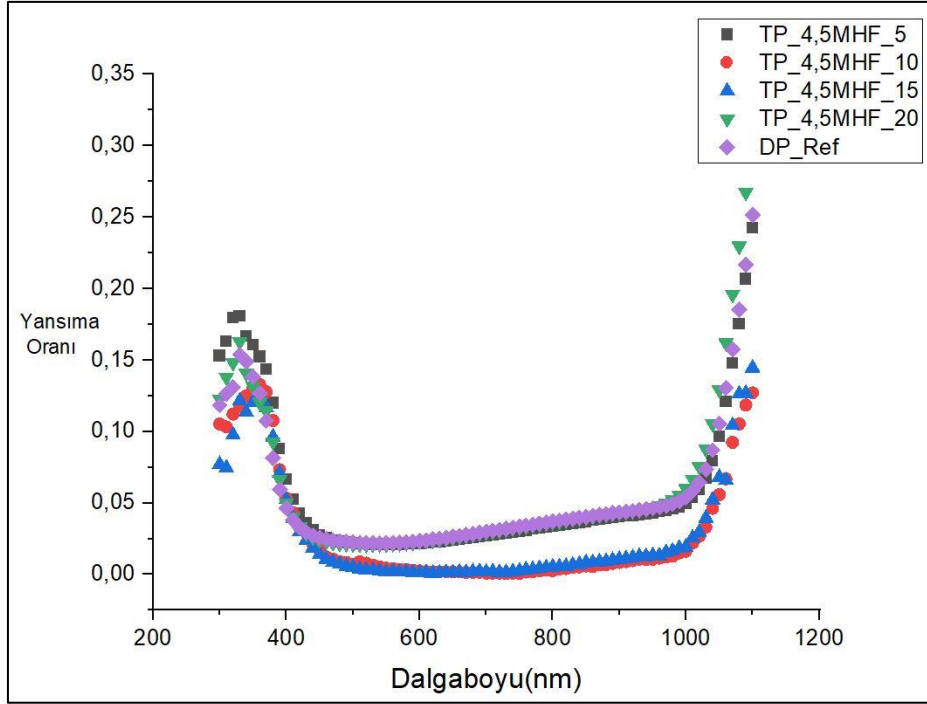
Çizelge 5.4. Yansım engelleyici kaplama sonrası HF konsantrasyonuna bağlı aşındırma süresine bağlı yansım oranları

Numune Adı	HF (M)	Aşındırma Süresi (dakika)	300-1100 nm WAR (%)	400-1100 nm Ortalama Yansım Oranı (%)
TP_0,5MHF_10	0,5	10	7,74	6,75
TP_1,5MHF_10	1,5	10	6,02	5,13
TP_4,5MHF_10	4,5	10	3,44	2,15
TP_13,5MHF_10	13,5	10	3,94	2,01
TP_4,5MHF_5	4,5	5	5,74	4,51
TP_4,5MHF_15	4,5	15	2,69	1,82
TP_4,5MHF_20	4,5	20	5,48	4,73
DP_Ref	-	12	5,09	4,69

Arka ve ön yansımaya engelleyici SiN_x kaplaması sonrası alınan yansımaya oran sonuçları, yüzey yapılandırma sonuçlarına benzer ilişki içinde olduğu tespit edilmiştir. HF konsantrasyonuna bağlı değişimde en iyi yansımaya oranını HF 4,5 M 10 dakika aşındırma süresi ile %3,44 ve 400-1100 nm arasında %2,15 vermiştir. HF konsantrasyonu ile yapılan denemede en yüksek yansımaya oranına en düşük konsantrasyona sahip sırasıyla 0,5 M ve 1,5 M HF ile aşındırılan m-Si waferlar %7,74 ve %6,02 yansımaya oranları alınmıştır. Konsantrasyonun sabit tutularak, reaksiyon süresi 5, 10, 15 ve 20 dakika arasında m-Si wafer kaplama sonrası yüzey yansımaya oranlarına bakıldığında aşındırma solüsyonunda kimyasal reaksiyonu dengeli sağlanan ve ters piramitli yanal aşındırması 15 dakika sürede 3 μm ile 5 μm arasında ve düzensiz dağılımın yüzey yansımaya oranı %2,69 ile en düşük değer olmuştur. Ayrıca 400-1100 nm arasında %1,82 oranı ölçülmüştür. Yüzey yapılandırma süresi en az olan ve ters piramitleri derinleşmeyen yüzeyde Cu nanopartikülleri bulunan m-Si wafer kaplama sonrası da en yüksek yansımaya oranı %5,74 'dir. Diğer yüksek oran ise 20 dakika işleme tabi tutulan m-Si waferda %5,48 olarak ölçülmüştür. Yansımaya engelleyici kaplama sonrası dik piramitli yüzeye sahip m-Si waferın yansımaya oranı %5,09'dur. Yüzey morfolojisinin değişimi, yansımaya engelleyici kaplama sonrasında aynı doğrultuda sonuçlar vermiştir. HF konsantrasyonuna bağlı yansımaya engelleyici kaplama sonrası ve aşındırma süresine bağlı 300 ile 1100 nm arasında dağılım grafiği sırasıyla Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.4. HF konsantrasyonuna bağlı kaplama sonrası yansımaya oranı grafiği



Şekil 5.5. Aşındırma süresine bağlı kaplama sonrası yansım oranı grafiği

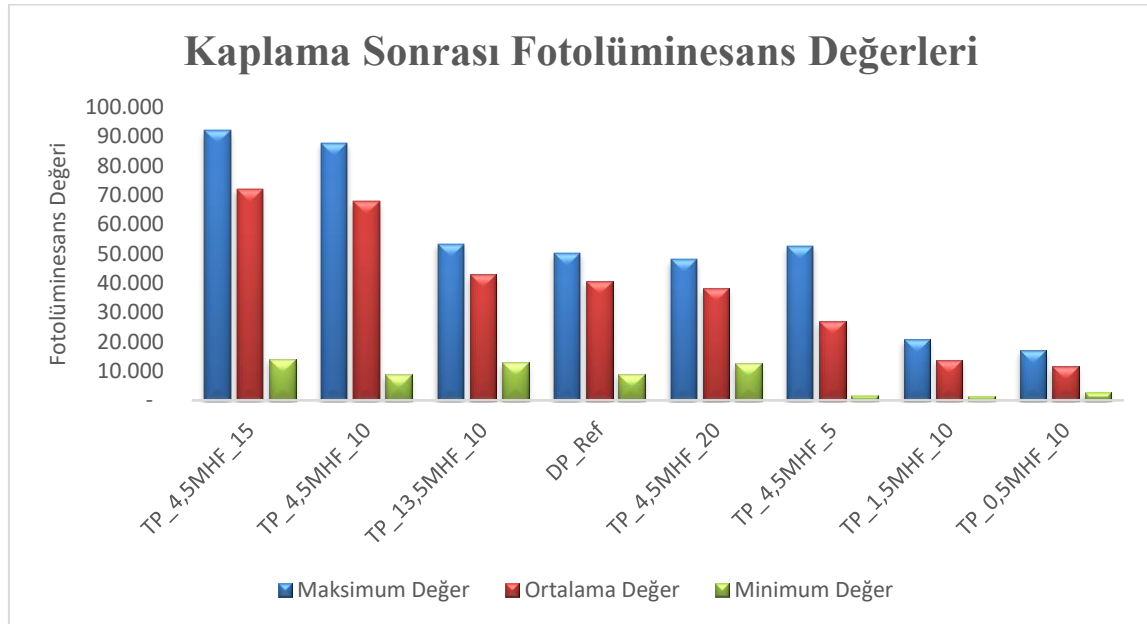
Yapılan yüzey yansım ölçümleri sonucunda ters piramitlerin yansım engelleyici kaplama ile dik piramitli wafer yüzeyine göre 900 nm sonrasında daha iyi performans verdiği gözlenmiştir. Bunun nedeni ise, 900 nm sonrası yansım oranının daha düşük olduğu grafikten görülmektedir. Ters piramit yapıları ile SiN_x birikimi, dik piramit yapısına sahip yüzeyde daha fazla olduğunu Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te iki farklı denemede göstermiştir.

Optik özellikleri daha iyi tanımlayabilmek adına ve yüzeyleri yapılandırılan ve sonrasında yansım engelleyici kaplama yapılan numunelere fiziksel yüzey incelemesi ve ışık soğurma kapasitesi için fotolüminesans (PL) çalışması yapılmıştır. PL çalışmasında ışık maruz kalma süresi 0,1 saniyedir ve aydınlatma alanı “Large ”olarak tanımlanmıştır. Fotolüminesans maruz edilen ışık ile toplanan elektron-boşluk çiftleri yüzey yapılandırma sonrası hangi bölgelerde daha fazla ışık soğurduğunu temsil etmektedir. Koyu lacivert alanlar ışığın en iyi soğurulduğunu temsil ederken, koyu lacivert renkten, yeşil, sarı ve kırmızı alana doğru ışık soğurulma azalır. Ayrıca kırmızı alanlar numunenin ışık soğurmasının düşük olması ile elektriksel özelliğinde en az olduğu bölge olarak tanımlanır. Daha sonra yapılacak elektrolüminesans çalışmasında bu alanların karanlık olarak belirmesi beklenmektedir. Yapılan PL çalışmasının parametreleri ve minimum, maksimum ve ortalama değerler Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.5. Yapılan PL çalışmasının parametreleri ve minimum, maksimum ve ortalama değerler

Numune Adı	Direnç (ohm cm)	Foton Akısı (Φ)	Minimum Değer	Maksimum Değer	Ortalama Değer
TP_4,5MHF_15	1	3,79E+22	14 177	92 134	72 123
TP_4,5MHF_10	1	3,79E+22	8 754	87 822	67 716
TP_13,5MHF_10	1	3,79E+22	12 774	53 209	42 970
DP_Ref	1	3,79E+22	9 059	50 175	40 486
TP_4,5MHF_20	1	3,79E+22	12 756	48 008	38 254
TP_4,5MHF_5	1	3,79E+22	1 720	52 678	27 065
TP_1,5MHF_10	1	3,79E+27	1 513	20 865	13 795
TP_0,5MHF_10	1	3,79E+21	2 915	16 926	11 586

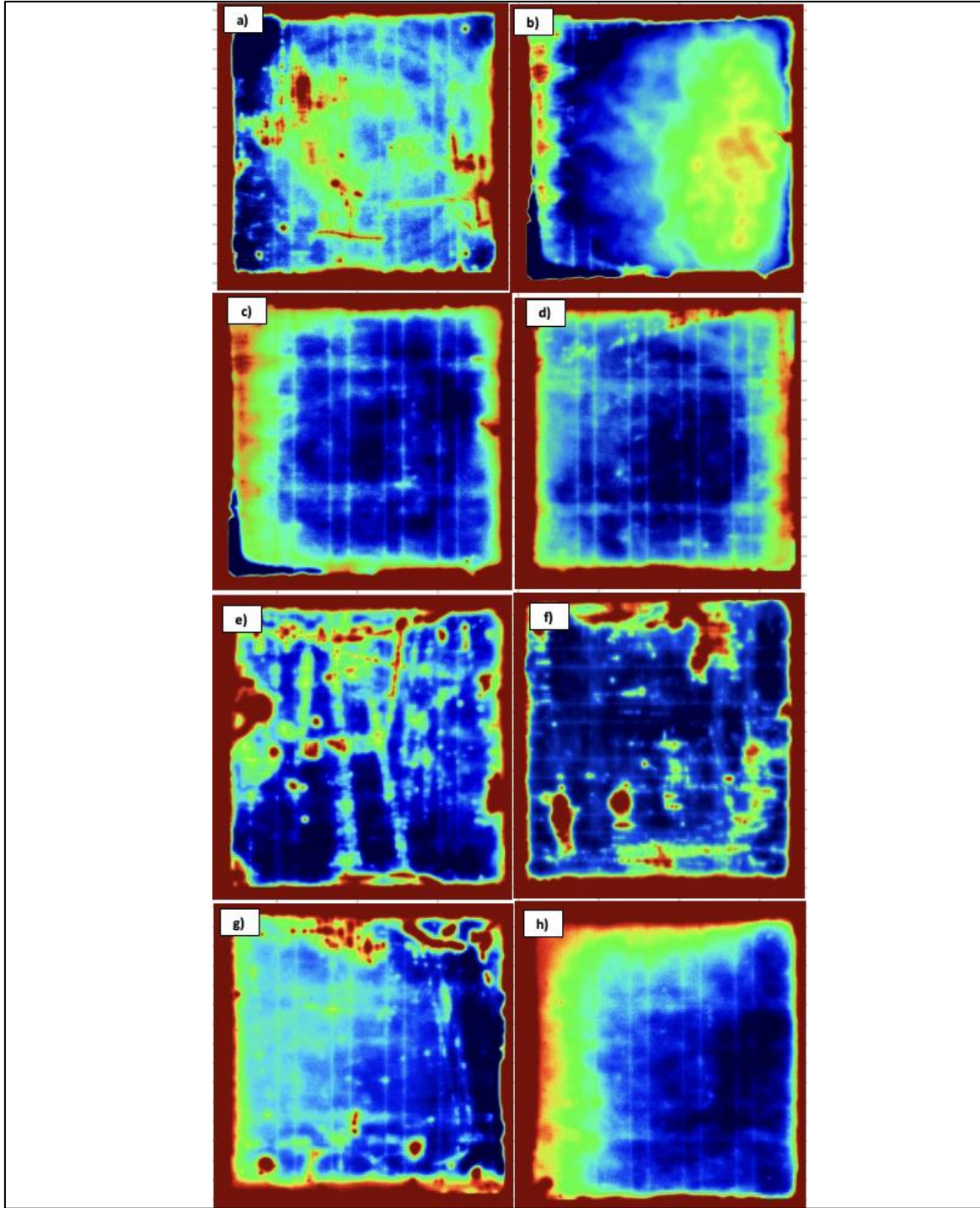
Çizelge 5.5’te belirtilen üzerine en iyi yüzey yapılandırma ve SiN_x kaplama sonrası %10’un altında yansıma oranına sahip 4,5 M HF ve aşındırma süresi sırasıyla 15 ve 10 dakikada işlem gören m-Si waferlar en yüksek değerlere ulaşmıştır. En yüksek yansıma oranına sahip olan ve kaplama sonrası da aynı ilişkisi veren düşük HF konsantrasyonuna sahip çözeltiler ile 10 dakika aşındırma süresi ile işlem gören waferlar ışık soğurmada en zayıf numunelerdir. Numunelerin birbiri arasındaki ilişkiyi daha net görebilmek aşşa Şekil 5.6’da gösterilen grafikte verilmiştir.



Şekil 5.6. Kaplama sonrası numunelerin fotolüminesans değer grafiği

Şekil 5.6’da verilen grafiğe bakıldığında 3 farklı dağılımda PL sonuçlarının aynı dağılımda olduğu incelenmiştir. Minimum değere sahip sonuçlar kırmızı alanları kapsamaktadır. Üretim esnasında numuneye olan temas, kirlilik, ürünün çizilmesi sonucu alınır. Bu alanlar

ışık soğurmada en düşük kabiliyete sahiptir ve hemen hemen her numunede aynı değerler alınmıştır. Maksimum alan ile ürünün ışık yakalama kabiliyetinin yüksek olduğunu temsil eder ve koyu lacivert, mavi renkler ile temsil edilmektedir. Grafikte net anlaşılması adına numuneler kaplama sonrası elde edilen en düşük yansıma oranından en yüksek yansıma oranına sahip sıraya göre çizilmiştir. Grafik eğrisine bakıldığında da yansıma oranının düşük olması ile PL değerinin yüksek olma ilişkisi birebir örtüşmektedir. Fotoluminesans çalışmasına ait alınan görüntüler Resim 5.6'da verilmiştir.

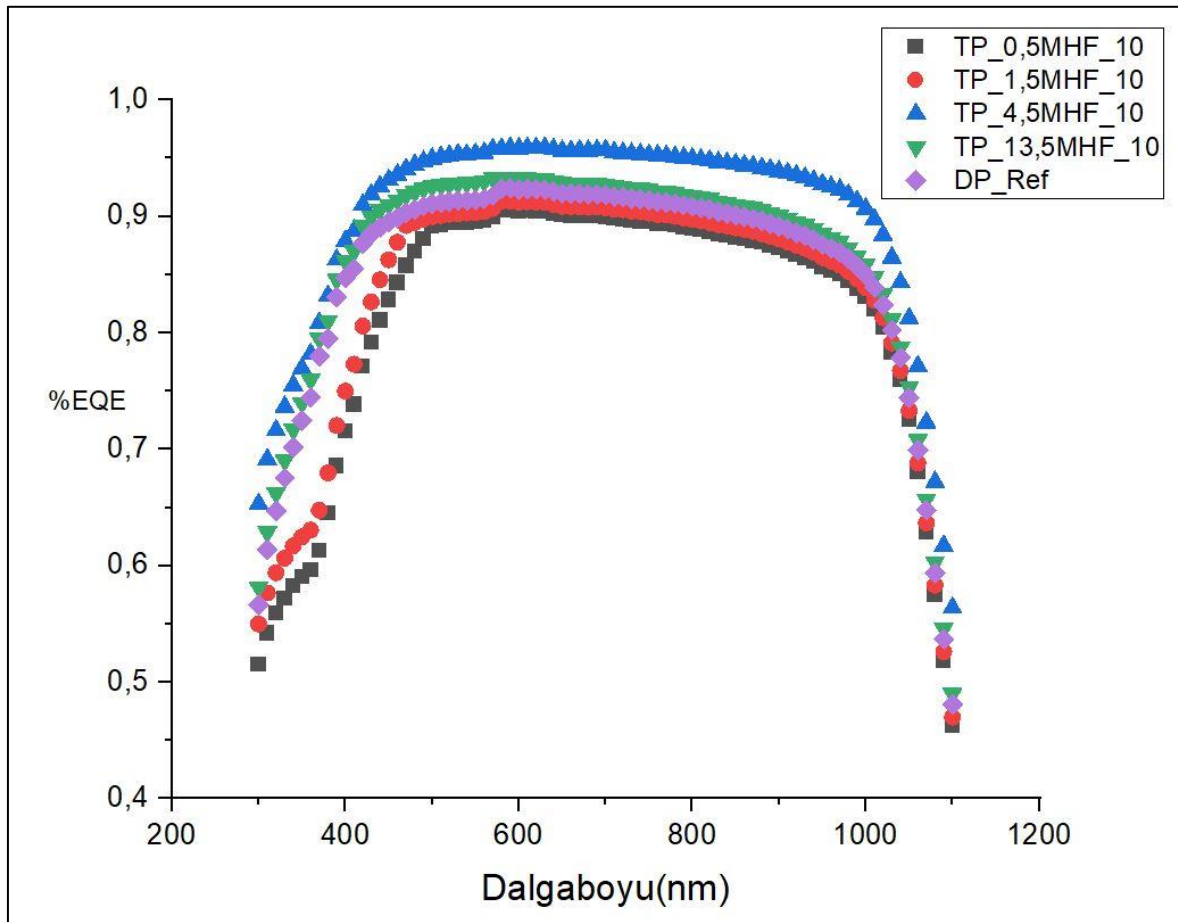


Resim 5.6. Ters piramit numunelerinin fotoluminesans görüntüleri (a) 0,5 M HF 10 dakika aşındırma süresi (b) 1,5 M HF 10 dakika aşındırma süresi (c) 4,5 M HF 10 dakika aşındırma süresi (d) 13,5 M HF 10 dakika aşındırma süresi (e) 4,5 M HF 5 dakika aşındırma süresi (f) 4,5 M HF 15 dakika aşındırma süresi (g) 4,5 M HF 20 dakika aşındırma süresi (h) dik piramitli m-Si wafer

5.3. Güneş Hücresi Üretimi Sonrası Yapılan Karakterizasyon Çalışmaları

Güneş hücrelerinin optik özelliklerinin geliştirilmesi için en önemli adım ışık soğurulmasının artırılmasıdır. Tez çalışmasında iki farklı metot ile üretilen numunelerin yüzey yapılandırması sonrası diğer proses adımları tamamlanarak, plazma destekli kimyasal biriktirme yöntemiyle arka ve ön yüzey yansıma engelleyici kaplamaları sonrası en son aşama olan metalizasyon aşaması tamamlanmıştır. Metalizasyon aşaması tamamlanan numunelerin ilk önce kuantum verimlilik, EQE/IQE ölçümleri yapılmıştır.

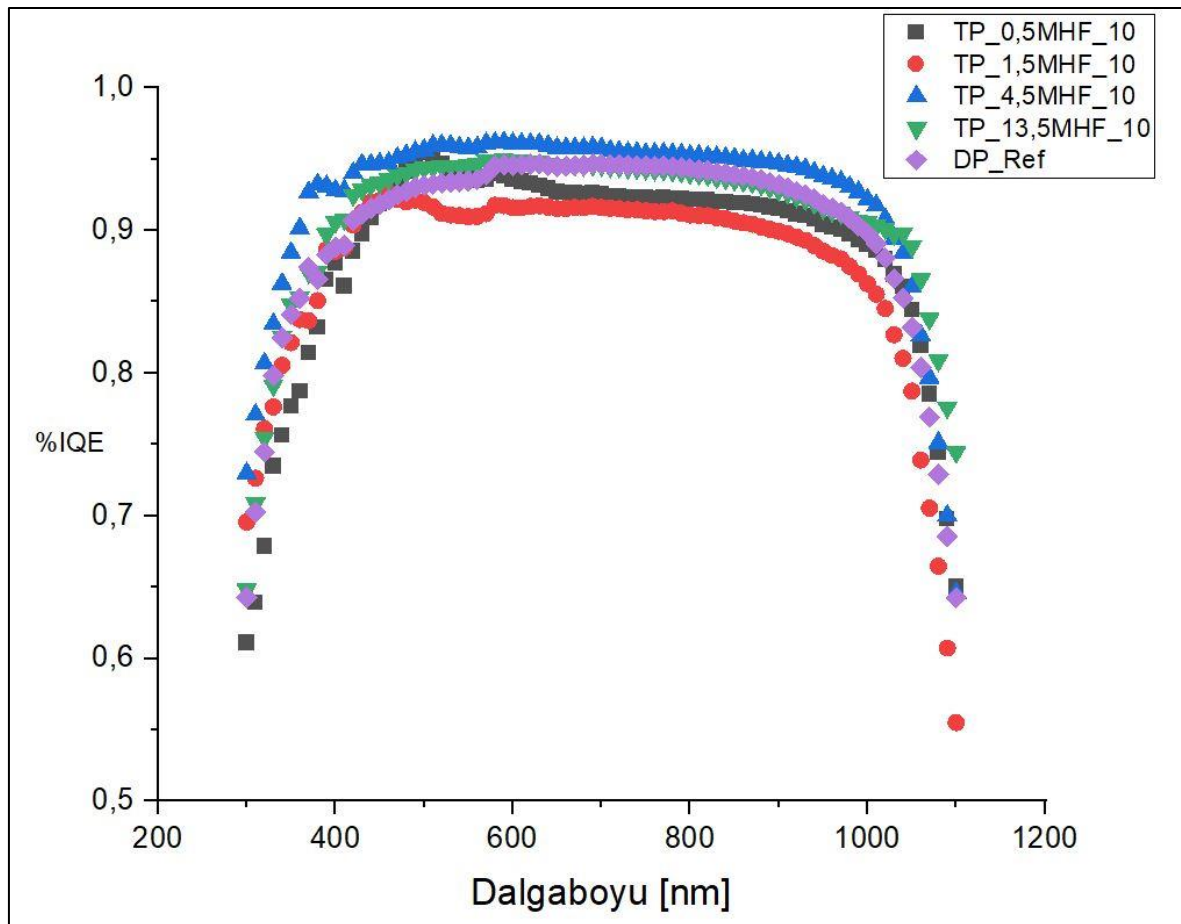
EQE ölçümleri güneş hücresinin optik özelliklerini tanımlamak ve kayıpları belirtmede önemli bir karakterizasyon yöntemidir. Çalışmaların ilk aşaması olan HF konsantrasyonuna bağlı elde edilen ters piramitlerin 300-1100 nm arasındaki EQE ölçümleri Şekil 5.7 grafiğinde verilmiştir.



Şekil 5.7. HF konsantrasyonuna bağlı harici kuantum verimlilik grafiği

HF konsantrasyonuna bağı numunelerin EQE ölçümlerinde mavi ışık (300-500) ve kızılötesi ışık (900-1100) bölgelerindeki davranışları incelendiğinde, 4,5 M HF konsantrasyonuna sahip numunenin iki bölgede de en yüksek verime ulaştığı görülmektedir. Bunun sebebi, ters piramit yapılarının en düzenli ve yüzey yansıma oranının kaplama öncesi ve sonrasında en düşük orana sahip olmasıdır. Ayrıca PL ölçümünde okunan değer de diğer HF konsantrasyonlarındaki numunelerinden yüksektir. EQE sonuçları yüzey morfolojisi, yansıma oranları ve PL çalışmasındaki sonuçlar ile direkt aynı doğrultuda sonuçlar vermiştir. Mavi ışık bölgesinde numuneler arasındaki fark daha fazladır ve ayırt edicidir. Bu fark, güneş hücresi üretiminde tüm aşamalar sabit tutulurken, yüzey morfolojilerinin değişiminden kaynaklı olabileceğinin ispatıdır. Düşük konsantrasyona sahip çözeltiler ile üretilen numuneler en zayıf mavi ışık yanıtı vermişlerdir.

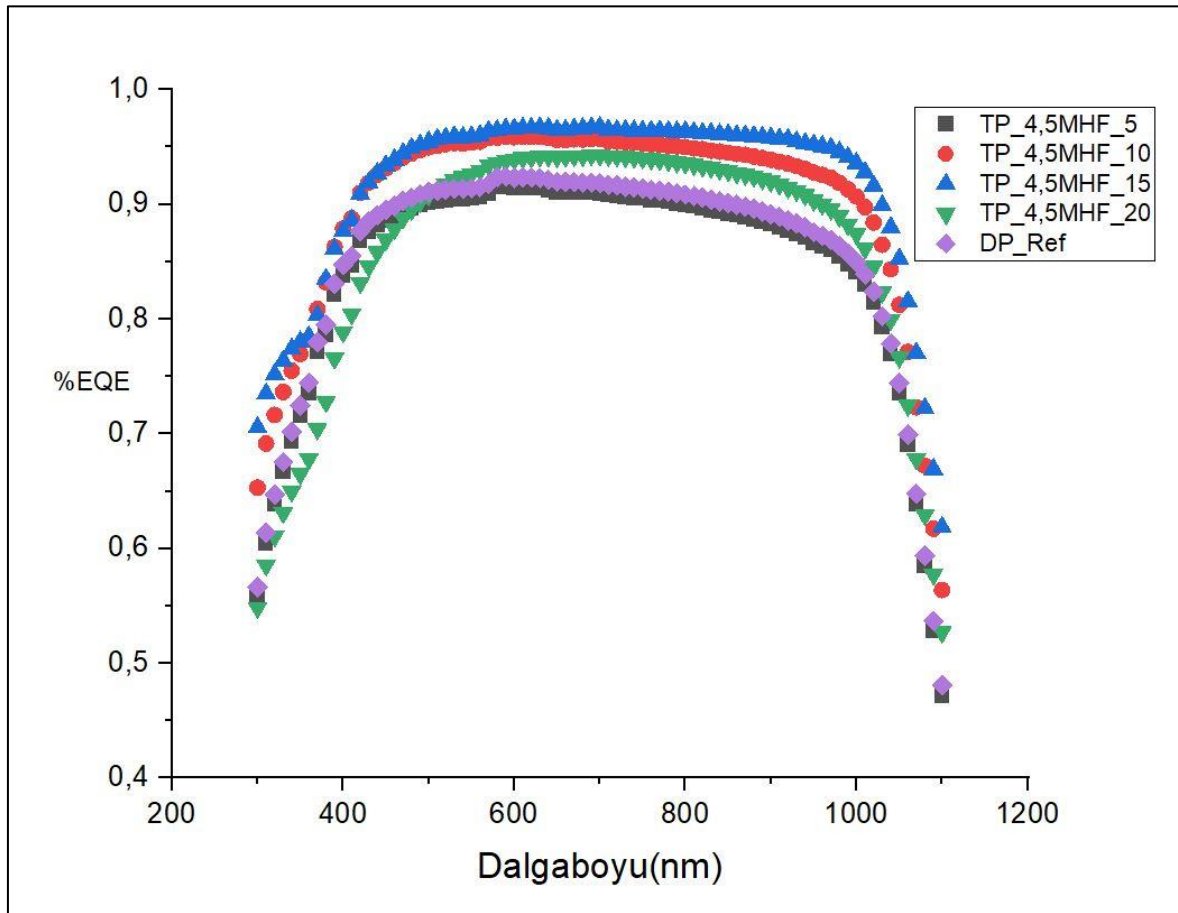
Kuantum verimlilik ölçümlerinde önemli diğer kıstas olan IQE ölçümleri 300-1100 nm arasında yapılmıştır ve Şekil 5.8’de verilmiştir.



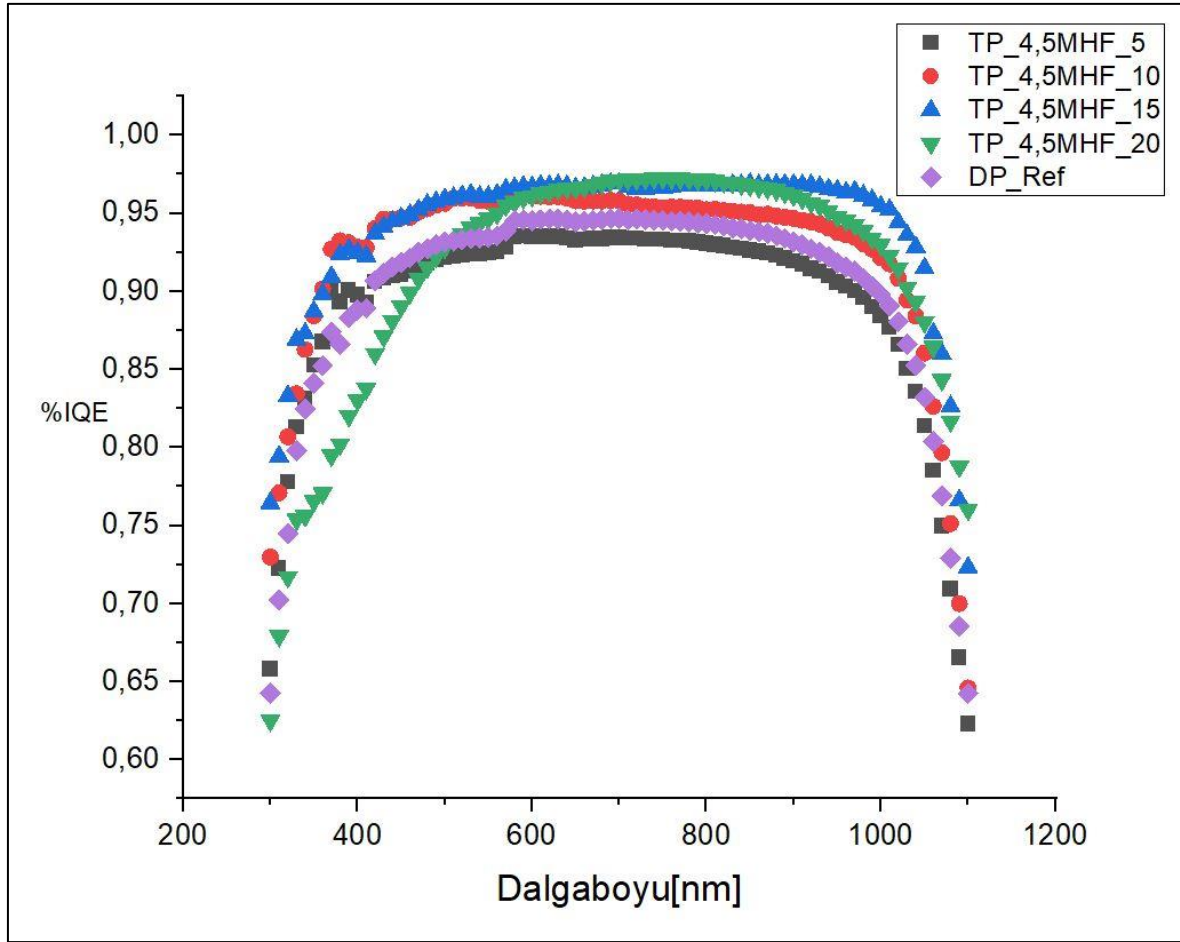
Şekil 5.8. HF konsantrasyonuna bağlı dahili kuantum verimlilik grafiği

Dahili kuantum verimlilik sonuçları incelendiğinde mavi ışık yanıtı HF konsantrasyonuna bağlı çalışılan numunelerden sırasıyla HF konsantrasyonu 0,5 M ve 4,5 M olanlar EQE sonuçları ile paralellik gösterirken, 1,5 M HF konsantrasyon ile elde edilen numune 0,5 M HF ile üretilenden daha zayıf kalmıştır. Kızıl ötesi yanıtında 1,5 M HF numunesi ise daha başarılıdır. Bunun sebebi, 0,5 M HF üretiminde aşındırma miktarının ve piramit derinliğinin 1,5 M HF numunesine göre az olması nedeniyle yüzey alanının daha küçük olması ile iç yansıma oranının fazla olmasından kaynaklandığını göstermektedir.

HF 4,5 M konsantrasyonunda sabitken aşındırma süresine bağlı 300 ile 1100 nm arasında ölçümleri tamamlanan EQE ve IQE sonuçları ise sırasıyla Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'te verilmiştir.



Şekil 5.9. Aşındırma süresine bağlı harici kuantum verimlilik grafiği



Şekil 5.10. Aşındırma süresine bağlı dahili kuantum verimlilik grafiği

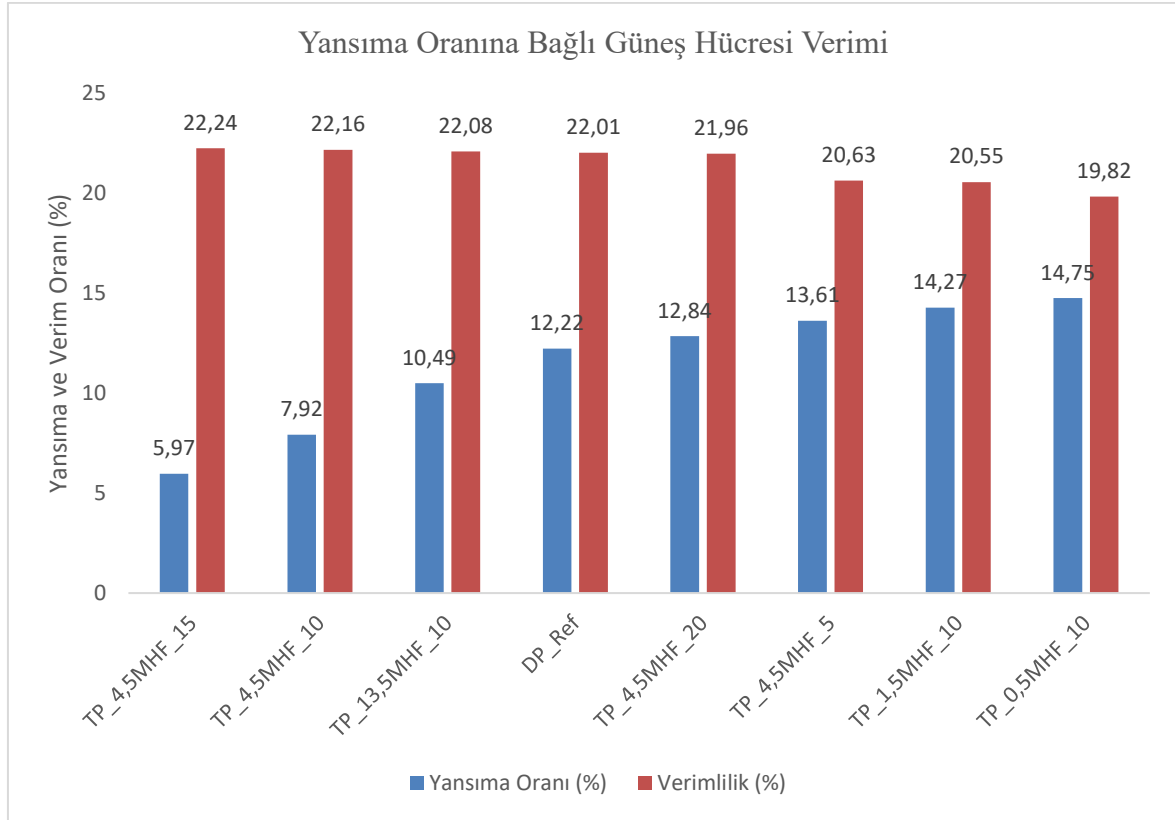
Kuantum verimlilik sonuçları incelendiğinde, dahili ve harici kuantum verimliliğinde 4,5 M HF konsantrasyonunda ve 15 dakika işlem süresinde üretilen numuneler en iyi sonucu hem mavi ışık yanıtında hem de kızılötesi ışık yanıtında vermiştir. Bu sonuca en yakın ve diğer çalışmalarda da en yakın sonucu veren numune 4,5 M HF 10 dakika aşındırma süresine sahiptir. Fakat EQE ve IQE sonuçları paralellik gösteren fakat diğer sonuçlara göre farklı olan 5 dakika ve 20 dakika numuneleridir. Yansıma oranı 20 dakikada aşınan numunenin daha iyi olmasına rağmen kızılötesi ışık yanıtı 5 dakikada aşınan numuneden daha zayıftır. Bunun nedeni ise 20 dakikada üretilen ürünün yüzey yapılandırılmasında oluşan piramitlerin derinliğinin yüksek olması ve yüzeydeki piramitlerin daha düzensiz dağılmasıyla daha fazla yüzey alanına sahip olması ile açıklanabilmektedir. Tez çalışmasında son olarak yapılan karakterizasyon çalışması güneş hücresinin elektriksel parametrelerinin ölçülmesidir. Güneş hücresi çift yüzü olarak üretilmiştir. Tez çalışmasında ışık yakalama oranının artırılarak, ön yüzeydeki akım ve akım yoğunluğunun artırılması ile verimliliği artırmaktadır. Güneş hücresinin I-V ön yüzey ölçüm sonuçları Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6. Güneş hücresinin I-V ön yüzey ölçüm sonuçları

Numune Adı	Verimlilik (%)	Isc (A)	Voc (mV)	FF (%)	Jsc (mA/cm)	Rser (Ohm)	Rshunt (Ohm)
TP_0,5MHF_10	19,82	9,93	640,4	78,54	39,41	0,0047	24,59
TP_1,5MHF_10	20,55	9,97	657,7	78,96	39,58	0,0044	116,34
TP_4,5MHF_10	22,16	10,10	683,5	80,86	40,10	0,0041	874,76
TP_13,5MHF_10	22,08	10,10	682,1	80,79	40,07	0,0040	668,73
TP_4,5MHF_5	20,63	10,00	658,5	78,98	39,67	0,0044	223,51
TP_4,5MHF_15	22,24	10,12	682,1	81,16	40,18	0,0039	765,10
TP_4,5MHF_20	21,96	10,07	678,7	80,97	39,97	0,0040	707,93
DP_Ref	22,01	10,08	675,8	81,47	39,98	0,0037	861,16
Fark DP_Ref vs TP_4,5MHF_15	0,23	0,05	6,26	-0,31	0,19	0,00	-96,07

I-V ölçümleri incelendiğinde 4,5 M HF 15 dakika aşındırma süresine sahip Cu destekli kimyasal aşındırma ile elde edilen ters piramitli yüzey yapısına sahip güneş hücresi, klasik kimyasal aşındırma ile üretilen dik piramitli yüzey yapısına sahip güneş hücresinden net fark olan %0,23 verimlilik kazancı vardır. Verim kazanımına neden olan parametreler incelendiğinde akım ve voltajın önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Akım değerinin artması güneş hücresinin ışık yakalama kabiliyetinin arttığına ve optik özelliklerinin dik piramitli güneş hücresine göre iyileştirme olduğuna işaret etmektedir. Ters piramit yapılarının daha düzenli olması ise yansıma engelleyici kaplama performansının arttığını göstermektedir. Ayrıca rekombinasyon kayıplarının azalması ile 6,26 mV voltaj kazanımı getirmiştir. Doldurma faktöründeki azalma ise ters piramit yapılarının derinliğinin dik piramit yapılarından daha fazla olması nedeniyle difüzyondaki fosfor katkılama oranının dik piramitli güneş hücresine oranla daha az olması ile açıklanmaktadır. Rshunt değerindeki azalma ise üretim esnasındaki kirlilikten kaynaklanmaktadır. PL görüntülerindeki kırmızı alanların yoğunluğu ile ilişkilidir.

Güneş hücresi üretiminde yüzey yansıma oranı ve verimlilik sonuçları şekil 5.11’de verilmiştir.



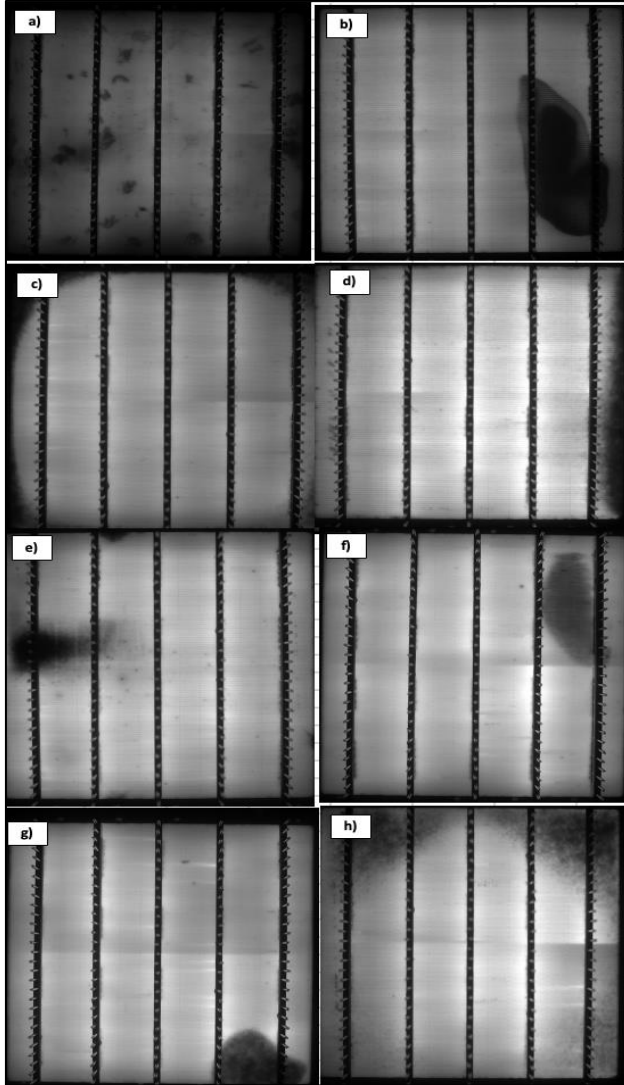
Şekil 5.11. Güneş hücresi verimliliğine göre yansımaya oranı grafiği

Yansımaya oranı sonuçları ile güneş hücresi verimliliği direkt ilişkisi olduğu gösterilmiştir. Yüzey morfolojisinin değişimi ile elde edilen ışık soğurma oranlarının güneş hücresi verimliliğine doğrudan bir etkisi mevcuttur.

Akım ve akım yoğunluğu değerlerinin artışı verimlilik değerinde de doğrudan artışa neden olmaktadır. En yüksek akım, akım yoğunluğuna sahip hücrenin yansımaya oranı kimyasal aşındırma ve kaplama sonrası en düşük oranı veren hücreye sahiptir. Yapılan tüm karakterizasyon çalışmaları ve önceki bölümlerde tartışılan sonuçlar ile paraleldir.

Son olarak güneş hücrelerin elektrolüminesans görüntüleri alınmıştır. Elektrolüminesans (EL) görüntüsü ile hücrenin fiziksel yorumu yapılamamaktadır fakat malzeme yapısı ve elektriksel kayıpları tanımlanabilmektedir. EL görüntüsünde alınan aydınlık görüntüler, güneş hücresinin temiz ve elektriksel olarak iyi olduğunu tanımlarken, karanlık alanlar elektriksel değerlerin kayıplarına neden olabilmektedir. EL görüntüleri Resim 5.7’de verilmiştir. EL görüntüleri incelendiğinde genellikle numunelerin kenar bölgelerinin karanlık olduğunu göstermektedir. Bu durum işlem yapılırken sıvı yüksekliğinin yetersiz

olmasından veya aşınma sonucunda kütle kaybı yaşanan ürünlerin zamanla sıvı içerisinde yükseldiğini göstermektedir. Bu durum en yüksek aşındırma oranına sahip 13,5 M HF konsantrasyonunda 10 dakika ve 4,5 M 20 dakika işlem gören numunede anlaşılmaktadır. Ayrıca, 1,5 M HF ve 4,5 M HF 5 dakika aşındırma süresine sahip güneş hücrelerinin kurutma ve temizleme sürelerinin yetersiz kaldığı gözlenmiştir. Temizliği başarılı olmayan bu iki numune termal proseslerde yüksek sıcaklıklar ile kaplama proseslerinin verimsizliğine neden olabilmektedir. En az konsantrasyona sahip 0,5 M HF güneş hücresi ise en karanlık görüntüye sahiptir, en büyük nedeni kirlenme ve temasın fazlalığıdır. Elektriksel parametreleri incelendiğinde Rshunt değeri 24,59 ile en düşük değere sahiptir.



Resim 5.7. Ters piramit numunelerinin elektrolüminesans görüntüleri (a) 0,5 M HF 10 dakika aşındırma süresi (b) 1,5 M HF 10 dakika aşındırma süresi (c) 4,5 M HF 10 dakika aşındırma süresi (d) 13,5 M HF 10 dakika aşındırma süresi (e) 4,5 M HF 5 dakika aşındırma süresi (f) 4,5 M HF 15 dakika aşındırma süresi (g) 4,5 M HF 20 dakika aşındırma süresi (h) dik piramitli m-Si wafer

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında metal destekli kimyasal aşındırma metodu ile güneş hücresinin optik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Optik özelliklerin iyileştirilmesi için Cu metal olarak kullanılmıştır ve m-Si wafer yüzeyinde ters piramitler oluşumu sağlanarak, güneş ışığının yüzeyden yansımaya oranı azaltılması amaçlanmıştır. Klasik olarak yüzey yapılandırma için kullanılan alkali aşındırma metodu ile dik piramit yüzeye sahip güneş hücresi de üretilerek performansları karşılaştırılmıştır. Ters piramit yüzeye sahip waferlar tek aşamalı $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2/\text{HF}/\text{H}_2\text{O}_2$ çözeltisinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyon ile izotropik aşındırılmıştır. MDKA metodu 50°C 'de gerçekleştirilirken, alkali aşındırma 80°C 'de 12 dakika süresince KOH ve katkı maddesi ile gerçekleşmiştir.

Ters piramitin oluşumunda gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonun aşındırma mekanizması incelenmiştir. Yüzey yapılandırma sonrası yüzey morfolojisi SEM ile tanımlanmıştır. Yüzey morfolojisine bağlı ışık soğurma oran tespiti için aşındırma sonrası ve arka ve ön yüzey yansımaya engelleyici kaplama aşamaları sonrasında yansımaya ölçümü yapılmıştır ve fotoluminesans karakterizasyon teknikleri uygulanmıştır. Güneş hücresi üretiminin tamamlanması sonrasında IQE/EQE, akım-voltaj ölçümü ve elektrolüminesans karakterizasyon teknikleri uygulanmıştır.

Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- HF konsantrasyonuna bağlı aşındırma hızının ilişkisi gözlemlenmiştir. Konsantrasyonun artışı ile aşındırma hızı da artmıştır. HF konsantrasyonun 0,5 M ile 4,5 M arasında doğrusal aşındırma hızı elde edilirken, 4,5 M HF'den sonra aşındırma hızı yavaşlamıştır.
- HF konsantrasyonuna bağlı yüzeyin nano yapılarının değişimi gözlenmiştir. SEM analizi sonucunda 4,5 M HF ile ters piramit yapıları elde edilmiştir.
- HF konsantrasyonuna bağlı yüzey yansımaya oranlarının değişimi gözlenmiştir. 4,5 M HF konsantrasyonu ile elde edilen ters piramit yüzey morfolojisine sahip m-Si waferın 300-1100 nm arasında yüzey yansımaya oranı %7,92 elde edilirken, alkali aşındırma ile dik piramit elde edilen m-Si waferın yüzey yansımaya oranı %12,22 olarak ölçülmüştür.
- HF konsantrasyonu 4,5 M'de sabit tutularak, reaksiyon süre ilişkisi çalışılmıştır. Reaksiyon süresinin yüzey morfolojisinin değişimine etkisi olduğu gözlemlenmiştir. 15

dakika reaksiyon süresinde ters piramit yapılarının derinliği 10 dakika işlem süresine göre 2 μm daha arttığı gözlemlenmiştir.

- HF 4,5 M ve reaksiyon süresi 15 dakikada yüzey yansım oranı %5,97 ile en iyi sonuç alınmıştır.
- Yansım engelleyici SiN_x kaplamasının ters piramite sahip m-Si wafer ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Kaplama sonrası 300-1100 nm arasında 4,5 M HF 15 dakika reaksiyon işlem süresine sahip ters piramitli waferin oranı %2,69 olarak ölçülmüştür.
- Güneş hücresi üretimi sonrası yapılan kuantum verimliliği çalışmalarında EQE/IQE ölçümlerinde ters piramit yapısına sahip ürünler en iyi ışık soğurma oranına sahip olduğu anlaşılmıştır. MDKA yöntemiyle üretilen 0,5 M; 1,5M ve 4,5 M HF işlem süresi 5 ve 20 dakika olan numunelerin kızılötesi ışık yanıtı dik piramit yüzeye sahip güneş hücresinden düşüktür. Yüzey morfolojisinin değişiminin rekombinasyon ile ilişkisi olduğu anlaşılmıştır.
- Güneş hücresinin I-V sonuçlarında, m-Si wafer yüzey yansım oranları ile verim ve akım yoğunluğu sonuçları direkt doğru orantılı elde edilmiştir. En yüksek yüzey yansım oranına sahip (%14,75) 0,5 M HF aşındırma süresi 10 dakika olan güneş hücresi verimliliği %19,82 ölçülmüştür. Ters piramit yüzeye sahip 4,5 M HF aşındırma süresi 15 dakika olan güneş hücresinin verimliliği %22,24 ölçülmüştür ve dik piramit yüzeye sahip güneş hücresinden verimi %0,23 ve akım yoğunluğu 0,19 mA/cm^2 daha yüksektir.
- Kazanılan verim farkının bir güneş hücresindeki güç kazanımı 0,05 watt'tır. 72 adet hücreden oluşan bir modülde güç kazanımı yaklaşık 4 watt olacaktır. Güç kazanımı kaynaklı 2023 Ocak tarihli güneş hücresi satış fiyatı dikkate alındığında 1 adet hücre üretimi 22,02 % ile 0,275 USD/watt iken 22,24% ile 0,272 USD/watt olacaktır.

Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar doğrultusunda ve literatür çalışmaları doğrultusunda yansım oranının ve reaksiyon süresinin daha kısa olabileceği görülmüştür. Reaksiyon süresinin uzun olması nedeniyle reaksiyon süresinin azaltılması için elektronegatifliği silisyuma göre daha fazla olan diatomik sistemlerin Ag/Cu gibi kullanılması ve akım yoğunluğunun artırılması için ters piramit yüzey morfolojisine sahip m-Si waferların SiN_x kaplaması ile ışık soğurma oranlarının ve kızılötesi ışık yanıt bölgelerinin iyileştirilmesi için optimizasyon çalışmaları yapılması önerilmektedir. Ayrıca, yüzey morfolojisi kaynaklı artan seri direncin ve dolum faktörünün iyileştirilmesi için metalizasyon optimizasyonunun gerektiği öngörülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Inamuddin, I., Ahamed, M.I., Boddula, R., and Rezakazemi, M. (2021). *Fundamentals of Solar Cell Design*. Beverly: Scrivener Publishing Wiley, 272-274.
2. Kurtz, S., Atwater, H., Rockett, A., Buonassisi, T., Honsberg, C., and Benner, J. (2016). Solar research not finished. *National Photonics*, 10(3), 141-142.
3. Geisz, J. F., France, R. M., Schulte, K. L., Steiner, M. A., Norman, A. G., Guthrey, H. L., Young, M. R., Song, T., and Moriarty, T. (2020). Six-junction III–V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration. *Nature Energy*, 5(4), 326-335.
4. VDMA. (2022). *International technology roadmap for photovoltaic results (ITRPV)*. Frankfurt, Germany, 7-15.
5. Dross, F., Baert, K., Bearda, T., Deckers, J., Depauw, V., El Daif, O., Gordon, I., Gougam, A., Govaerts, J., Granata, S., Labie, R., Loozen, X., Martini, R., Masolin, A., Sullivan, B.O., Qiu, Y., Vaes, J., Van Gestel, D., Van Hoeymissen, J., Vanleenhove, A., Van Nieuwenhuysen, K., Venkatachalam, S., and Meuris, M. (2012). Crystalline thin-foil silicon solar cells: where crystalline quality meets thin film processing. *Nano Letter*, 12(9), 770-784.
6. Yang, Y.M., Yu, A., Hsu, B., Hsu, W.C., Yang, A., and Lan, C.W. (2015). Development of high-performance multicrystalline silicon for photovoltaic industry. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 23(3), 340-351.
7. Yoshikawa, K., Kawasaki, H., Yoshida, W., Irie, T., Konishi, K., Nakano, K., Uto, T., Adachi, D., Kanematsu, M., Uzu, H., and K. Yamamoto, K. (2017). Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%. *National Energy*, 7(32), 169-176.
8. Wu, J., Liu, Y., Chen, W., Zhao, Y., Chen, Q., and Tang, H. (2020). Influence of different sized inverted-pyramids of silicon texture by Ag manipulation on solar cell performance. *Applied Surface Science*, 506(144), 778.
9. Campbell, P., Wenham, S.R., and Green, M.A. (1993). *Progress in high efficiency silicon cell and module research*. Conference Record of the Twenty Third IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Louisville, 8-13.
10. Tang, Q., Shen, H., Yao, H., Gao, K., Ge, J., and Liu, Y. (2020). Investigation of optical and mechanical performance of inverted pyramid based ultrathin flexible C-si solar cell for potential application on curved surface. *Applied Surface Science*, 506(144), 504.
11. Richter, A., Hermle, M., and Glunz, S.W. (2013). Reassessment of the limiting efficiency for crystalline silicon solar cells. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Journal of Photovoltaics*, 3, 1184.

12. Huang, Z.G., Gao K., and Wang X.G. (2019). Large-area MACE Si nano-inverted pyramids for PERC solar cell application. *Solar Energy*, 188, 300-304.
13. Wang, H.P., Li, A.C., Lin, T.Y., and He, J.H. (2016). Concurrent improvement in optical and electrical characteristics by using inverted pyramidal array structures toward efficient Si heterojunction solar cells. *Nano Energy*, 23, 1-6.
14. Leonardi, A., Faro, A., and Irrera, M.J.L. (2021). A Silicon Nanowires Synthesis by Metal-Assisted Chemical Etching. *Review of Nanomaterials*, 11(2), 383.
15. Łukasiak, L., and Jakubowski, A. (2010). History of Semiconductors. *Journal of Telecom and Information Technologies*, 1, 3-9.
16. Williams, R. (1960). Bequerel photovoltaic effect in binary compounds. *Journal of Chemical Physics*, 32(5), 1505-1514.
17. Akhter, R., and Hoque, A. (2007). Analysis of a PWM boost inverter for solar home application. *World Academy Of Science, Engineering and Technology*, 4(1), 39-45.
18. Wolf, M. (1960). Limitations and possibilities for improvement of photovoltaic solar energy converters: Part I: considerations for earth's surface operation. *Proceedings of Institute of Electrical and Electronical Engineers*, 48(7), 583-595.
19. Adud, A. (2011). *Advance temperature modeling of solar PV*, Master Thesis, Concordia University Electrical and Computer Engineering, Canada, 13-14.
20. Lindholm, F.A., Fossum, J.G., and Burgess, E.L. (1979). Application of the superposition principle to solar-cell analysis. *Institute of Electrical and Electronical Engineers Transactions on Electron Devices*, 26, 165-171.
21. Morales Aragonés, J.I., Alonso García, M.C., Gallardo Saavedra, S., Alonso Gómez, V., Balenzategui, J.L., Redondo Plaza, A., and Hernández Callejo, L. (2021). Online distributed measurement of dark I–V curves in photovoltaic plants. *Applied Sciences*, 11(4), 12-14.
22. IEC. (2008). Photovoltaic devices Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data. *International Electrotechnical Commission*, 2, 30-32.
23. Gray, J. L. (2011). *Handbook of photovoltaic science and engineering* (2nd edition). New York: John Wiley & Sons, 131-137.
24. Seidel H. (1990). Anisotropic Etching of crystalline silicon in alkaline solutions: orientation dependence and behavior of passivation Layers. *Journal of Electrochemical Society*, 137(11), 4-16.
25. Baker Finch, S.C., and McIntosh, K.R. (2013). Reflection distributions of textured monocrystalline silicon: implications for silicon solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(5), 960-971.

26. Burrows, M.Z., Meisel, A., Scardera, G., Lemmi, F., and H. Antoniadis, H. (2012). *Front metal and diffusion optimization for selective emitter*. Sunnyvale, USA: Photovoltaic Specialists Conference, 6(2), 38-41.
27. Cuevas, A., and Balbuena, M. (1988). *Thick-emitter silicon solar cells*. Photovoltaic Specialists Conference, Madrid, 429-434.
28. Williams, K. R., and Muller, R. S. (1996). Etch rates for micromachining processing. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 5(4), 256-269.
29. Lippold, M., Buchholz, F., Gondek, C., Honeit, F., Wefringhaus, E., and Kroke, E. (2014). Texturing of SiC-slurry and diamond wire sawn silicon wafers by HF–HNO₃–H₂SO₄ mixtures. *Solar Energy Material Solar Cells*, 127, 104-110.
30. Bouhafs, D., Moussi, A., Chikouche, A., and Ruiz, J.M. (1998). Design and simulation of antireflection coating systems for optoelectronic devices: Application to silicon solar cells. *Solar Energy Material Solar Cells*, 52(1), 79-93.
31. Swatowska, B.A., Stapinski, T.O., Drabczyk, K.A., and Panek, P.I. (2011). The role of antireflective coatings in silicon solar cells – the influence on their electrical parameters. *Optical Applications*, 16(2), 487-492.
32. Spinelli, P., Verschuuren, M.A., and Polman, A. (2012). Broadband omnidirectional antireflection coating based on subwavelength surface Mie resonators. *National Community*, 3, 692.
33. Schroder, D.K., and Meier, D.L. (1984). Solar cell contact resistance - A review. *Institute of Electrical and Electronical Engineers Transitions of Electron Devices*, 31(5), 637-647.
34. Reeves, G.K., and Harrison, H.B. (1982). Obtaining the specific contact resistance from transmission line model measurements. *Institute of Electrical and Electronical Engineers Electron Device Letter*, 3(5), 111-113.
35. Fong, K.C., Kho, T.C., Fell, A., Franklin, E., Zin, N., Blakers, A.W., McIntosh, K.R., Ratcliff, T., Stocks, M., Bullock, J., and E. Wang, E. (2015). Contact resistivity of evaporated al contacts for silicon solar cells. *Institute of Electrical and Electronical Engineers Journal of Photovoltaics*, 5(5), 1304-1309.
36. Preu, R., Lohmeuller, E., Lohmeuller, S., Saint-Cast, P., and Greulich, J. M. (2020). Passivated emitter and rear cell. *Devices, technology, and modeling of Applied Physics Reviews*, 7(4), 15.
37. Battaglia, C., Cuevas, A., and De Wolf, S. (2016). High-efficiency crystalline silicon solar cells: status and perspectives. *Energy Environmental Science*, 9, 1552-1576.
38. Schneiderlechner, E., Preu, R., Leudemann, R., and Glunz, S. W. (2002). Laser-fired rear contacts for crystalline silicon solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 10(1), 29-34.

39. Blakers, A.W., Zhao, J., Milne, A.M., Wang, A., and X. Dai, X. (1990). Characterization of 23 -percent efficient silicon solar. *Institute of Electrical and Electronical Engineers Transitions of Electron Devices*, 37(2), 331-336.
40. VDMA (2020). *International technology roadmap for photovoltaic results. ITRPV* Frankfurt, 8-20.
41. Blakers, A.W. (2019). Development of the PERC solar cell. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9(3), 629-635.
42. Blakers, A.W., Zhao, J., Milne, A.M., Wang, A., and Dai, X. (1990). Characterization of 23 percent efficient silicon solar. *Institute of Electrical and Electronical Engineers Transition of Electron Devices*, 37(2), 331-336.
43. Uruena, A., Tous, L., Duerinckx, F., Kuzma Filipek, I., Cornagliotti, E., John, J., Mertens, R., and Poortmans, J. (2013). Understanding the mechanisms of rear reflectance losses in PERC type silicon solar cells. *Energy Procedia*, 38, 801-806.
44. Gangopadhyay, U., Kim, K., Dhungel, S.K., Basu, P.K., and Yi, J. (2006). Low cost texturization of large area crystalline silicon solar cells using hydrazine monohydrate for industrial use. *Renewable Energy*, 31, 1906-1915.
45. Kranz, C., Wyczanowski, S., Baumann, U., Dorn, S., Queisser, S., Schweckendiek, J., Pysch, D., and Dullweber, T. (2014). Industrial cleaning sequences for Al₂O₃-passivated PERC solar cells. *Energy Procedia*, 55(1), 211-218.
46. Cornagliotti, E. (2015). *Study on the impact of rear side polishing in perc solar cells*. 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 561-566.
47. Sundaran, K.B., Vijayakumar, A., and Subramanian, G. (2005). Smooth etching of silicon using TMAH and Isopropyl alcohol for MEMS applications. *Microelectronics Engineering Journal*, 77, 230-241.
48. Boukortt, N., Patane`, S., and Hadri, B. (2019). Development of high-efficiency PERC solar cells using Atlas Silvaco. *Silicon*, 11(1), 145-152.
49. Nayak, B.K., Iyengar, V.V., and Gupta, M.C. (2011). Efficient light trapping in silicon solar cells by ultrafast-laser-induced self-assembled micro / nano structures. *Program of Photovoltaics Research Application*, 5(4), 631-639.
50. Wang, K.X., Yu, Z., Liu, V., Cui, Y., and Fan, S. (2012). Absorption enhancement in ultrathin crystalline silicon solar cells with antireflection and light-trapping nanocone gratings. *Nano Letter*, 12 (9), 1616.
51. Dimova Malinovska, D., Sendova Vassileva, M., Tzenov, N., and Kamenova, M. (1997). Preparation of thin porous silicon layers by stain etching. *Thin Solid Films*, 9, 297.

52. Li, X., and Bohn, P.W. (2000). Metal-assisted chemical etching in HF/H₂O₂ produced porous silicon. *Applied Physics Letter*, 77, 2572.
53. Harada, Y., Li, X., and Bohn, P.W. (2001). Catalytic amplification of soft lithographic patterning of Si. Nanoelectrochemical orthogonal fabrication of photoluminescent porous Si pixel arrays. *Chemical Society*, 123(36), 17.
54. Branz, H.M., Yost, V.E., Ward, S., Jones, K.M., To, B., and Stradins, P. (2009). Nanostructured black silicon and the optical reflectance of graded-density surfaces. *Applied Physics Letter*, 94, 231.
55. Oh, J., Yuan, H.C., and Branz, H.M. (2012). An 18.2%-efficient black-silicon solar cell achieved through control of carrier recombination in nanostructures. *National Nanotechnology*, 7, 743.
56. Blakers, A. W., Wang, A., Milne, A. M., Zhao, J., and Green, M. A. (1989). 22.8% efficient silicon solar cell. *Applied Physics Letters*, 55(13), 1363-1365.
57. Engelhart, P., Hermann, S., and Neubert, T. (2007). Laser ablation of SiO₂ for locally contacted Si solar cells with ultra-short pulses. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 15(6), 521-527.
58. Xiao, S., and Shuyan, X. (2014). High efficiency silicon solar cells-materials and devices physics. *Critical Reviews In Solid State and Material Sciences*, 39(4), 277-317.
59. Ossenbrink, H., Jager-Waldau, A., and Helm, P. (2011). *21,7% Efficient PERC solar cells with a.o.* 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 1115-1119.
60. Birmann, K., Zimmer, M., Rentsch, J. (2008). *Fast alkaline etching of monocrystalline wafers in KOH/CHX.* 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, 1608-1611.
61. Dullweber, T., Kranz, C., Peibst, R., Baumann, U., Hannebauer, H., and Feulle, A. (2015). *The PERC cell: A 21% efficient industrial bifacial PERC solar cell.* 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 341-350.
62. Chunduri, S.K., and Schmela, M. (2019). High efficiency cell technologies. *Edition Taiyang News*, 5(4), 14-23.
63. Zhang, C., Shen, H., Sun, L., Yang, J., Wu, S., and Lu, Z. (2020). Bifacial P-type PERC solar cell with efficiency over 22% using laser doped selective emitter. *Energies Journal*, 13(6), 1388.
64. Gu, H., Guan, Z., and Liu, Y. (2020). Large-scale preparation of 22.06% efficiency single-crystalline silicon solar cells with inverted pyramid microstructure through nanostructure rebuilding treatment. *Materials Research Express*, 7(9), 96-103.

65. Gao, K., Liu, Y., Fan, Y., Shi, L., Zhuang, Y., Cui, Y., Yuan, S., Wan, Y., Shen, W., and Huang, Z. (2020). High-efficiency silicon inverted pyramid-based passivated emitter and rear cells. *Nanoscale Research Letters*, 15(1), 79-83.
66. Huang, Z.G., Gao, K., Wang, X. G., Xu, C., Song, X. M., Shi, L. X., Zhang, Y., Hoex, B., and Shen, W. Z. (2019). Large-area mace si nano-inverted-pyramids for Perc Solar Cell Application. *Solar Energy*, 188, 300-304.
67. Zhang, C., Chen, L., Zhu, Y., and Guan, Z. (2018). Fabrication of 20,19% efficient single-crystalline silicon solar cell with inverted pyramid microstructure. *Nanoscale Research Letters*, 13(1), 33-37.
68. Peng, K.Q., Yan, Y.J., Gao, S.P., and Zhu, J. (2002). Synthesis of large-area silicon nanowire arrays via self-assembling nanoelectrochemistry. *Advance Material*, 14, 1164-1167.
69. Pu, T., Shen, H., Hong Neoh, K., Gao, K., and Ye, F. (2021). High-efficiency passivated emitter and rear cells with nano honeycomb structure. *Solar Energy*, 224, 916-922.
70. Wu, J., Liu, Y., Chen, W., Zhao, Y., Chen, Q., Tang, H., Wang, Y., and Du, X. (2019). Influence of different-sized inverted-pyramids of silicon texture by Ag manipulation on solar cell performance. *Applied Surface Science*, 6(4), 13-15.
71. Zhang, D., Wang, L., Jia, R., Tao, K., Jiang, S., Ge, H., Wang, B., Gao, Z., Li, X., Li, M., and Jin, Z. (2022). Improving the performance of PERC silicon solar cells by optimizing the surface inverted pyramid structure on large-area mono-crystalline silicon wafers. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 54(3), 138.
72. Zhao, Y., Liu, Y., Chen, W., Wu, J., Chen, Q., Tang, H., Wang, Y., and Du, X. (2020). Regulation of surface texturization through copper-assisted chemical etching for Silicon Solar Cells. *Solar Energy*, 201, 461-468.
73. Tang, H., Liu, Y., Chen, Q., Wang, Y., Chen, W., Wu, J., Zhao, Y., and Du, X. (2019). Optical design of inverted pyramid textured perc solar cells. *Applied Electronic Materials*, 1(12), 172.
74. Wang, Y., Liu, Y., Yang, L., Chen, W., Du X., and Kuznetsov, A. (2016). Recent Progress of Black Silicon: From Fabrications to Applications. *Nanoscale*, 11(1), 54-55.
75. Hesketh, P. J., Ju, C., Gowda, S., Zanoria, E., and Danyluk, S. (1993). Surface free energy model of silicon anisotropic etching. *Journal of The Electrochemical Society*, 140(4), 1080-1085.
76. Nahak, B.K., Iyengar, V.V., and Gupta, M.C. (2011). Efficient light trapping in silicon solar cells by ultrafast-laser-induced self-assembled micro / nano structures. *Program of Photovoltaics Research Application*, 1(1), 631-639.

77. Li, Y., Li, Z., Zhao, Y., and Lennon, A. (2012) Modelling of light trapping in acidic-textured multicrystalline silicon Wafers. *International Journals of Photoenergy*, 4(2), 1-8.
78. Yang, L., Liu, Y., Wang, Y., Li, X., Chen, W., Hua, Y., Zhang, Q., Fu, J., Liang, H., Mei, Z., and Du, X. (2014). Optimization of silicon pyramidal emitter by self-selective Ag-assisted chemical etching. *Research Advance*, 4, 244.
79. Huang, Z., Geyer, N., Werner, P., de Boor, J., Gisele, U. (2011). Metal-assisted chemical etching of silicon: a review: in memory of Prof. Ulrich Gösele. *Advance Material*, 23, 285.



Gazili olmak ayrıcalıktır...