



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

NANO – DESENLENDİRİLMİŞ YÜKSEK VERİMLİ SİLİSYUM
HETEROEKLEM GÜNEŞ HÜCRELERİ

EMRE KARTAL

Haziran 2019

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

NANO – DESENLENDİRİLMİŞ YÜKSEK VERİMLİ SİLİSYUM HETEROEKLEM
GÜNEŞ HÜCRELERİ

EMRE KARTAL

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Dr. Öğretim Üyesi Ayşe SEYHAN SÜRMEGÖZLÜER

Haziran 2019

Emre KARTAL tarafından Dr. Öğr. Üyesi Ayşe SEYHAN SÜRMEGÖZLÜER danışmanlığında hazırlanan “Nano-Desenlendirilmiş Yüksek Verimli Silisyum Heteroeklem Güneş Hücreleri” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Başkan: Dr. Öğr. Üyesi Selmin ENER RÜŞEN, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi



Üye : Dr. Öğretim Üyesi Ayşe SEYHAN SÜRMEGÖZLÜER, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi



Üye : Doç. Dr. Recep ZAN, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından .../.../20... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun .../.../20... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR V.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içerisindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Emre KARTAL



ÖZET

NANO – DESENLENDİRİLMİŞ YÜKSEK VERİMLİ SİLİSYUM HETEROEKLEM GÜNEŞ HÜCRELERİ

KARTAL, Emre

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Dr. Öğretim Üyesi Ayşe SEYHAN SÜRMEGÖZLÜER

Haziran 2019, 94 sayfa

Güneş hücresi teknolojileri güneş hücresinin maliyetini en aza indirmek ve verimliliğini teorik hesaplanan değere çıkarmak en temel çalışma konuları arasında yer almaktadır. Tez kapsamında, standart yüzey desenlendirme ve nano boyutta desenlendirilmiş katkılanmamış ince tabanlı heteroeklem (HIT) güneş hücreleri üretilmiş, karakterizasyonu yapılmış ve optimize edilmiştir. Standart yüzey desenlendirme (rastgele piramit yapı) alkalın aşındırma yöntemiyle, Si nano yapılar metal destekli kimyasal aşındırma yöntemiyle (MacEtch), güneş hücreleri plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD) ve fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemleri kullanılarak üretilmiştir. Bu çalışmada, amorf silisyum (a-Si) alttaş üzerinde standart yüzey temizleme işlemleri uygulanmış ve daha sonra kimyasal aşındırma yöntemleri kullanılarak alttaş yüzeyinin nano desenlendirmesi yapılmıştır. Si nano yapıların oluşturulmasında çözelti konsantrasyonu, aşındırma süresi, sıcaklık, bekleme süresi, Si nano yapıların kalınlığı, uzunluğu ve yoğunluğu gibi parametrelerin etkisi incelenmiştir. Daha sonra yüzeyi nano desenlendirilmiş HIT güneş hücresi üretilerek nano desenlendirmenin enerji dönüşüm verimliliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. HIT güneş hücrelerinin fotovoltajik parametreleri incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Güneş hücresi, HIT güneş hücresi, standart yüzey desenlendirme, nano desenlendirme, PECVD, PVD, fotovoltajik parametreler

SUMMARY

HIGH EFFICIENCY SILICON HETEROJUNCTION SOLAR CELL ENHANCED WITH NANO - TEXTURING

KARTAL, Emre

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor : Assistant Prof. Ayşe SEYHAN SÜRMEGÖZLÜER

June 2019, 94 Pages

Solar cell technologies are one of the most fundamental areas of operation to minimize the cost of solar cells and increase their efficiency to theoretically calculated value, maximum solar cell efficiency. In this thesis, standard surface texture and undoped thin-layer hetero-junction (HIT) solar cells that were texturing in nanoscale were produced, characterized and optimized. Nanostructures chemical etching (metal-assisted electrode-free chemical etching) method was applied by using plasma enhanced chemical vapor coating (PECVD) and physical vapor deposition (PVD) methods for solar cells. In the present study, the standard cleaning procedures were applied to the a-Si slice after that chemical treatment was applied for investigated nano structure on solar cell. The effect of parameters such as solution, concentration, etching time, temperature, standby time, thickness, length and density of nanostructures on forming nanostructures were investigated. Then, the effect of nano structure on energy conversion efficiency was investigated by producing a nanoscale HIT solar cell. The photovoltaic parameters of HIT solar cells were investigated.

Keywords: Solar cell, HIT solar cell, standard surface texturing, nano patterning, PECVD, PVD, photovoltaic parameters.

ÖN SÖZ

Enerjide çoğunlukla fosil yakıtlara bağımlılığımız, fosil yakıt fiyatlarının artmasına bu durumum da elektrik fiyatlarının yükselmesine neden olmaktadır. Bu sorunlara bulunan en etkili çözüm yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Tüm yenilenebilir enerji kaynakları arasında, güneş enerjisi mevcut ve gelecekteki enerji sorunlarını çözmek için sürdürülebilir büyük bir potansiyele sahiptir. Buna rağmen güneş hücrelerinin güç üretme maliyeti, depolama ile beraber düşünüldüğünde diğer güç üretme teknolojilerinden (kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar) daha yüksektir. Bu yüzden daha verimli ve/veya düşük maliyetli güneş hücresi üretimine ihtiyaç vardır. Yüksek verimli ve düşük maliyetli üretilbildiği için HIT güneş hücreleri en çok umut vadeden güneş hücresi yapılarından birisidir. HIT güneş hücrelerinden daha yüksek verim elde etmek için yapılan çalışmalardan birisi de yüzey desenlendirmedir. Yüzey desenlendirmesi ile güneş hücresi daha fazla foton soğuracağından verimlilik artışına sebep olmaktadır. Bu tez çalışmasında HIT güneş hücrelerinin verimliliğinin artırılması çalışmaları nano yüzey desenlendirmesi ile yapılmıştır. Bununla birlikte enerji konusu ulusal düzeyde öncelikli bir alana sahip olup, bu alanda yapılacak çalışmalar bir yandan enerji sorununun çözümüne, öte yandan da yüksek teknoloji ürünlerin geliştirilmesi alanında ülkemizin hedeflerine ulaşmasına katkı sağlayacaktır.

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, Sayın Dr. Öğretim Üyesi Ayşe SEYHAN SÜRMEGÖZLÜER'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans tez çalışmam esnasında tecrübelerine başvurduğum Doç. Dr. Recep ZAN'a, Dr. Öğretim Üyesi Filiz KELEŞ'e, Dr. Öğretim Üyesi Yavuz ATASOY'a ve Dr. Öğretim Üyesi Mehmet Ali OLĞAR'a ve bu tezin hazırlanması esnasında yardımlarına başvurduğum kıymetli arkadaşlarım Ar. Gör. Tolga ALTAN'a, Ali ALTUNTEPE'ye ve Ömer Can ECER'e müteşekkir olduğumu ifade etmek isterim. Bu tezi, sadece bu çalışmam boyunca değil, tüm öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi koruyuculuğumu üstlenen babam Mehmet KARTAL'a, annem Emine KARTAL'a, ablam Melike ARSLANBOĞA ve eniştem Turhan ARSLANBOĞA'ya ithaf

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
SUMMARY.....	v
ÖN SÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
FOTOĞRAFLAR V.B. MALZEMELER DİZİNİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
BÖLÜM I GİRİŞ.....	1
1.1 Giriş (Güneş Enerjisi).....	1
1.2 Türkiye’de Güneş Enerjisinin Durumu.....	1
1.3 Güneş Hücreleri.....	4
1.3.1 Güneş Hücrelerinin Tarihçesi.....	4
1.3.2 Güneş hücre teknolojileri.....	6
1.3.3 Güneş hücrelerinin çalışma prensibi.....	7
1.3.3.1 Yarı iletken malzemeler ve özellikleri.....	9
1.3.3.2 Yarı iletkenlerinde n-tipi ve p-tipi yarı iletkenlerin katkılanması ve p-n eklemının oluşumu.....	10
1.4 Güneş Hücresi Parametreleri.....	13
1.4.1 I-V eğrisi.....	13
1.4.2 Kısa devre akımı (Isc).....	14
1.4.3 Açık devre gerilimi (Voc).....	15
1.4.4 Dolum faktörü (FF).....	15
1.4.5 Verim (η).....	16
1.5 Motivasyon ve Amaç.....	16
1.6 Tez İçeriği.....	17
BÖLÜM II a-Si:H/c-Si HETEROEKLEM GÜNEŞ HÜCRELERİ.....	18
2.1 Amorf Silisyum (a-Si) ve Kristal Silisyum (c-Si) Yapılar (Heteroeklem Yapı).....	18
2.2 HIT Güneş Hücrelerin Tarihsel Gelişimi.....	18
2.3 HIT Güneş Hücrelerinin Üretim Basamakları.....	20

2.3.1 Standart yüzey desenlendirme işlemi (Rastgele piramit yapı)	21
2.3.2 Yüzey temizliği	22
2.3.3 Katkısız (i) ve katkılı (n)-(p) a-Si:H tabakalarının kaplanması.....	23
2.3.3.1 Katkısız (i)a-Si:H tabakasının kaplanması.....	23
2.3.3.2 Katkılı (n)-(p) a-Si:H tabakasının kaplanması	24
2.3.4 TCO (Transparent conductive oxide / Saydam iletken oksit) tabakalarının kaplanması.....	25
2.3.5 Arka ve ön yüzey metalizasyon işlemi.....	25
2.3.6 Fırınlama	26
2.4 Heteroeklem Güneş Hücrelerinde Teknik Kayıplar	26
2.4.1 Yansıma kayıpları	27
2.4.2 Tutulamayan fotonlar nedeniyle oluşan kayıplar	29
2.4.3 Gölgeleme (Alan) kayıpları.....	30
2.4.4 Direnç kayıpları.....	30
2.4.5 Rekombinasyon kayıpları.....	30
BÖLÜM III YÜZEY DESENLENDİRMESİ	35
3.1 Yüzey Desenlendirmeye Giriş	35
3.2 Yüzey Desenlendirme Kullanılan Üretim Yöntemleri	37
3.2.1 Aşağıdan-yukarı (Bottom-Up) katkılama yöntemleri	37
3.2.1.1 Buhar-Sıvı-Katı (Vapor-Liquid-Solid (VLS)) katkılama yöntemi.....	38
3.2.1.2 Termal buharlaştırma ile katkılama yöntemi	39
3.2.1.3 Moleküler demet epitaksi (MBE) katkılama yöntemi	39
3.2.1.4 Lazer ile uzaklaştırma yöntemi	40
3.2.1.5 Solüsyon-Sıvı-Katı (Solution-Liquid-Solid (SLS)) katkılama yöntemi	41
3.2.2 Yukardan-aşağıya (top-down) aşındırma yöntemleri.....	41
3.2.2.1 Testere kalıntılarının aşındırılması (Saw damage etching)	42
3.2.2.2 Reaktif iyon aşındırma yöntemi (RIE) (Plazma yöntemi)	43
3.2.2.3 Alkalın aşındırma yöntemi (Rastgele piramit yöntemi).....	44
3.2.2.4 Metal destekli kimyasal aşındırma yöntemi (MacEtch) (Elektriksiz aşındırma yöntemi (EE))	46
BÖLÜM IV DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇ	57
4.1 NÖHÜNAM’da Standart Yüzey Desenlendirme (Rastgele Primit Yapı) ve Islak Kimyasal Yüzey Temizliği.....	57

4.1.1 Taşıyıcı Yaşam Süresi Ölçümü	58
4.1.2 Güneş Simülatörü	59
4.1.3 Fotolüminesans (PL) ve Elektrolüminesans (EL)	62
4.2 Metal Destekli Kimyasal Aşındırma (MacEtch) Yöntemiyle Nano Yüzey Desenlendirme	63
4.2.1 Metal destekli kimyasal aşındırma parametrelerinin belirlenmesi	65
4.2.1.1 Çözelti konsantrasyonu	65
4.2.1.2 Zaman	66
4.2.1.3 Sıcaklık	68
4.3 NÖHÜNAM Nano Desenlendirilmiş HIT Güneş Hücresi Üretimi	70
4.3.1 Standart yüzey desenlendirme işlemi ve ıslak kimyasal yüzey temizliği	71
4.3.2 PECVD sisteminde a-Si:H tabakalarının kaplanması	72
4.3.3 TCO tabakalarının PVD sistemi ile kaplanması	74
4.3.4 Arka yüzey metalizasyonunun PVD sistemi ile kaplanması	74
4.3.5 Ön yüzey metalizasyon işlemi	75
4.4. Sonuç	77
KAYNAKLAR	80
ÖZ GEÇMİŞ	93
TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER	94

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. GEPA'ya göre, Türkiye yıllık-günlük global radyasyon değerleri ve Türkiye yıllık-saat güneşlenme süre değerleri (YEGM, 2018)	2
Çizelge 1.2. Türkiye'de bulunan bölgelerin güneş enerjisi alma potansiyeli dağılımı	3
Çizelge 1.3. Bazı yarı iletken malzemelerin yasak enerji bant aralıkları	10
Çizelge 2.1. RCA-1, RCA-2, HF ve Pirana temizliğinde kullanılan kimyasal solüsyonlar, miktarları ve etkisi (van Sark vd., 2012)	23
Çizelge 3.1. Yüzey desenlendirmede kullanılan yöntemler	37
Çizelge 3.2. Farklı aşındırma parametreleri kullanılarak MacEtch yöntemiyle üretilen Si nano yapıların aşındırma parametreleri ve yüzey morfolojisinin açıklanması	55
Çizelge 4.1. Standart yüzeyi desenlendirilmiş n-tipi c-Si alttaş için azınlık akım taşıyıcı yaşam süresi analizi sonuçları.....	59
Çizelge 4.2. Güneş aydınlatması (1000 W/m^2) altında elde edilen 1.657 ms yaşam süresi ile üretilen HIT güneş hücresi için güneş simülatörü verileri	60
Çizelge 4.3. Güneş aydınlatması (1000 W/m^2) altında elde edilen 1.619 ms yaşam süresi ile üretilen HIT güneş hücresi için güneş simülatörü verileri	61
Çizelge 4.4. Standart yüzey desenlendirilmiş alttaş ile yüzeyi standart desenlendirilmiş alttaş üzerine uygulanan MacEtch yöntemiyle üretilen nano yapıların azınlık akım taşıyıcı yaşam süresi analizi sonuçları.....	70
Çizelge 4.5. 13,56 MHz frekans RF güç kaynağı ile kaplanan a-Si:H tabakaları için belirlenen değerler altında kaplama koşulları.....	72
Çizelge 4.6. PVD yöntemi ile gerçekleştirilen ITO kaplama koşulları	74
Çizelge 4.7. PVD yöntemi ile gerçekleştirilen Ag kaplama koşulları	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. GEPA Türkiye global radyasyon değerleri ve güneşlenme süreleri (YEGM, 2018)	3
Şekil 1.2. UV ışığının metal yüzeyinden elektronları koparması fotoelektrik etki (solda) ile güneş hücresindeki fotovoltaik etkinin (sağda) karşılaştırılması (Nelson, 2003)	5
Şekil 1.3. Güneş hücre teknolojilerinin sınıflandırması	6
Şekil 1.4. Güneş hücreleri maksimum verimlilik değerleri (NREL, 2019)	8
Şekil 1.5. Güneş hücresinin şematik gösterimi	7
Şekil 1.6. İletken, yarı iletken ve yalıtkan maddelerin bant aralığı ve uyarılma enerjileri	10
Şekil 1.7. n-tipi katkılanmış kristal (Mertens, 2018)	11
Şekil 1.8. p-tipi katkılanmış kristal (Mertens, 2018)	12
Şekil 1.9. p-n eklemine şematik gösterimi (Mertens, 2018)	12
Şekil 1.10. Güneş hücresi devresi	13
Şekil 1.11. Güneş hücresinin kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}), maksimum güç noktaları (V_{MP} , I_{MP}) olarak gösterilmiştir	14
Şekil 1.12. Kısa devre akım (I_{sc}) grafiği	14
Şekil 1.13. Açık devre gerilimi (V_{oc}) grafiği	15
Şekil 1.14. I-V eğrisinden doldurma faktörü	16
Şekil 2.1. HIT güneş hücresi yıllara göre verim değerleri (NREL, 2019)	19
Şekil 2.2. Silisyum alttaş yüzeyinin rastgele piramit yapısının SEM görüntüsü (Muñoz vd., 2009)	22
Şekil 2.3. c-Si güneş hücresindeki kayıplar	27
Şekil 2.4. Düz Si yüzeyine ve desenlendirilmiş Si yüzeyine düşürülen fotonların yansımaları	28
Şekil 2.5. Yüzeyin yansımalarını azaltmak için kullanılan yansımaya önleyici kaplama (Green, 1998)	28
Şekil 2.6. Optik yol uzunluğunu artırmak için güneş hücresinde fotonun tutulması	29
Şekil 2.7. Işınım rekombinasyonunun enerji bandı diyagramı	31
Şekil 2.8. Auger rekombinasyonunun enerji bandı diyagramı	32

Şekil 2.9. SRH rekombinasyonunun enerji bandı diyagramı.....	32
Şekil 2.10. Si yüzeyinde rekombinasyon kaybı şematik gösterimi	33
Şekil 2.11. Kimyasal pasifleştirilmiş Si yüzeyinin şeması	33
Şekil 2.12. (a) n-tip Si üzerinde pozitif yüklü bir dielektrik ve (b) p-tip Si üzerinde negatif yüklü bir dielektrik için bant diyagramlarının şeması	34
Şekil 3.1. (a) Yüzeyde Auger rekombinasyonuna yol açan ve uzun difüzyon yoluna sahip olan geleneksel Si alttaş, (b) Nano yapıları c-Si alttaş, geniş dalga boyu bölgesinde kısa difüzyon uzunluğu ve arttırılmış ışık emilimine sahiptir	36
Şekil 3.2. Si nanotel büyüme sürecinin şeması, (a) Si alttaş üzerine PVD ile Au ince film kaplanması, (b) Au-Si damlacıklarının ısı ile elde edilmesi ve (c) Si nanotellerin SiH ₄ ve H ₂ buhar fazlarının reaksiyona girerek büyümesi	38
Şekil 3.3. Termal buharlaşma yöntemi kullanılarak oluşan nanotellerin SEM görüntüleri	39
Şekil 3.4. MBE ile üretilen nano yapıların SEM görüntüleri: üstten görünüm (solda) ve yatay görünüm (sağda) (Naumova vd., 2008)	40
Şekil 3.5. Lazer uzaklaştırma yöntemi kullanılarak üretilen nano yapıların SEM görüntüleri: (a) aşındırma işleminden sonra oluşan doku; (b) NaOH asidinden sonra oluşan doku; (c) asit işleminden sonra oluşan doku; (d) oluşan dokunun kesiti (Abbott ve Cotter, 2006).....	40
Şekil 3.6. SLS yöntemi ile üretilmiş nano yapıların SEM görüntüleri (Heitsch vd., 2008).....	41
Şekil 3.7. Teste kalıntılarının Si dilim üzerindeki hasarın SEM görüntüleri: testere kalıntısından aşındırılmamış yüzey (solda), testere kalıntısından aşındırılmış yüzey (sağda) (Iftiqtar vd., 2012)	42
Şekil 3.8. 72 °C'de KOH konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak <100> silisyum kristal yapısının aşınma hızı (Ma vd., 2001)	43
Şekil 3.9. Reaktif iyon aşındırma yöntemi (RIE) (a) Alttaş temizliği; (b) Maske malzemesinin kaplanması; (c) İstenilen desenin aktarılması; (d) alttaş yüzeyinde istenilen kalıbın elde edilmesi; (e) reaktif iyon dağlama; (f) maske atıklarının çıkarılması (Li vd., 2018)	44

Şekil 3.10. 80°C’de ağırlıkça %20 KOH ve %3 IPA solüsyonunda desenlendirilmiş Si alttaş yüzeyinin SEM görüntüleri 20 dk (a), 30 dk (b), 40 dk (c) (Al- Hussein ve Lahlouh, 2017)	45
Şekil 3.11. 80°C’de ve 40 dk aşındırma süresi ile ağırlıkça %20 KOH (a), %24 KOH (b) ve %28 KOH (c) ve %3 IPA solüsyonunda desenlendirilmiş Si alttaş yüzeyinin SEM görüntüleri (Al-Husseini ve Lahlouh, 2017)	45
Şekil 3.12. 40 dk aşındırma süresi ile ağırlıkça %20 KOH + %3 IPA solüsyonu kullanılarak, 60°C (a), 70°C (b) ve 80°C (c) desenlendirilmiş Si alttaş yüzeyinin SEM görüntüleri (Al-Husseini ve Lahlouh, 2017).....	46
Şekil 3.13. MacEtch yöntemi örneği: (1) bir metal parçacık tarafından katalize edilen oksidatif bir maddenin (H ₂ O ₂ gibi) indirgenmesi, (2) reaksiyon sırasında oluşturulan boşlukların, metal parçacıkların altındaki en yüksek boşluk konsantrasyonuna sahip silisyum alttaş içine enjeksiyonu, (3) boşlukların silisyumun yan duvarlarına ve yüzeylerine taşınması, (4) oksit tabakasının HF ile uzaklaştırılması (Liu vd., 2014a)	48
Şekil 3.14. Üretilen nanotel yapılarının SEM görüntüleri: (A) Si alttaş üzerinde oluşturulan geniş alanlı Si nanotel yapıları, (B) Si nanotel yapılarının büyütme SEM görüntüsü (Peng vd., 2002)	48
Şekil 3.15. (A) 15 °C, (B) 120 °C’de 0.02 mol L ⁻¹ AgNO ₃ çözeltisi içinde hazırlanan Si nano yapılarının SEM görüntüleri (Peng vd., 2003)	49
Şekil 3.16. Si nanotel dizilerinin SEM görüntüleri (A, B), 50 °C’de 0.02 mol L ⁻¹ AgNO ₃ ve 5.0 mol L ⁻¹ HF içeren çözeltide n-tipi silisyum alttaş kullanılmıştır (Peng vd., 2003)	49
Şekil 3.17. Si alttaş üzerinde oluşturulan nanotel yapıların SEM görüntüleri (Peng vd., 2005).....	50
Şekil 3.18. A) Si alttaş üzerindeki SiNW dizilerinin enine kesitini gösteren taramalı elektron mikroskobu (TEM) görüntüsü; B) Tek bir SiNW yüksek çözünürlüklü geçirimli elektron mikroskobu (HRTEM) görüntüsü ve seçili alan elektron difraksiyon modeli (Peng vd., 2006)	50
Şekil 3.19. A) 30 sn, B) 1 dk, C) 5 dk ve D) 10 dk için HF / AgNO ₃ çözeltisinde aşınmış p-tipi (111) Si alttaşların üstten görünüşlerini gösteren TEM görüntüleri (Peng vd., 2006)	51
Şekil 3.20. 35 mM AgNO ₃ ile üretilen ağaç benzeri gümüş yapının SEM görüntüsü (a) uzaktan görünüm (b) yakından görünüm (Wan vd., 2008)	52

Şekil 3.21. 35 mM AgNO ₃ konsantrasyonunda 60 dakika boyunca bekletilmiş ağaç benzeri Si nano yapıların XRD görüntüsü (Wan vd., 2008).....	52
Şekil 3.22. (a) 15 mM AgNO ₃ ile hazırlanan numunenin, (b) 35 mM AgNO ₃ ile hazırlanan numunenin, (c ve d) 35 mM AgNO ₃ ile hazırlanan numunenin düşük ve yüksek büyütme Si nano yapıların SEM görüntüleri. HF konsantrasyonu yukarıdaki tüm numuneler için % 20'dir (Wan vd., 2008).....	53
Şekil 3.23. (a ve b) 5 dakika, (c ve d) 15 dakika ve (e ve f) 60 dakikalık aşındırma süresinden sonra Si altaşın morfolojik yapısını gösteren yüksek ve düşük büyütme SEM görüntüleri (Wan vd., 2008)	54
Şekil 4.1. Standart yüzey desenlendirme işlemi sonucunda elde edilen altaş yüzeyinin farklı boyutlarda görüntüleri	57
Şekil 4.2. Islak kimyasal işlem sırası	58
Şekil 4.3. Standart yüzey desenlendirilmiş taşıyıcı yaşam süresi 1.657 ms olan HIT güneş hücresinin I-V eğrileri.....	60
Şekil 4.4. Standart yüzeyi desenlendirilmiş taşıyıcı yaşam süresi 1.619 ms olan HIT güneş hücresinin I-V eğrileri.....	61
Şekil 4.5. Standart yüzey desenlendirilmiş altaş yüzeyinin SEM görüntüsü	64
Şekil 4.6. (a) Kesit (b) MacEtch yöntemiyle elde edilen nano yapıların SEM görüntüsü.....	65
Şekil 4.7. (a) 0.068 gr AgNO ₃ / 8.4 ml HF, (b) 0.136 gr AgNO ₃ / 16.8 ml HF, (c) 0.102 gr AgNO ₃ / 12.726 ml HF, (d) 0.102 gr AgNO ₃ / 10 ml HF konsantrasyonlarına sahip çözeltilerde oluşan yapıların SEM görüntüleri	66
Şekil 4.8. (a) 30 dakika, (b) 45 dakika, (c) 60 dakika ve (d) 75 dakika için 0.102 gr AgNO ₃ / 12.726 ml HF çözelti içinde 50 °C'de MacEtch yöntemi ile elde edilen yapıların SEM görüntüleri.....	67
Şekil 4.9. (a) 35 °C, (b) 50 °C, (c) 65 °C ve (d) 80 °C 60 dakikalık aşındırma işleminde için 0.102 gr AgNO ₃ / 12.726 ml HF içeren bir çözeltide yapılan MacEtch yöntemiyle elde edilen nano yapıların SEM görüntüleri ...	68
Şekil 4.10. NÖHÜNAM'da üretilen yüksek verimli HIT güneş hücrelerinin standart üretim adımları.....	71
Şekil 4.11. PECVD sisteminin şematik gösterimi	73
Şekil 4.12. Standart yüzey desenlendirilmiş yüzeyler üzerine kaplanan ince filmlerin uniform yapısı (Seyhan vd., 2017).....	73

Şekil 4.13. PVD sisteminin şematik gösterimi	74
Şekil 4.14. PVD yöntemiyle ITO ince filminin (a) ve Ag ince filminin (b) SEM görüntüleri.....	75
Şekil 4.15. Yüzeysel nano desenlendirilmiş HIT güneş hücresinin I-V eğrisi	77



FOTOĞRAFLAR V.B. MALZEMELER DİZİNİ

Fotoğraf 4.1. Üretilen yüksek verimli güneş hücresinin PL görüntüsü	62
Fotoğraf 4.2. Üretilen yüksek verimli güneş hücresinin PL görüntüsü	63
Fotoğraf 4.3. MacEtch deney düzeği	64
Fotoğraf 4.4. NÖHÜNAM'da kullanılan Meyer Burger marka PECVD/PVD sistemi..	72
Fotoğraf 4.5. 15.6 x 15.6 cm ² 'lik alanda üretilen HIT güneş hücresi görüntüleri ön yüzey (solda) arka yüzey (sağda)	76
Fotoğraf 4.6. 2.5 x 2.5 cm ² 'lik alanda üretilen HIT güneş hücresi görüntüleri ön yüzey (solda) arka yüzey (sağda).....	76



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
A	Angstrom
°C	Santigrat derece
cm ²	Santimetrekaire
E _c	Değerlik bandı
E _g	Yasak enerji bandı
E ₁	Işık enerjisi
E _v	İletim bandı
eV	Elektron volt
FF	Dolum faktörü
I	Akım
I ₀	Doygunluk akımı
I _L	Işıktan üretilen akım
I _{sc}	Kısa devre akımı
J _{sc}	Akım yoğunluğu
KWh	Kilowatt saat
m ²	Metrekare
mA	Miliamper
MHz	Megahertz
ms	Milisanıye
mV	Mili volt
ohm/sq	Tabaka direnci
R _S	Seri direnç
R _{SH}	Şönt direnç
s	Saniye
T	Sıcaklık
V	Gerilim
V _{oc}	Açık devre gerilimi
mM	Milimolar
n	İdealite faktörü
η	Verim

nm	Nanometre
μm	Mikrometre

Kısaltmalar

Açıklama

a-Si	Amorf Silisyum
Ag	Gümüş
AgNO ₃	Gümüş Nitrat
Al	Alüminyum
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
AM	Air Mass / Hava Kütlesi
ARC	Yansıma Önleyici Kaplama
As	Arsenik
ATO	Antimon Katkılı Kalay Oksit
Au	Altın
AZO	Alüminyum Çinko Oksit
B ₂ H ₆	Diboron
BSF	Arka Yüzey Alanı
c-Si	Kristal Silisyum
Cd	Kadmiyum
CdSe	Kadmiyum Selen
CdTe	Kadmiyum Tellür
CH ₃ COOH	Asetik Asit
CIGS	Bakır İndiyum Galyum Selenit
CuO	Bakır Oksit
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
CZTS	Bakır Çinko Kalay Sülfür
DC	Doğru Akım
EL	Elektrolüminesans
EtOH	Etanol
Ga	Galyum
GaAs	Galyum Arsenit
Ge	Germanyum
GEPA	Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası

GZO	Galyum Katkılı Çinko Oksit
H ₂	Hidrojen
H ₂ O	Saf Su
H ₂ O ₂	Hidrojen Peroksit
H ₂ SO ₄	Sülfirik Asit
HCl	Hidroklorik Asit
HF	Hidroflorik Asit
HIT	Katkılanmamış İnce Tabanlı Heteroeklem
HNO ₃	Nitrik Asit
HRTEM	Yüksek Çözünürlüklü Geçirimli Elektron Mikroskobu
In	İndiyum
InP	İndiyum Fosfid
IO:H	Hidrojen Katkılı İndiyum Oksit
IPA	İzopropil Alkol
ITO	İndiyum Kalay Oksit
IZO	İndiyum Çinko Oksit
i a-Si	Katkısız Amorf Silisyum
i a-Si:H	Katkısız Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyum
KOH	Potasyum Hidroksit
MacEtch	Metal Destekli Kimyasal Aşındırma Yöntemi
MBE	Moleküler Demet Epitaksi
Mtep	Milton Ton Petrol Eşleniği
NaOH	Sodyum Hidroksit
NASA	Amerikan Havacılık ve Uzay Dairesi
NH ₄ OH	Amonyum Hidroksit
NREL	Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
P	Fosfor
PbSe	Kurşun Selenid
PbS	Kurşun (II) Sülfid
Pd	Paladyum
PECVD	Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme
PERC	Passivated Emitter and rear Contacts
PERL	Passivated Emitter Rear Locally-Diddused

PESC	Passivated Emitter Solar Cell
PH ₃	Fosfin
PL	Fotolüminesans
PV	Fotovoltaik
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
RCA	Amerikan Radyo Şirketi
RF	Radyo Frekansı
RIE	Reaktif İyon Aşındırma
S	Kükürt
Sb	Antimon
Se	Selenyum
SEM	Spektroskopik Elektron Mikroskobu
Si	Silisyum
SiH ₄	Silan
SiO ₂	Silisyum Dioksit
SLS	Solüsyon-Sıvı-Katı
TCO	Saydam İletken Oksit
Te	Tellür
TEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TMAH	Tetrametilamonyum Hidroksit
TMB	Trimetilboron
UV	Ultraviyole
VLS	Buhar-Katı-Sıvı
XRD	X-Işını Kristalografisi
Zn	Çinko
ZnO:Al	Alüminyum Katkılı Çinko Oksit
ZnO:B	Bor Katkılı Çinko Oksit

BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1 Giriş (Güneş Enerjisi)

Dünya 2000 yıl öncesinde kas ve ateşin kullanıldığı bir enerji türüne sahiptir. Bu çağ birinci Güneş çağı olarak adlandırılmaktadır. Daha sonra insanoğlu fosil yakıtları yani birincil enerji kaynaklarını kullanmaya başladı. Birincil enerji kaynaklarının en başında kömür, doğal gaz ve petrol bulunmaktadır. Dünya da kullanılan bu birincil enerji kaynaklarının miktarı 2018 verilerine göre 13.511 Mtep olarak belirlenmiştir (Bp, 2018). Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığımızca 2017’de yapılan araştırmalara göre bilinen birincil enerji kaynaklarından kömür rezervinin 114 yıl, doğal gaz rezervinin 53 yıl ve petrol rezervinin 51 yıl ömrünün kaldığı belirtilmiştir. Gittikçe azalan fosil yakıt stokları ve küresel ısınmanın tetiklediği ekonomik ve siyasi sorunlar temiz enerji kaynaklarına olan ihtiyacı artırmaktadır. Fosil yakıtlar tükenecek ve yeni bir çağ başlayacak, bu çağ da sonsuz enerji kaynağı olan ikinci güneş çağı olacağına dair görüşler çoğunluktadır. Dolayısıyla güneş insanoğlu için vazgeçilmez bir enerji kaynağı olacağı öngörülmektedir.

Fosil yakıtlara bağlılığımız iki farklı sorunu da ortaya çıkarmaktadır. Bu sorunlar enerjinin depolanması ve iklim değişikliğidir. Bu sorunlara bulunan en etkili çözüm yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. 2018 yılında yenilenebilir enerjiden elektrik üretimi oranı 2017 yılına göre %16’lık oranda artış göstermiştir (Bp, 2018). Artışın en temelinde yenilenebilir enerji kaynakları arasında, güneş enerjisi mevcuttur ve gelecekteki enerji sorunlarını çözmek için sürdürülebilir büyük bir potansiyele sahiptir. Bu yüzden güneş enerjisi tartışmasız; sonsuz, sürdürülebilir ve çevre üzerine minimum zarar veren en temiz enerji kaynağıdır.

1.2 Türkiye’de Güneş Enerjisinin Durumu

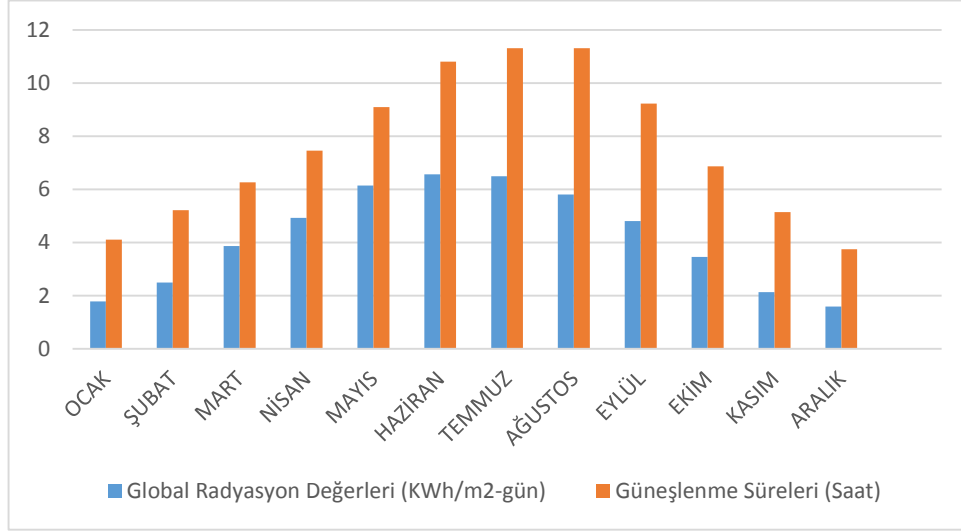
Ülkemiz’de coğrafi konum olarak Kuzey Yarım Küre’de yer aldığından dolayı güneş enerjisi potansiyeli bakımından başka ülkelere nazaran daha avantajlı konumdadır. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığınca hazırlanan, Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre, yıllık toplam güneşlenme süresi 2.741 saat (günlük ortalama

yaklaşık 7,5 saat), yıllık toplam gelen güneş enerjisi 1.527 KWh/m².yıl (günlük ortalama yaklaşık 4,18 KWh/m².gün) olduğunu tespit etmiştir (Çizelge 1.1).

Çizelge 1.1. GEPA'ya göre, Türkiye yıllık-günlük global radyasyon değerleri ve Türkiye yıllık-saat güneşlenme süre değerleri (YEGM, 2018)

AYLAR	Günlük Global Radyasyon Değerleri	Güneşlenme Süresi
	KWh/m ² .gün	(Saat)
OCAK	1,79	4,11
ŞUBAT	2,50	5,22
MART	3,87	6,27
NİSAN	4,93	7,46
MAYIS	6,14	9,10
HAZİRAN	6,57	10,81
TEMMUZ	6,50	11,31
AĞUSTOS	5,81	10,70
EYLÜL	4,81	9,23
EKİM	3,46	6,87
KASIM	2,14	5,15
ARALIK	1,59	3,75
TOPLAM	50,11 KWh/m².gün	89,98 Saat
GÜNLÜK ORTALAMA	50,11 / 12 = 4,18 KWh/m².gün	89,98 / 12 = 7,5 saat
YILLIK TOPLAM	1.527 KWh/m².yıl	2.741 saat

Yapılan diğer çalışmada GEPA'ya göre verilen Türkiye Global Radyasyon değerleri, Güneşlenme Süreleri Şekil 1.1'de gösterilmektedir. Global Radyasyon değeri ve Güneşlenme süresinin Türkiye genelinde temmuz ayında en yüksek, aralık ayında en düşük değere ulaşıldığı görülmüştür (YEGM, 2018).



Şekil 1.1. GEPA Türkiye global radyasyon değerleri ve güneşlenme süreleri (YEGM, 2018)

Ülkemizde bulunan yedi farklı bölgenin saatlik güneş enerjisi alma potansiyeli dağılımında güneşlenme süresinde en yüksek olan bölge Güney Doğu Anadolu Bölgesi olurken, ikinci sırada Akdeniz Bölgesi gelmektedir. Güneşlenme süresinin en az olduğu bölge ise Karadeniz Bölgesi olarak belirlenmiştir. Çizelge 1.2’de Türkiye’de bulunan bölgelerin saatlik ortalama güneş enerjisi alma potansiyeli dağılımı verilmiştir (Canka Kılıç, 2015).

Çizelge 1.1. Türkiye’de bulunan bölgelerin güneş enerjisi alma potansiyeli dağılımı

BÖLGE	TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ DEĞERLERİ	GÜNEŞLENME SÜRELERİ
	KWh/m ² .yıl	Saat/yıl
GÜNEYDOĞU ANADOLU	1460	2993
AKDENİZ	1390	2956
DOĞU ANADOLU	1365	2664
İÇ ANADOLU	1314	2628
EGE	1304	2738
MARMARA	1168	2409
KARADENİZ	1120	1971

Güneş enerjisinden farklı yollarla yararlanmak mümkündür. Yararlanma olanaklarının en temelinde iki farklı durum söz konusudur bunlardan ilki ısı uygulamalar ikincisi fotovoltaik (PV) uygulamalardır. Isıl uygulamalar düşük, orta ve yüksek sıcaklık olmak üzere üç farklı şekilde uygulanır. Düşük sıcaklık uygulamalarının bilinen en yaygın

örneği düzlemsel güneş kollektörleridir. Orta sıcaklık uygulamaları çizgisel yoğunlaşma yapan sistemlerdir (parabolik ve oluk sistemleri). Yüksek sıcaklık uygulamaları ise noktasal yoğunlaştırma yapan (parabolik, çanak ve merkezi alıcılar) sistemlerdir. Fotovoltaik uygulamalar ise güneşten gelen ışınları elektrik enerjisine dönüştüren uygulamalardır. Bu tez kapsamında güneş enerjisinin fotovoltaik kısmıyla ilgilenilecektir.

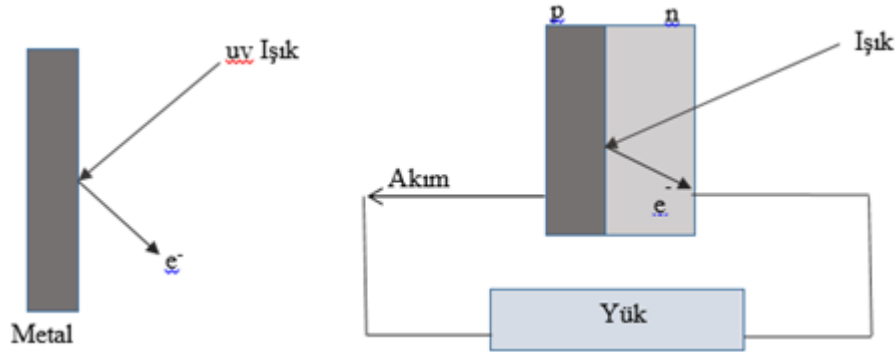
1.3 Güneş Hücreleri

Güneş hücreleri, güneş enerjisi alanında en çok araştırma yapılan çalışma konularından birisidir. Güneşten gelen ışınların doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme işlemi güneş hücreleri tarafından yapılmaktadır. Güneş hücrelerinin tarihçesi, güneş hücre teknolojileri ve çalışma prensibi bu bölümde alt başlıklar olarak verilmiştir.

1.3.1 Güneş Hücrelerinin Tarihçesi

İlk olarak 1839'da Henri Becquerel tarafından yapılan deneyde asidik bir çözeltiye bağlanmış iki elektrot ışığa maruz bırakılarak bu iki elektrot arasında elektrik voltajının ortaya çıkmasıyla gözlemlenmiştir (Becquerel, 1839). Fotovoltaik hakkında bir diğer açıklama ise kuantum teorisinin fikirlerine dayanır. Işık, enerjisi sadece ışığın frekansına veya rengine bağlı olan fotonlar olarak adlandırılan enerji paketlerinden oluşur. Görünür bölgedeki fotonların enerjisi, elektronları hareket ettirmek için daha serbest oldukları yüksek enerji seviyelerine kadar uyarmak için yeterlidir. Buna en iyi örnek, morötesi veya ultraviyole (UV) ışığının, elektronların metal yüzeyden tamamen kopması için yeterli enerji sağladığı 1905'te Einstein tarafından açıklanan ünlü deney olan fotoelektrik etkidir (Nelson, 2003). Genelde, ışık malzeme tarafından emildiğinde, fotonlar elektronları uyarır ve daha yüksek enerji durumlarına geçişi sağlar fakat uyarılan elektronlar hızlı bir şekilde serbest kalır. Şekil 1.2'de ultraviyole ışığının metal yüzeyden elektronları kopararak fotoelektrik etkinin nasıl oluştuğu gösterilmiştir. Fotovoltaik hücrenin, uyarılmış elektronları dış devre boyunca hareket ettirmek için farklı elektronik özelliklere sahip kontaklardan oluşması gerekmektedir. Fotovoltaik cihazda, uyarılan elektronlar serbest kalmadan önce asimetric bir yapı oluşturur ve foton enerjisi tarafından koparılan serbest elektronlar devrede elektrik akımını meydana getirir. Uyarılan elektronların ekstra enerjileri potansiyel fark veya elektron hareket gücü oluşturmaktadır. Fotovoltaik

cihazların verimliliği seçilen malzemenin ışık absorbe etme yeteneğine bağlıdır. Bu nedenden dolayı farklı güneş hücresi tipleri kullanılmaktadır.



Şekil 1.2. UV ışığının metal yüzeyinden elektronları koparması fotoelektrik etki (solda) ile güneş hücresindeki fotovoltaj etkinin (sağda) karşılaştırılması (Nelson, 2003)

Fotovoltaj etki, 1839'dan 1959'a kadar merak konusu olarak kaldı. 1876'da William Adams ve Richard Day ısıtılmış iki platin ile bir selenyum örneğini temas ettirdiğinde fotoakım üretebileceğini buldu. 1950'lerde silisyum p-n bağlantıları keşfedildi. Bu p-n kavşağı yapıları daha iyi fotovoltaj davranış gösterdiği kanıtlandı. İlk kristal silisyum (c-Si) fotovoltaj özellikleri 1954'te Chapin, Fuller ve Pearson arkadaşlar tarafından Bell Laboratuvarlarında geliştirildi (Kramer, 2007). Geliştirilen ilk c-Si hücresinin % 6'lık bir verim değerine sahip olması ve bu verimliliğin hızla % 10'a yükselmesinden dolayı uzun bir süre uzay araçlarında güç kaynağı olarak kullanılmasında etkili oldu. 1958' de NASA geliştirilen c-Si hücrelerini Vanguard 1 uydusu üzerinde kullanmış ve bu sayede diğer uzay araçlarının da kullanılmasına yol açmıştır (Easton ve Votaw, 1959).

1970'lerde petrole bağımlılık ve batı dünyasının yaşadığı enerji talep krizi alternatif enerji kaynaklarına (Nelson, 2003) olan ilginin aniden artmasına neden olmuştur. Bu da alternatif enerji kaynakları alanlarında araştırma ve geliştirme için finansmana neden olmuştur ayrıca bu dönemde fotovoltaj alana daha yoğun ilgi duyulmuştur. Fotovoltaj cihazların ve malzemelerin daha ucuz bir şekilde üretilmesi ve cihaz verimliliğinin artırılması için bir dizi strateji araştırmaları yapılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda daha düşük maliyetli fotoelektrokimyasal bağlantılar, çoklu kristal silisyum, amorf silisyum, organik iletkenler ve diğer ince film malzemeler alternatif güneş hücreleri olarak bulunmuştur. Daha sonra PESC, PERC ve PERL güneş hücreleri üretilmiş olup %25 verim değerlerine ulaşılmıştır. HIT güneş hücreleri üzerinde yapılan çalışmalarda da

c-Si tabanlı güneş hücrelerinde % 26,6 verim değeri sağlanmış olup tüm hücrelerin verimleri üzerinde Dünya üzerinde çalışmalar devam etmektedir (Yoshikawa vd., 2017).

1.3.2 Güneş hücre teknolojileri

Güneş enerjisinden faydalanmak için günümüzde en yaygın kullanılan teknolojilerden birisi olan fotovoltaik hücrelere yönelik yenilikçi malzemelerin geliştirildiği ve araştırma faaliyetlerinin yoğun bir şekilde devam ettiği rekabetçi bir alandır. Son 40 yıldır, c-Si üzerine yapılan çalışmalarla verimlilik ve üretim maliyetinin düşürülmesi noktasında oldukça çok aşama kaydedilmiştir. Birinci nesil güneş hücrelerinde (kristal silisyum güneş hücreleri (c-Si ve mc-Si) yüksek üretim ve kurulum maliyeti sorunlarını ortaya çıkarmıştır. İkinci nesil güneş hücreleri (ince film güneş hücreleri (a-Si, CdTe, CIGS, CZTS)) ise daha az maliyetli polikristal yarıiletken ince filmler olarak geliştirilmektedir. Ancak verimlilikleri birinci nesil güneş hücrelerine göre daha düşüktür. Üçüncü nesil güneş hücrelerinin (çok eklemlili, kuantum, organik, inorganik, perovskit güneş hücreleri) birinci ve ikinci nesil güneş hücrelerine göre daha ekonomik ve daha yüksek verimli olmalarından dolayı araştırma konuları üçüncü nesil güneş hücreleri üzerine yoğunlaşmış durumdadır. Günümüzde çalışılan güneş hücresi teknolojileri Şekil 1.3’de verilmiş ve bu tez kapsamında silisyum heteroeklem güneş hücreleri üzerine odaklanılmıştır. Özellikle üçüncü nesil güneş hücreleri son 10 yılda araştırmacıların yoğunlaştığı oldukça çok ilgi çeken yapılardır. Bu konu da verimlilik, tekrarlanabilirlik ve stabilite konusunda muazzam bir yol katedilmiştir.

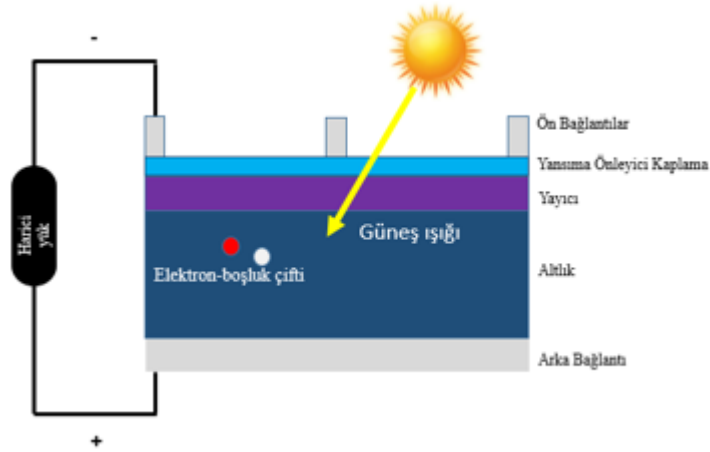


Şekil 1.3. Güneş hücre teknolojilerinin sınıflandırması

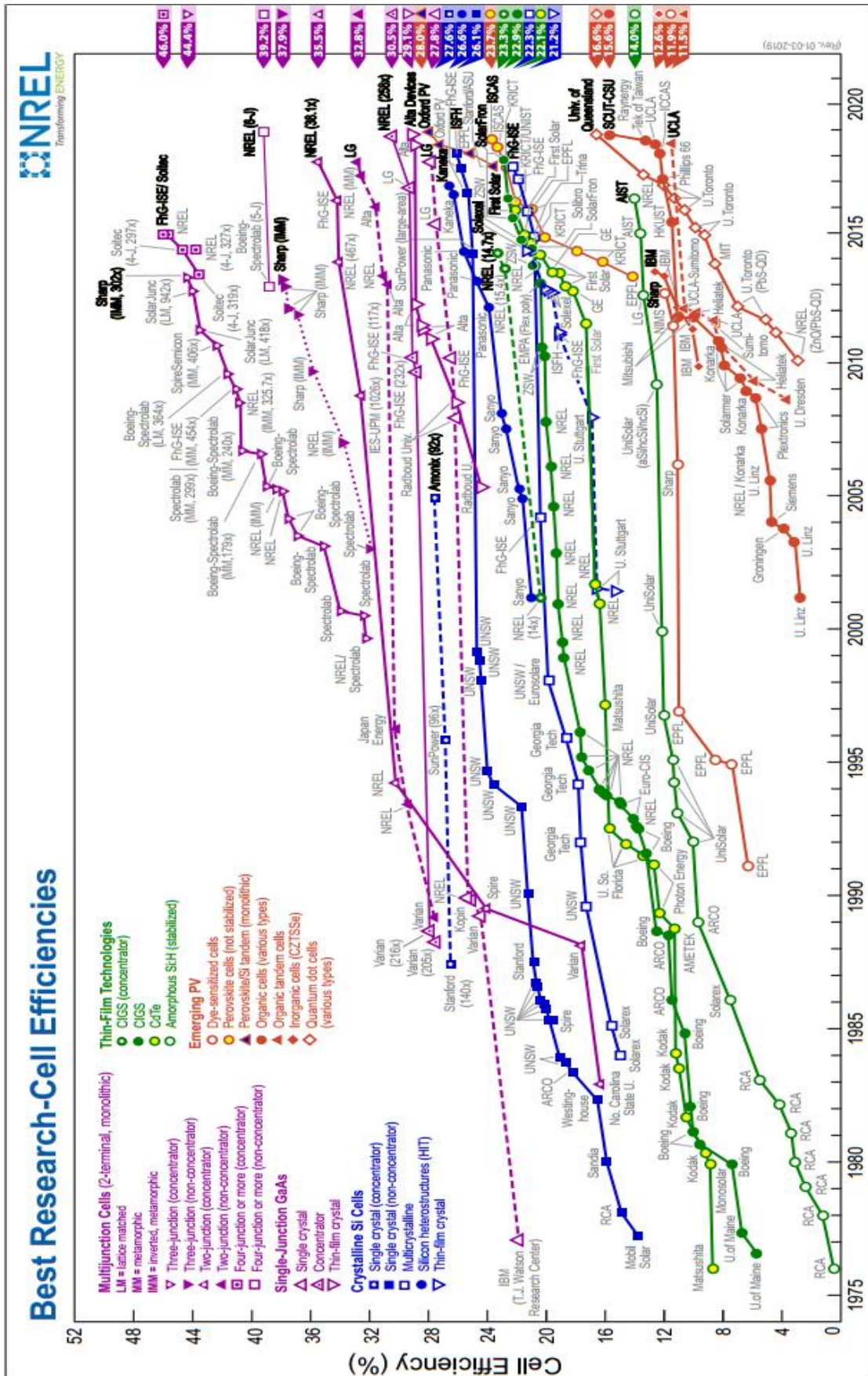
Enerji piyasasında diğer enerji kaynakları ile rekabet edebilmek için yeni gelişen güneş hücresi teknolojilerinin daha yüksek verimlilikte ve düşük maliyetli üretilmelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yüksek verimli ve düşük maliyetli üretilebildiği için heteroeklem güneş hücreleri en çok umut vaadeden güneş hücresi yapılarından birisidir. Şekil 1.4’de günümüzde çalışılan güneş hücrelerinin verimlilik değerleri verilmiştir.

1.3.3 Güneş hücrelerinin çalışma prensibi

Güneş hücreleri güneşten gelen ışığı doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen cihazlardır. Güneş hücreleri üzerine düşen ışığı elektrik enerjisine dönüştürürken akım ve voltaj üretmektedir. Güneş ışığı hücrede emildikten sonra elektronu yüksek enerji seviyesine yükselterek elektron-boşluk çifti oluşturur. Oluşan bu elektron-boşluk çifti elektrik alan içerisinde ayrılarak elektronlar metal bağlantılara doğru yönelmektedir. Metal bağlantılarda elektronlar hareket ederek devreyi tamamlar ve böylelikle enerji üretimi gerçekleşmiş olmaktadır. Bu enerji üretim döngüsünün sağlanabilmesi için çeşitli yarı iletken veya iletken malzemeler kullanılabilir ancak hemen hemen tüm fotovoltaiik enerji dönüşümlerinde p-tipi ve n-tipi yarı iletken malzemeler kullanılmaktadır. Şekil 1.5’de güneş hücresinin çalışması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Güneş hücresinin şematik gösterimi



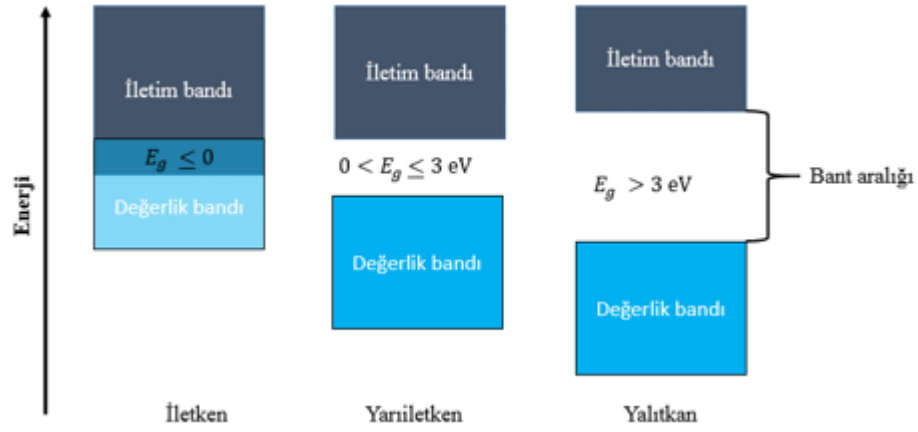
Şekil 1.4. Güneş hücreleri maksimum verimlilik değerleri (NREL, 2019)

1.3.3.1 Yarı iletken malzemeler ve özellikleri

Yarı iletken malzemeler periyodik tablonun IVA grubu (Si ve Ge) elementleri, IB grubu elementi (Cu) ya da IIIA grubu (Al, Ga ve In) ile VA grubu (P, As ve Sb) elementlerinin kendi aralarında atomik olarak birleşmesi ve IIB grubu (Zn ve Cd) ile VIA grubu (S, Se ve Te) elementlerinin kendi aralarında atomik olarak birleşmesiyle yarı iletken malzemeler elde edilmektedir. Bunların arasından Si, güneş hücreleri için kullanılan en yaygın malzemedir genelde yarı iletkenlerin bazı özellikleri:

- Diğer iletkenler gibi yarı iletkenlerde düzgün bir bağ yapısı oluşturmak için bir birine bağlanmış atomlardan oluşmaktadır.
- Düşük sıcaklıklarda yalıtkan özelliği gösterirken yüksek sıcaklıklarda iletken özelliği göstermektedir.
- Bant aralığı güneş hücrelerinde elektronların değerlik bandından iletim bandına geçmesi için gereken minimum enerjidir. Si için 1.12 eV olarak belirlenmiştir. Bu da Si'nin uyarılması için minimum ne kadar enerji gerektiğini ve ne kadar enerji üretildiğini belirlemektedir.
- Yarı iletken malzemenin bant aralığı, elektron-boşluk çiftleri sayısı ve elektron boşluklarının yeniden birleşmesi güneş hücreleri için etken faktörlerdir.

Yarı iletkenlerde bant aralığı, değerlik bandında kalmış bir elektronun serbest bir durumda uyarılarak iletim bandına geçmesi için uygulanan minimum enerji miktarıdır. Değerlik bandı (E_c) ile iletim bandı (E_v) arasında kalan bölge yasak enerji bandı (E_g) olarak bilinmektedir. Değerlik bandında elektronlar yörüngelerinde tek bir atomun nükleer kuvvetleri ile tutunurken iletim bandında elektronlar serbestçe dolaşması için herhangi bir atoma bağlı değildir ve yeterli enerjiye sahiptir. Şekil 1.6'da metal, yarı iletken ve yalıtkan elementler için bant aralıkları sırasıyla verilmiştir. Çizelge 1.3'de ise bazı yarı iletken malzemelerin yasak enerji bant aralıkları verilmiştir.



Şekil 1.6. İletken, yarı iletken ve yalıtkan maddelerin bant aralığı ve uyarılma enerjileri

Işık enerjisi (E_i), yasak enerji bant aralığı olan bir yarı iletken için;

$E_i < E_g$ ise yarı iletken saydam bir madde olarak davranır ışık içinden geçerek ilerler.

$E_i = E_g$ ise bir elektron-boşluk çifti oluşturacak kadar yeterli enerjiye sahiptir ve ışık verimli bir şekilde emilir.

$E_i > E_g$ ise daha büyük enerjili fotonlar güçlü bir şekilde emilir ve ısı şeklinde dağılmasını sağlayan bir boşluk oluşturur ya da kinetik enerjiye dönüşebilmektedir.

Çizelge 1.3. Bazı yarı iletken malzemelerin yasak enerji bant aralıkları

Yarı iletken malzeme	Sembol	Bant aralığı (eV)
Silisyum	Si	1.12
Kadmiyum Tellür	CdTe	1.49
Kadmiyum Selen	CdSe	1.73
Bakır Oksit	CuO	1.20
Galyum Arsenit	GaAs	1.43
İndiyum Fosfid	InP	1.35
Selenyum	Se	1.74

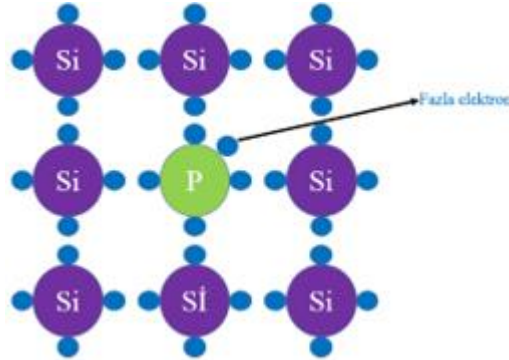
1.3.3.2 Yarı iletkenlerinde n-tipi ve p-tipi yarı iletkenlerin katılanması ve p-n eklemının oluşumu

Yarı iletken maddelerdeki katılanmanın temel amacı elektron ve boşluk sayısını değiştirmek bu sayede yarı iletken maddenin elektriksel özelliğini en iyi duruma

getirmektedir. Güneş hücrelerinde kullanılan n-tipi ve p-tipi yarı iletkenlerde katkılanarak elektriksel özellikleri artırılmaktadır. Periyodik tabloda bulunan IVA grubuna ait yarı iletken elementlerle VA grubu yarı iletken elementler katkılandığında n-tipi yarı iletken oluşturulurken, IVA grubuna ait yarı iletkenlerle IIIA grubu yarı iletken elementler katkılandığında p-tipi yarı iletken oluşturulmaktadır. n-tipi yarı iletkenler için mevcut elektron sayısı artırılarak yarı iletkenin elektriksel iletkenliği artırılırken, p-tipi yarı iletken için mevcut boşlukların sayısı artırılarak yarı iletkenin elektriksel iletkenliği artırılmaktadır.

n-tipi

Periyodik tabloda IVA grubu elementi olan silisyum elementinin dört değerlik elektronu bulunmaktadır. Silisyum, VA grubu elementi olan ve beş değerlik elektronlu fosfor (P) ile katkılanır. Katkılama işleminde fosforun beş değerlik elektronu silisyumun dört değerlik elektronu ile bağ yapar. Açıkta kalan bir elektron bağ yapmaz serbest elektron olarak dolaşır ve n-tipi yarı iletkeninde bir elektron fazlalığından dolayı elektronlar çoğunluk taşıyıcı olarak hareket ederken, boşluklar azınlık taşıyıcı olarak hareket etmektedir (Şekil 1.7).

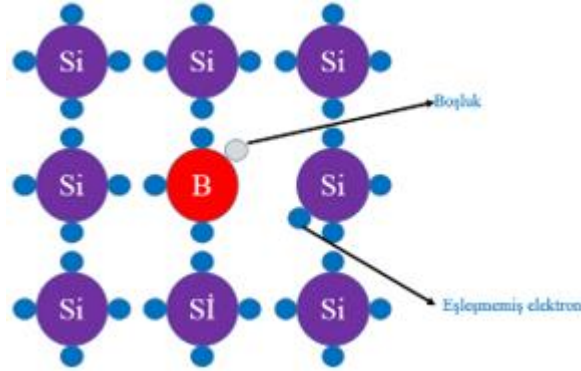


Şekil 1.7. n-tipi katkılanmış kristal (Mertens, 2018)

p-tipi

Periyodik tabloda IIIA grubu elementi olan ve üç değerlik elektronuna sahip bor (B), silisyum elementi ile katkılanır. Katkılanma işleminde borun üç değerlik elektronu silisyumun dört değerlik elektronu ile bağ yapar. Bor elementinin değerlik elektron sayısından kaynaklı silisyumun bir değerlik elektronu bor elementine geçer ve silisyum

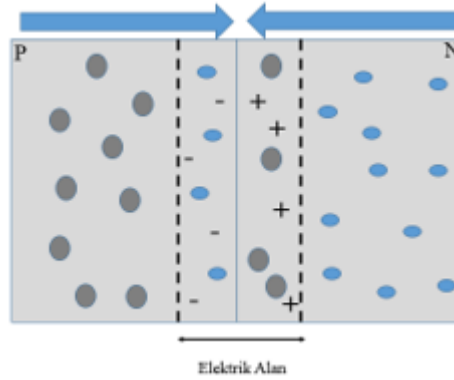
elementinde boşluk oluşur (Şekil 1.8). Oluşan bu boşluk çoğunluk taşıyıcı olarak hareket ederken, elektronlar azınlık taşıyıcı olarak hareket etmektedir.



Şekil 1.8. p-tipi katkılanmış kristal (Mertens, 2018)

p-n eklem

n-tipi yarı iletken malzemenin p-tipi yarı iletken malzeme ile birleşmesiyle ise p-n eklem yapısı oluşmaktadır. n-tipi malzemede oluşan elektron fazlalığı p-tipi malzeme alanına, p-tipi malzemede oluşan boşluklar n-tipi malzeme alanına doğru hareket eder. Elektronların p-tipi malzeme tarafına doğru hareketi n-tipi tarafındaki çoğunluk taşıyıcı durumunda olan boşlukları açığa çıkarırken, boşlukların n-tipi malzeme tarafına doğru hareketi p-tipi tarafındaki taşıyıcı durumda olan boşlukları açığa çıkarmaktadır. Birleşim noktasında oluşan elektrik alandan dolayı potansiyel fark oluşur (Şekil 1.9). Oluşturulan elektrik alandan dolayı boşta kalan elektronlar n-tipi malzemeye dönme eğiliminde, p-tipi malzemede ise boşluklar p-tipi tabaka içerisinde kalma eğilimindedirler.

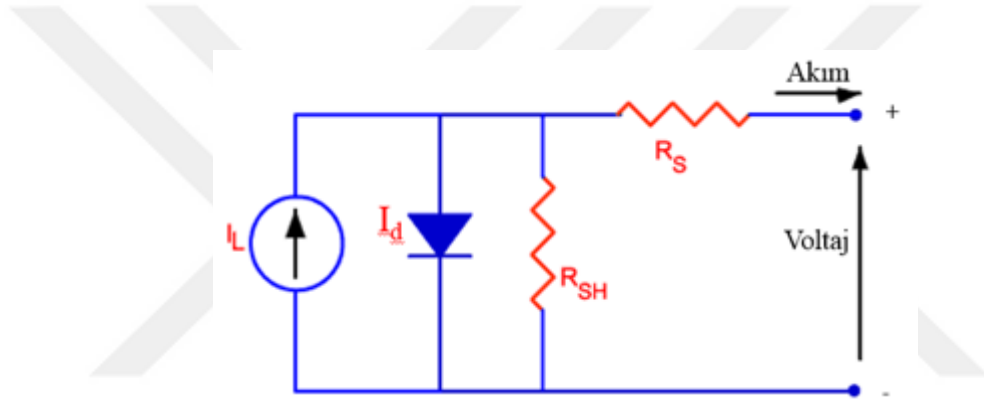


Şekil 1.9. p-n eklemine şematik gösterimi (Mertens, 2018)

p ve n tipi yarı iletken malzemelerin güneş hücresinde nasıl çalıştığını anlayabilmek için güneş hücresi parametrelerini anlamak gerekir. Aşağıda güneş hücresi parametreleri incelenmiştir.

1.4. Güneş Hücresi Parametreleri

Güneş hücresinin performansını belirlemek ve değerlendirmek için farklı güneş hücresi parametreleri vardır. Bunlar; I-V eğrisi, kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilim (V_{oc}), dolun faktörü (FF), seri direnç (R_S), şönt direnci (R_{SH}) ve verim (η) gibi bazı parametreleri bulunmaktadır. Bu parametreler alt başlıklar halinde verilmiştir. Şekil 1.10'da güneş hücresi parametreleri güneş hücresi devresinde gösterilmiştir.

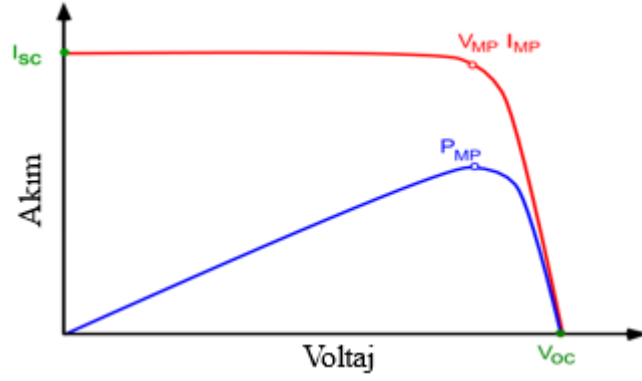


Şekil 1.10. Güneş hücresi devresi

1.4.1 I-V eğrisi

Güneş hücrelerinde üretilen elektrik akımı, akım ve voltaj özelliklerinin bir fonksiyonudur. Güneş hücreleri açık elektrik devresinden kısa devrelere bağlı elektrik yükünü değiştirirken akım ve gerilim arasındaki ilişkinin ölçülmesi karakteristik bir I-V (akım-gerilim) eğrisini oluşturur (Şekil 1.11). Güneş hücrelerinin akım ve voltaja ait Denklem (1.1)'de verilmiştir. Denklemde; akım (I), doyunluk akımı (I_0), ışıktan üretilen akım (I_L), idealite faktörü (n), sıcaklık (T) ve gerilim (V) olarak verilmektedir.

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (1.1)$$



Şekil 1.11. Güneş hücresinin kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}), maksimum güç noktaları (V_{MP} , I_{MP}) olarak gösterilmiştir

1.4.2 Kısa devre akımı (I_{sc})

Kısa devre akımı güneş hücresindeki voltaj sıfır olduğunda oluşan akım değeridir yani güneş hücresi kısa devre yapmış demektir. Işık kaynaklı taşıyıcıların üretilmesi ve toplanmasından kaynaklanmaktadır ve güneş hücrelerinden alınabilecek en büyük akımdır (Şekil 1.12).

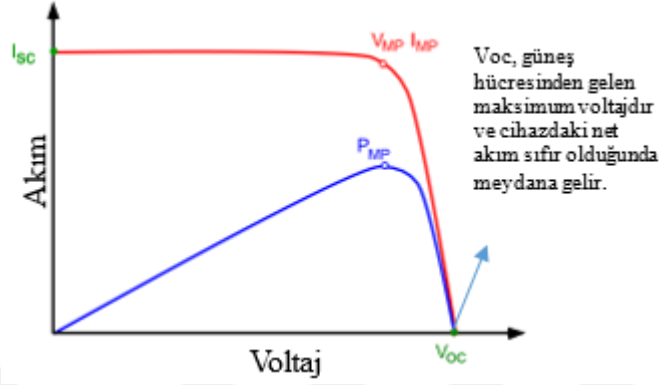


Şekil 1.12. Kısa devre akım (I_{sc}) grafiği

Kısa devre akımı güneş hücresinin alanına, gelen ışık kaynağının gücüne, gelen ışığın spektrumuna, güneş hücresinin optik özelliklerine, yüzey pasivasyonu ve azınlık taşıyıcı ömrüne bağlıdır. Güneş hücresi için AM (Air Mass/Hava Kütle) 1.5 spektrumu standarttır ve bu spektrum altında c-Si güneş hücreleri 46 mA/cm^2 'lik akım yoğunluğu (J_{sc}) sağlayabilirken laboratuvar ortamında J_{sc} değeri ise 42 mA/cm^2 üzerine çıkmaktadır (Augusto vd., 2017).

1.4.3 Açık devre gerilimi (V_{oc})

Açık devre gerilimi (V_{oc}), güneş hücrelerinden elde edilebilecek maksimum gerilimdir ve akımın sıfır olduğu durumda meydana gelmektedir (Şekil 1.13).



Şekil 1.13. Açık devre gerilimi (V_{oc}) grafiği

Güneş hücrelerinde V_{oc} değeri net akımın sıfıra eşitlenmesi ile bulunur ve Denklem (1.2) halini alır.

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (1.2)$$

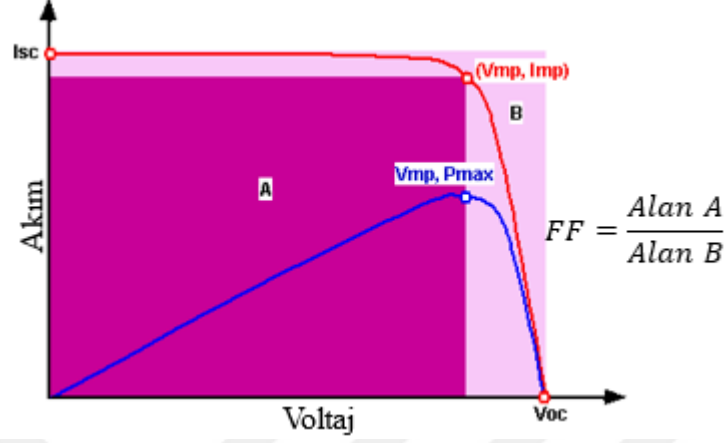
Yukardaki denklem V_{oc} 'nin güneş hücrelerinde I_L ve I_0 'a bağlı olduğunu göstermektedir. Doyma akımı güneş hücresi rekombinasyonuna bağlı olmak zorundadır. c-Si güneş hücreleri AM 1.5 güneş ışığı altında 720 mV' luk bir V_{oc} değerine sahiptir. (Augusto vd., 2017).

1.4.4 Dolu faktörü (FF)

Kısa devre akımı ve açık devre gerilimi bir güneş hücresinden alınan maksimum akım ve gerilimdir. Fakat bu çalışma noktalarının her ikisi de güneş hücresinden gelen güç sıfırdır. Doldurma faktörü ise V_{oc} ve I_{sc} ile birlikte Denklem (1.3)'de bir güneş hücresinde maksimum gücü belirleyen parametrelerdir.

$$FF = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (1.3)$$

Şekilsel olarak FF, I-V eğrisinin bir ölçüsüdür ve I-V eğrisine uyacak en büyük dikdörtgenin alanıdır (Şekil 1.14). Bundan dolayı daha yüksek voltajlı bir güneş hücresi, daha büyük bir FF'ye sahiptir.



Şekil 1.14. I-V eğrisinden doldurma faktörü

1.4.5 Verim (η)

Verimlilik güneş hücresi performansını karşılaştırmak için kullanılan en yaygın parametredir. Güneş hücresinden üretilen enerji çıkışının güneşten gelen giriş enerjisine oranı olarak tanımlanır. Güneş hücresinin performansı güneşten gelen ışık enerjisinin spektrumuna, yoğunluğuna ve sıcaklığına da bağlıdır. Günümüzdeki güneş hücreleri AM 1.5 şartlarında ve 25 °C sıcaklıkta ölçülmektedir. Uzay kullanımına yönelik üretilen güneş hücrelerinde AM 0 koşulları altında ölçülmektedir. Güneş hücresi verimliliğinin hesaplanmasına dair terim Denklem (1.4)'de verilmiştir.

$$\eta = \frac{P_{maks}}{P_{gelen}} = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{gelen}} \quad (1.4)$$

1.5 Motivasyon ve Amaç

Güneş hücresinin maliyetini en aza indirmek ve maksimum güneş hücresi verimliliğine ulaşmak en temel çalışma konuları arasında yer almaktadır. Güneş hücrelerinin verim artışı sağlanması konusunda optik kayıpların en aza indirilmesi bu temel çalışmalardan birisidir. Optik kayıpların en aza indirilmesi için uygulama yöntemlerinden birisi de

güneş hücrelerinin standart yüzey desenlendirilmesi ve Si nano yapıların üretilmesidir. Standart yüzey desenlendirme ve Si nano yapıların oluşturulmasında farklı yöntemler kullanılmaktadır. Ucuz ve yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında metal destekli kimyasal aşındırma, ıslak elektroliz aşındırma ve reaktif iyon aşındırma (RIE) yöntemleri bulunmaktadır. Bu tez kapsamında standart yüzey desenlendirme alkalın aşındırma yöntemi ile Si nano yapıların oluşturulması metal destekli kimyasal aşındırma yöntemi ile elde edilmiştir. Si nano yapıların oluşturulmasında çözelti konsantrasyonu, aşındırma süresi, sıcaklık, bekleme süresi, yansıma, Si nano yapıların kalınlık ve yoğunluk gibi parametrelerin etkisi incelenmiştir. Daha sonra yüzeyi nano desenlendirilmiş HIT güneş hücresi üzerinde standart desenlendirmenin ve nano desenlendirmenin enerji dönüşüm verimliliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

1.6 Tez İçeriği

Tez çalışmasının birinci bölümünde giriş olarak güneş enerjisinden, güneş hücrelerindeki gelişmelerden, yarı iletkenler malzemelerden, yarı iletkenlerin katkılanması ve güneş hücresi için gerekli parametrelere değinilmiştir. İkinci bölümde HIT güneş hücrelerinin kısa tarihine değinilmiş, HIT güneş hücrelerinin üretim basamakları verilmiş ve HIT güneş hücrelerinde teknik kayıplardan bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde Si altaşların yüzey desenlendirmesi ve yüzey desenlendirme kullanılan yöntemler detaylı bir şekilde verilmiştir. Dördüncü bölümde ise Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Uygulama ve Araştırma Merkezinde (NÖHÜNAM) standart yüzey desenlendirmesi, kimyasal yöntemle nano yüzey desenlendirmesi, nano desenlendirilmiş heteroeklem güneş hücresi üretimi hakkında deneysel çalışmalar ve sonuç kısmında bilgi verilmiştir.

BÖLÜM II

a-Si:H/c-Si HETEROEKLEM GÜNEŞ HÜCRELERİ

2.1 Amorf Silisyum (a-Si) ve Kristal Silisyum (c-Si) Yapılar (Heteroeklem Yapı)

HIT güneş hücreleri standart silisyum teknolojisi ve ince film güneş hücresi teknolojilerinin birleşmesi ile ortaya çıkan yüksek verimli bir güneş hücresi teknolojidir (De Wolf vd., 2012; Taguchi vd., 2014). HIT güneş hücresi yüksek verimlilik konsepti c-Si alttaşa'ya dayanırken, a-Si tabaka yayıcı (emiter) olarak çalışmaktadır. c-Si ve a-Si yapısına katkısız amorf silisyum ((i) a-Si) yapısı eklenerek yeni bir çalışma alanı olan katkılanmış ince tabanlı HIT yapısı elde edilmektedir. HIT güneş hücresi üretim teknolojisinde tüm bu işlemler için yaklaşık 200 °C yeterlidir ve bu düşük sıcaklık değerinde çalışabilme güneş hücresi üretimi için gerekli enerji tüketimini azaltmaktadır. Yüksek verimli ve düşük maliyetli olarak güneş hücresi üretilebilmesinden dolayı HIT güneş hücreleri son yıllarda en çok çalışılan konulardan bir tanesidir.

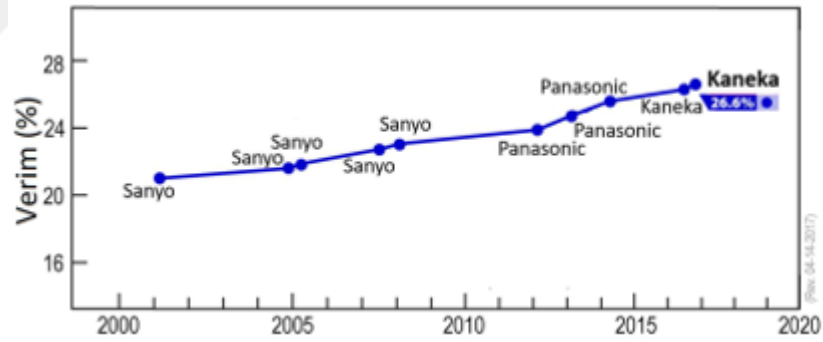
2.2 HIT Güneş Hücrelerin Tarihsel Gelişimi

İlk heteroeklem güneş hücresi, 1974' te Fuhs ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır (Fuhs vd., 1974). Birkaç yıl sonra, c-Si yüzeyleri, katkısız hidrojenlendirilmiş amorf silisyum ((i) a-Si:H) ile pasivize edilmiş ve 1983 yılında ilk heteroeklem güneş hücresi üretilmiştir (Okuda vd., 1983; Zhao, 2018). 1992 yılında Sanyo (Panasonic) %18.1 verimliliğe sahip ilk n-tipi HIT güneş hücresini üretmiştir. Günümüzde, HIT güneş hücresi üreten tek şirket olan Sanyo aynı zamanda HIT modüllerinin seri üretiminde başı çekmektedir. Sanyo laboratuvar ortamında 2011 yılında 100,4 cm²'lik alanda 745 mV'luk açık devre gerilimi, 39.4 mA/cm²' lik kısa devre akım yoğunluğu, %80.9 doldurma faktörü ile % 23.7 verimlilik değeri ile dünya rekoruna ulaşmıştır (Kinoshita vd., 2011). Ayrıca Sanyo, seri üretimde de çok yüksek verimlilikler elde etmiş: hücre seviyesinde % 20 ve modül seviyesinde % 18.3 verimliliğe ulaşmıştır.

2013 yılında rapor edilen ve bağımsız bir firma tarafından onaylanan laboratuvar şartlarında HIT güneş hücresi 101.8 cm²'lik alanda verimliliği % 24.7'dir ve yüksek verim değerlerine ulaşılmasında metalizasyondan kaynaklanan direnç kayıplarını ve

yüzey rekombinasyon kayıplarını azaltmak ayrıca katkısız (i) a-Si:H ince filminin kullanılmasıyla sağlanmıştır (Shockley ve Queisser, 1961; Kinoshita vd., 2011).

Sanyo tarafından ortaya konan ve mükemmel sonuçlar sağlanmış olan HIT teknolojisi, yakın zamanda küresel ölçekte ortaya çıkmış birçok araştırma grubunun hücre verimliliğini arttırmak için mücadele ettiği görülmüştür (Bätzner vd., 2011; Ribeyron vd., 2011). Sanyo'nun 2010'da süresi dolmuş olan en önemli patentlerinin artmasıyla birlikte artan sayıda endüstriyel ortak ticari bir yapıya kavuşmuştur. Asya'da, Sanyo dışında % 22.7'lik verimlilik Kaneka tarafından elde edilmiştir. Günümüzde de en yüksek HIT güneş hücresi verimine Kaneka sahip olsa da Sanyo uzun yıllar HIT alanında verim değerlerini elinde tutmuştur Şekil 2.1'de HIT güneş hücresi gelişiminin yıllara göre verimlilik artışı gösterilmiştir. Ayrıca, Hyundai Heavy Endüstrileri 220 cm²'lik alana sahip hücrelerde % 21,1 verimliliğe ulaşmıştır. Aynı şekilde laboratuvar ortamında, Japonya'da AIST ve Tokyo Teknoloji Enstitüsü (Sritharathikhun vd., 2009), Çin'de Çin Bilimleri Akademisi (Zhao vd., 2010), Kore Sungkyunkwan Üniversitesi ve Elektrik Mühendisliği Enstitüsü (Dao vd., 2010), heteroeklem cihazlar üzerinde çalışmaktadır.



Şekil 2.1. HIT güneş hücresi yıllara göre verim değerleri (NREL, 2019)

ABD'de, Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL), p-tipi c-Si altaş üzerinden en yüksek verimliliği % 19,3 olarak elde etmiş (Dao vd., 2010). Avrupa'da Roth & Rau, RF PECVD kullanarak, 735 mV'luk Voc ile 4 cm²'de %21.9, 149 cm²'de %20.3 verimlilik elde etmiştir (Bätzner vd., 2011). EPFL Neuchatel'de, çok yüksek frekanslı (VHF) PECVD kullanılarak desenlendirilmiş yüzey üzerinde % 21.8'lik verimlilik ve 4 cm²'lik güneş hücresi üzerinde bir 736 mV'luk Voc değeri elde edilmiştir (Descocudres vd., 2011a). Helmboltz-Zentrum Berlin (HZB), p-tipi c-Si'de %17.4 verimlilik elde edilirken,

1 cm²'lik alanda yüzeyi standart desenlendirilmiş yapı elde edilmiş n-tipi c-Si alttaşlar da % 19.8 verime ulaşılmıştır (Fuhs vd., 2006).

Heteroeklem güneş hücrelerinin sahip olduğu üstün ve geliştirilebilir bu özellikleri nedeniyle gelecekte fotovoltaik sanayiinde önemli bir yer tutması beklenmektedir. Dolayısıyla, HIT güneş hücresi klasik c-Si güneş hücresi teknolojisine alternatif en cazip teknolojilerden biri olduğu açıktır. Ulaşılan verimlilik ve erken sanayileşmesi açısından HIT güneş hücresi başarısı oldukça şaşırtıcı olmasına rağmen hala HIT güneş hücresi fiziksel çalışma mekanizmaları verimliliği belirleme konusunda cevaplanmayı bekleyen birçok soru vardır. Bu yönde yürütülen çalışmalar, güneş hücresinde meydana gelen optik ve elektriksel kayıpların azaltılması üzerine yoğunlaşmıştır. Bu kayıpların önemli bir kısmı a-Si/c-Si ara yüzlerinin özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca taşıyıcı yük mekanizması, a-Si:H/c-Si bant ofsetlerinin etkisi, katmanların kalınlığı gibi konular da en önemli araştırma konularındandır. Kısaca diğer güneş hücre teknolojileri (GaAs, CdSe, PbSe, PbS gibi) ile kıyaslandığında daha çevreci bir teknoloji olan heteroeklem güneş hücresi verimliliğini arttırmak için yapılabilecekler aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Daha ince silisyum alttaş kullanılması,
- Rekombinasyon kayıplarının azaltılması (a-Si:H kaplanmadan önceki kimyasal yüzey temizliği, yüksek kaliteli katkısız (i) a-Si:H ince filmin kaplanması, a-Si:H katmanlarının kaplanması, plazma ve termal işlemlerden kaynaklanan kusurların azaltılması),
- Optiksel kayıpların azaltılması (yüzey işleminin rastgele piramit şeklinde, homojen ve aynı büyüklükte olması, ince film katmanlarının daha ince kaplanması, mobilite değeri yüksek ITO ince filmle büyütülmesi),
- Gölgeleme yani alan kayıplarının azaltılması,

HIT güneş hücrelerinin verimliliğinin arttırmada önemli faktörlerdir.

2.3 HIT Güneş Hücrelerinin Üretim Basamakları

Hücreler üretime başlamadan önce ingot durumundan farklı yöntemlerle kesilerek dilim haline getirilmiştir. Kesilen Si dilim üzerinde oluşan testere kalıntıları kimyasal solüsyon yardımıyla dilim üzerinden atılmaktadır. Testere kalıntılarının atılmasından sonra Si alttaş yüzeyinin rastgele piramit yapısını elde edebilmek için kimyasal bir alkalın solüsyonunun

birleşmesiyle standart yüzey desenlendirme yapısı elde edilir. Elde edilen alttaş yüzeyinde bulunan metal iyonların, organik kalıntıların ve oksit tabakanın kaldırılması için sırasıyla; RCA-1 (Radio Corporation of America), RCA-2 (Radio Corporation of America-1) ve hidroflorik asit (HF) temizliği yapılmaktadır. Temizlik işlemleri bittikten sonra kaplama için hazır hale gelen c-Si hücresinin her iki yüzeyine (i) a-Si:H tabakası PECVD yöntemi ile kaplanır. Ön ve arka yüzeye kaplanan (i) a-Si:H yapısının ön yüzeyine yayıcı görevi gören (p) a-Si:H kaplanırken arka yüzeyine azınlık taşıyıcı olan (n) a-Si:H tabakası kaplanır. Kaplanan (p) ve (n) a-Si:H yüzeyleri üzerine iletimin daha iyi gerçekleşmesi ve gelen ışığa yansımaya önleyici kaplama (ARC) özelliği kazandıran saydam iletken oksit (TCO) katmanı PVD ünitesinde kaplanır. Ayrıca arka yüzeyde bulunan TCO katmanının üzerinden elektrik iletimini sağlaması için gerekli olan arka kontak PVD’de kaplanır. Ön yüzeydeki kontakın sağlanması için yine TCO üzerine serigrafik baskı yöntemiyle ince akım ve kalın akım toplayıcıların metalizasyon yapıları oluşturulur. Oluşturulan kontak yapılarının kurutulması için belirlenen sıcaklık değerinde kurutulması sağlanır. Böylelikle hücre tamamlanır ve karakterizasyon aşamasına geçilir. Bu bölümde alt başlıklar halinde HIT güneş hücresi üretim adımları daha detaylı bir şekilde verilecektir.

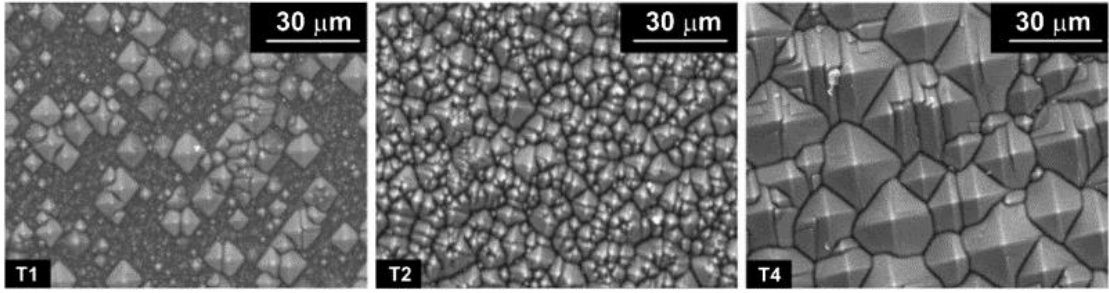
2.3.1 Standart yüzey desenlendirme işlemi (Rastgele piramit yapısı)

HIT güneş hücrelerinde kullanılan alttaşlar malzeme maliyetini azaltmak için mümkün oldukça ince olmalıdır. İnce alttaşın kullanılması ise ışığın soğurulmasını azaltmaktadır (van Sark vd., 2012). HIT güneş hücreleri üretiminde, gelen ışığın soğurulmasını artırmak ve yansımaya en aza indirmek için hücre yüzeyinde bazı yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemler;

- Işığın yüzeyde tutunması için alttaş kalınlığını ince tutmak ve etkili optik kalınlığı en üst düzeye çıkarmak,
- Hücre yüzeyi üzerine yansımaya önleyici kaplamaların yapılması,
- Hücre yüzeyinin dokusu üzerinde desenlendirme yöntemlerinin uygulanması,
- Yansımaya önleyici kaplamaların ve yüzey dokusu üzerinde desenlendirme işleminin beraber uygulanması,

şeklinde sıralanmaktadır. Bu yöntemler gelen ışığın soğurulmasını artırmak ve yansımının oluşmasını sağlamak amacıyla HIT güneş hücrelerinde uygulanmaktadır.

Silisyumun bant aralığı enerjisi 1.12 eV'dur. Bu enerji seviyesinden daha düşük enerji ile gelen ışık Si içerisinde soğurulamaz ve soğurulamayan ışıktan dolayı hücre performansında azalma meydana gelmektedir. Ayrıca güneş hücrelerinde soğurma kayıplarının yanı sıra yansıma kayıpları da hücre performansına etki etmektedir. Alttaş yüzeyinin desenlendirme işlemi c-Si bazlı güneş hücrelerinde yansıma kayıplarının azaltılması amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu desenlendirme işlemi rastgele piramit yapısının kullanılmasıyla elde edilmektedir. Şekil 2.2'de yüzeyi rastgele desenlendirilmiş piramit yapı gösterilmiştir. HIT güneş hücrelerinde kullanılan (111) ve (100) kristal yönelime sahip alttaş yüzeyinin rastgele piramit yapısının oluşturulması kimyasal solüsyonlar yardımıyla gerçekleştirilmektedir (van Sark vd., 2012).



Şekil 2.2. Silisyum alttaş yüzeyinin rastgele piramit yapısının SEM görüntüsü (Muñoz vd., 2009)

Rastgele piramit yapısının HIT güneş hücrelerinin yüzey dokusu ve yüzey desenlendirilmesinde kullanılan yöntemler hakkında üçüncü bölümde daha detaylı bilgi verilecektir.

2.3.2 Yüzey temizliği

Standart güneş hücrelerinde olduğu gibi HIT güneş hücrelerinin verimliliğini artırmada yüzey temizliği oldukça etkilidir. a-Si:H ince filminin PECVD'de kaplanmasından önce alttaş temizliğinin iki etkisi bulunmaktadır. Bunlardan birincisi hücre üzerinde bulunan parçacıkların, oksit tabakanın ve metalik kirlenmenin alttaş yüzeyinden atılmasıdır. İkinci durum ise yüzeydeki bağların kısmen hidrojenle pasive edilmesidir. Yüzey temizliği a-

Si:H/c-Si ara yüzey durum yoğunluğunu azaltmak için önemli bir adımdır. Silisyum alttaşın yüksek taşıyıcı ömrü ve düşük yüzey rekombinasyonu, temizleme işleminin kalitesini göstermektedir. Güneş hücresi üretimine geçmeden hemen önce çeşitli Si alttaş temizleme teknikleri uygulanmaktadır. Bu teknikler RCA-1, RCA-2, HF ve Pirana temizliğidir. Çizelge 2.1’de temizleme tekniklerinde kullanılan çözeltilerin oranları kullanılan yöntemle göre verilmiştir. Kullanılan temizleme yöntemlerinin etkili olup olmadığı hücre üzerinde uygulanarak hücre performansındaki taşıyıcı ömür süresiyle araştırılabilmektedir. Yapılan araştırmalarda RCA-1 ve RCA-2 alttaş temizliği tekniklerinin diğerlerine göre daha başarılı olduğu ve taşıyıcı ömrünün en yüksek çıktığı belirlenmiştir. Pasivasyon konusunda da başarılı sonuçlar sağlamaktadır.

Çizelge 2.1. RCA-1, RCA-2, HF ve Pirana temizliğinde kullanılan kimyasal solüsyonlar, miktarları ve etkisi (van Sark vd., 2012)

Teknik	Kullanılan Çözelti	Çözelti Oranları	Etkisi
RCA-1	H ₂ O : H ₂ O ₂ : NH ₄ OH	5:1:1	Organik kalıntılar, metallere ve partiküller
RCA-2	H ₂ O : H ₂ O ₂ : HCl	6:1:1	Atomlar ve metal iyonlar
HF	HF : H ₂ O	1:50	Doğal oksit
PİRANA	H ₂ SO ₄ : H ₂ O ₂	1:3	Organik kalıntılar

2.3.3 Katkısız (i) ve katkılı (n)-(p) a-Si:H tabakalarının kaplanması

Alttaş temizliği uygulandıktan sonra c-Si yüzeyine katkısız ve katkılı (n)-(p) a-Si:H tabakalarının kaplanması alt başlıklar halinde verilmiştir.

2.3.3.1 Katkısız (i)a-Si:H tabakasının kaplanması

Alttaş temizliğinin ardından c-Si yüzeyine ilk olarak katkısız daha sonra katkılı (n) ve (p) tipi a-Si:H tabakaları kaplanmaktadır. Yüksek verimli c-Si güneş hücreleri için, yüksek kaliteli yüzey pasivasyonu çok önemlidir. Katkısız (i) a-Si:H filmlerinin c-Si yüzeyi için iyi bir pasivasyon sağladığı bilinmektedir (Pankove ve Tarng, 1979; Tarng ve Pankove, 1979; Weitzel vd., 1981). Katkısız (i) a-Si:H filmleri genelde hidrojen (H₂) ile seyreltilmiş silan (SiH₄) gazı ile PECVD’ de kaplanmaktadır. Bu kaplama işlemi 13.56 MHz’ lik plazma uyarma frekansı ile gerçekleştirilmektedir (De Wolf ve Kondo, 2007; Strahm vd., 2010; Descoedres vd., 2011b). PECVD cihazının kaplama sıcaklığı ve basıncı sırasıyla 200 °C ve yaklaşık 0.1 ila 1 Torr arasındadır. Daha yüksek sıcaklıklar c-Si alttaşın Voc

değerinin azalmasına bu da doğrudan hücrenin performansının kötüleşmesine neden olmaktadır. Ayrıca düşük sıcaklarda ısıl işleme maruz kalması a-Si:H'nin elektronik ve materyal özelliklerinin daha iyi olması için etken faktördür (Burrows vd., 2008; De Wolf vd., 2008; Edwards vd., 2008; Illiberi vd., 2010; Schüttauf vd., 2011). Katkısız (i) a-Si:H tabakasının kaplanması ki amaç malzemedeki c-Si yüzeyindeki silisyum boş bağlarını hidrojen ile pasivasyonunu sağlaması ve ara yüz kusurlarını en aza indirmektir. HIT güneş hücrelerinde iyi bir pasivasyon için gerekli koşullar alttaş ve a-Si:H tabakası arasındaki ara yüzün atomik olarak keskin yani farklı bir kristal malzemenin birikmediği anlamına gelmektedir (Wang vd., 2006; De Wolf ve Kondo, 2007; Fujiwara ve Kondo, 2007). Sanyo, a-Si:H kalınlığının HIT güneş hücreleri üzerindeki yaptığı araştırmalarında, a-Si:H ince filmlerdeki soğurma kayıpları ve yüksek direnç nedeniyle hem katkılı hem de katkısız a-Si:H katmanlarının güneş hücrelerinde Jsc ve FF değerinin maksimize etmek için mümkün olduğu kadar ince olması gerektiğini açıklamıştır. Sonuç olarak biriktirme sırasında a-Si:H katmanlarının özelliklerinin mümkün oldukça doğru kontrol edilmesi gerekmektedir.

2.3.3.2 Katkılı (n)-(p) a-Si:H tabakasının kaplanması

HIT güneş hücresi üretiminde yayıcı ve arka yüzey alanı (BSF) yapısını oluşturmak için katkılı a-Si:H tabakalarına gerek duyulmaktadır. Katkılı a-Si:H tabakaları, (i) a-Si:H tabakaları gibi plazma ortamında gerçekleştirilmektedir. Bu tabakaların oluşumu sırasında çeşitli gazlardan yararlanılmaktadır. p-tipi a-Si:H katkılanmasında SiH₄ gazı içerisine trimetilboron (TMB) ve diboron (B₂H₆) gazları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. n-tipi a-Si:H katkılanmasında ise SiH₄ gazı içerisine fosfin (PH₃) kullanılarak gerçekleştirilmektedir. (n)-(p) a-Si:H katkılanmasında kullanılan bu gazlar H₂ ile seyreltilerek kullanılmaktadır. Katkılı (n)-(p) a-Si:H tabakaların oluşumu sırasında kullanılan gazlardan dolayı PECVD cihazı içerisinde bulunan işlem odalarında kontaminasyona sebep olacağından her hangi bir yapı oluşturulduktan sonra işlem odasının içerisi çeşitli gazlarla temizlenmesi gerekmektedir. Daha sonra diğer yapının oluşumuna geçilmelidir.

2.3.4 TCO (Transparent conductive oxide / Saydam iletken oksit) tabakalarının kaplanması

Katkılı a-Si:H katmanlarının yanal iletkenliğinin zayıf olmasından dolayı a-Si:H güneş hücrelerinin üzerinde TCO tabakasının oluşturulması gerekmektedir. Silisyum alttaşlar %30'un üzerinde yüksek bir yansımaya sahiptir. Bu yüzden TCO tabakası a-Si:H hücrelerinde hem yansıma önleyici bir kaplama hem de iyi bir elektriksel iletkenlik görevi görmektedir. Yüksek iletkenlik ve düşük soğurma arasındaki bu değişim yalnızca TCO malzemeleri ile gerçekleşmektedir. Silisyum heteroeklem hücrelerin iki yüzeyli olduğundan arka yüzeyine de ön yüzeyde olduğu gibi bir TCO tabakası gerekmektedir. Arka yüzey TCO katmanı arka metalizasyonu olan hücrelerde yaygındır. Arka yüzeyde bu TCO tabakası optik ve temas tabakası olarak çalışmaktadır. TCO tabakalarını optimize etmek ve aynı zamanda uygun TCO malzemesini bulmak güneş hücresinin performansını artırmak için önemli bir faktördür. a-Si:H tabakası ağırlıklı olarak daha kısa dalga boylu (<500 nm) ışınları soğururken, TCO tabakasında bulunan serbest taşıyıcılar daha uzun dalga boylu ışınları soğurmaktadır. 600 nm'de yaklaşık 2'lik bir kırılma indisi ile TCO kalınlığı yaklaşık 75 nm'de sabitlenir (Hussain vd., 2019). TCO malzemesi olarak kullanılabilen materyaller indiyum kalay oksit (ITO), antimon katkılı kalay oksit (ATO), galyum katkılı çinko oksit (GZO), indiyum çinko oksit (IZO) ve alüminyum çinko oksit (AZO) olarak belirlenmiştir.

Silisyum heteroeklem güneş hücrelerinde genelde ITO TCO malzemesi olarak tercih edilmektedir (Pla vd., 2003; Balestrieri vd., 2013). Standart ITO'nun taşıma mobilitesi ve 80 nm'lik ince film için tabaka direncinin minimum değeri 20 ohm/sq'dir. Ayrıca yapılan son çalışmalara göre daha yüksek taşıyıcı mobilitesine ve ITO' dan daha düşük tabaka direncine sahip alternatif saydam iletken oksit malzemeler geliştirilmiştir. Alüminyum katkılı (ZnO:Al) ve bor katkılı (ZnO:B) çinko oksit, hidrojen katkılı indiyum oksit (IO:H) gibi malzemelerdir.

2.3.5 Arka ve ön yüzey metalizasyon işlemi

Güneş hücrelerinde metalizasyon işlemi gelen ışınların hücre üzerinde oluşturduğu elektron-boşluk çiftinin toplanmasında önemli etkindir. Güneş hücrelerinin ön ve arka yüzeylerinde akım toplayıcı bağlantılar bulunmaktadır. Elektron-boşluk çifti bağlantılar

sayesinde toplanabilir. Farklı yöntemlerle metalizasyon işlemi gerçekleştirilebilmektedir bunlar; serigrafik baskı (Hannebauer vd., 2015), şablon baskı (PANEK vd., 2017), aerosol baskı (Mette, 2007), bakır elektroliz (Muñoz vd., 2012) fiziksel buhar kaplama gibi yöntemlerdir. Bu metalizasyon yöntemleri arasında serigrafik baskı yöntemi güvenilir, hızlı ve daha basit yöntem olduğundan diğerlerine göre daha yaygın kullanılmaktadır. Arka ve ön yüz metalizasyon için genelde gümüş (Ag) kullanılır. Standart HIT güneş hücrelerinde arka yüzey bağlantısı PVD sistemiyle kaplanırken, ön yüzey bağlantısı ince akım toplayıcılar (finger) ve kalın akım toplayıcılar (busbar) serigrafik baskı yöntemi ile oluşturulur.

2.3.6 Fırınlama

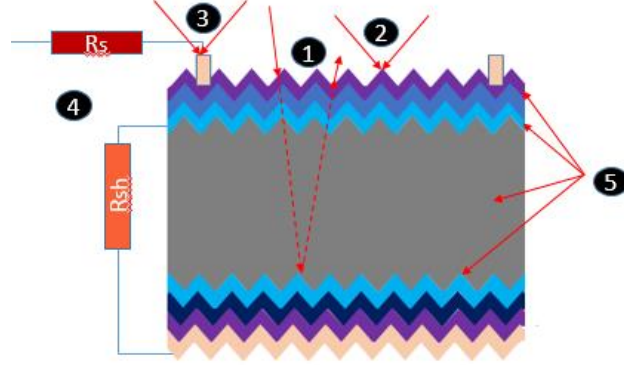
Ön yüzey metalizasyon işlemi serigrafik baskı yöntemiyle tamamlandıktan sonra ki adım fırınlama işlemidir. Metalizasyon sırasında finger ve busbar da kullanılan gümüş pastanın kurutulması için fırınlama işlemi uygulanmaktadır.

HIT güneş hücrelerinde elektrik iletimini sağlayan ön yüzey bağlantılar genellikle 200 °C'de 10 dakika kurutulmaktadır. Bu sıcaklığın kullanılmasındaki temel amaç; özellikle aşırı yüksek tavlama sıcaklıklarına duyarlı olabilecek a-Si:H tabakası ve TCO tabakasının zarar görmesini önlemektir (Yablonovitch vd., 1985). Düşük sıcaklıklarda fırınlama yapılırken TCO tabakasının temas direnci korunurken yüksek iletkenlik sağlanmaktadır ve bu da hücre verimliliğini olumlu yönde etkilemektedir. Fırınlama işlemi tamamlandıktan sonra güneş hücresi elde edilmiş olur.

2.4 Heteroeklem Güneş Hücrelerinde Teknik Kayıplar

Bir güneş simülatörü altında c-Si güneş hücrelerinin teorik verim değeri yaklaşık %29,3 olarak belirlenmiştir (Swanson ve Ieee, 2005). Kaneka ve Sanyo tarafından üretilen HIT güneş hücrelerinde en yüksek verim değeri Kaneka tarafından sağlanmış ve 26,6% verim değerine ulaşmıştır (NREL, 2019). Teorik verim değeriyle ölçülen değer arasındaki fark Şekil 2.3'de gösterilen optiksel ve elektriksel kayıplardan kaynaklanmaktadır (Lai, 2014). Optiksel kayıp elektron-boşluk çiftleri üretemeyen fotonların kaybı nedeniyledir. Bu kayıp; ön yüzeyin yansımaları, gölgelenmesi ve eksik emilimden kaynaklanmaktadır. Elektriksel kayıp ise; hücre çıkış gücüne katkıda bulunamayan elektron-boşluk

çiftlerinden kaynaklanmaktadır. Bu kayıp direnç kaybına ve rekombinasyon kaybına bağlanmaktadır.



Şekil 2.3. c-Si güneş hücresindeki kayıplar

Şekil 2.3.' de yansıma kayıpları (1), tutulamayan fotonlar nedeniyle oluşan kayıplar (2), gölgeleme (alan) kayıpları (3), direnç kayıpları (4) ve rekombinasyon kayıpları (5) olarak sıralanmıştır. Bunlardan 1-2-3 optiksek kayıpları gösterirken 4 ve 5 elektriksel kayıpları göstermektedir.

2.4.1 Yansıma kayıpları

Yansıma kaybı, güneş hücresi yüzeyinden yansıyan fotonların hareketine bağlıdır. Oluşan yansıma, yüzey desenlendirme yapılarak ve kaliteli yansıma önleyici kaplama kullanılarak önlenir.

Yüzey desenlendirme

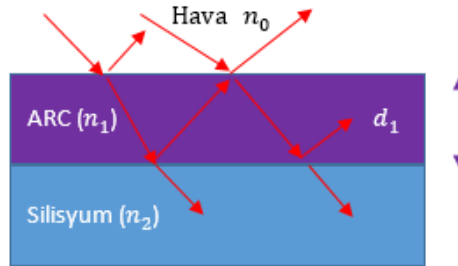
Yüzey desenlendirme yansımayı en aza indirmek için etkili bir yöntemdir. Yüzeyin desenlendirilmesi gelen fotonun hücre yüzeyinde piramit yapı arasında kalarak yansımanın piramitler arasında olmasından dolayı yansımayı azaltmaktadır (Şekil 2.4) (Rohatgi vd., 2012). Yüzey desenlendirme c-Si düzlemlerinin <100> kristal yapısı üzerinde aşındırma işlemi ile gerçekleştirilebilir. Yüzey desenlendirme ile c-Si yüzeyinin ortalama yansıması yaklaşık %30'dan %11'e kadar azaltılabilmektedir. Desenlendirilmiş c-Si yüzeylerinde ARC tabakası yansımayı %3'e kadar azaltabilmektedir.



Şekil 2.4. Düz Si yüzeyine ve desenlendirilmiş Si yüzeyine düşürülen fotonların yansımaları

Yansımaya önleyici kaplama (ARC anti reflecting coating)

ARC, gelen ışığın yüzeyden ve ara yüzeylerden yansımalarını önlemek amacıyla kullanılan ve ince bir katman olarak kaplanan bir ince film (Şekil 2.5). ARC' nin kalınlığı d_1 ve kırılma indisi n_1 olan ARC için uygun seçim yapılması yansımayı önemli ölçüde azaltmaktadır.



Şekil 2.5. Yüzeyin yansımalarını azaltmak için kullanılan yansıma önleyici kaplama (Green, 1998)

Tek bir ARC katmanı için, yansıma katsayısı R olan Fresnel denklemi ile ifade edilmektedir (Denklem 2.1).

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2\cos\vartheta}{1 + r_1^2r_2^2 + 2r_1r_2\cos\vartheta}, \vartheta = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda}, r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}, r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (2.1)$$

Güneş spektrumu 630 nm dalga boyunda maksimum foton enerjisine sahip olduğundan (Doshi vd., 1997) ARC tipik olarak 630 nm'de yansımaları en aza indirecek şekilde tanımlanmıştır.

2.4.2 Tutulamayan fotonlar nedeniyle oluşan kayıplar

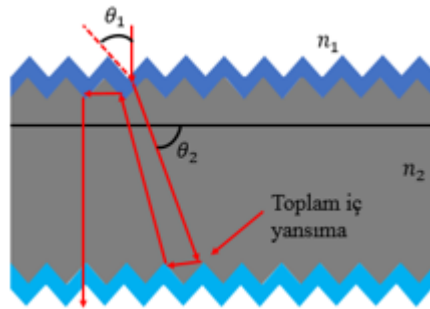
Hücre yüzeyinde tutulamayan fotonlar, hücre kalınlığı veya hücre boyunca yetersiz optik yol uzunluğu nedeniyle güneş hücresinde soğurulamayan enerji $E > E_g$ ile fotonların kaybı anlamına gelir. Bu uzun dalga boylu fotonların yüzeyden hücreye geri yansıtılmasıyla soğurulmasını artıran uygun ışık tutucu ile en aza indirilebilir.

Foton yakalama

Fotonun tutulması, gelen ışığın açısını değiştirerek elde edilir, böylece ışınlar yüzeye dik değil, belirli bir açıda hareket edebilir. Bu durum, Şekil 2.6'da gösterildiği gibi artan optik yol uzunluğu ile sonuçlanır (Solanki, 2015). Bu nedenle, ışınların açılı bir şekilde yüzeye buluşması için yüzeyin desenli bir dokusu olmalıdır. Snell'in yasasına göre:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.2)$$

gelen açı, yansıyan açıdan büyükse yansıma arka yüzeyde meydana gelebilir. Sonuç olarak, yol uzunluğu ön yüzey yani desenlendirilmiş yüzey ve arka reflektör tasarımının bir kombinasyonu ile arttırılabilir. Bununla birlikte, desenli yüzey, artmış ara yüz kapama yoğunluğu nedeniyle hücrede daha yüksek yüzey rekombinasyonuna yol açmaktadır. Bu nedenle, yüzey rekombinasyonunu azaltmak için, ön yüzeyi desenli tutmak, ışığı tekrar silisyuma yansıtan dielektrik bir yansıtıcı oluşturmak gerekir.



Şekil 2.6. Optik yol uzunluğunu artırmak için güneş hücresinde fotonun tutulması

2.4.3 Gölgeleme (Alan) kayıpları

Ön metal bağlantılar gelen fotonların hücre içerisine girmesini engelleyerek $I_{ışık}$ azaltır. Bu duruma gölgeleme kaybı denir. Küçük akım toplayıcılar ve büyük akım toplayıcılar dahil olmak üzere ön bağlantılar mümkün olan en iyi konfigürasyonda olmalıdır. Aksi durumda direnç kayıplarının artmasına neden olmaktadır.

2.4.4 Direnç kayıpları

Direnç kayıpları, bir güneş hücresinin seri ve şönt dirençlerinden kaynaklanmaktadır. Bu iki direnç, güneş hücresinin doldurma faktörünü etkiler. Aşağıdaki denklemler, seri ve şönt dirençlerinin FF üzerindeki etkisini göstermektedir.

$$FF = FF_s \left[1 - \frac{(V_{oc} + 0.7)}{V_{oc}} \times \frac{FF_s}{r_{SH}} \right] \quad (2.3)$$

$$FF_s = FF_0(1 - r_s) \quad (2.4)$$

$$r_s = \frac{R_{sh}}{R_{CH}}, R_{CH} = \frac{V_{oc}}{I_{sc}}, r_{SH} = \frac{R_{sh}}{R_{CH}} \quad (2.5)$$

Bura da FF_0 , Denklem (2.1) 'de tanımlandığı gibi R_s ve R_{sh} terimleri olmadan ideal FF değeridir. Sonuç olarak, bir güneş hücresinin R_s ' si mümkün olduğu kadar düşük olmalı ve ayrıca yüksek FF ve yüksek verim elde etmek için R_{sh} olabildiğince büyük olmalıdır. R_{sh} , genellikle p-n bağlantısının kısmi şöntlenmesi ve şönt direncinin azaltılmasıyla sonuçlanan süreçten kaynaklı kusurlardan kaynaklanır. Bu düşük şönt direnci, p-n bağlantısından akan fotoakım miktarını azaltır ayrıca güneş hücresinin voltajını da azaltmaktadır.

2.4.5 Rekombinasyon kayıpları

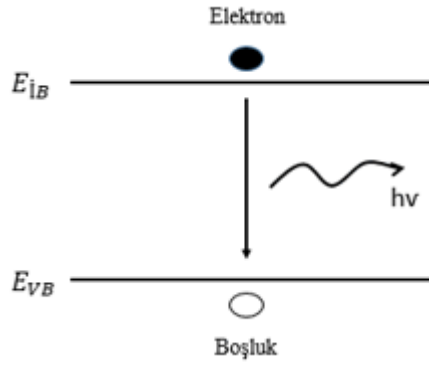
İletim bandında bulunan bir elektronun güç üretimine katılmadan değerlik bandında bulunan bir boşlukla birleşip birbirini yok etmesi olayı rekombinasyon kaybı olarak

adlandırılmaktadır. HIT güneş hücrelerinde dört farklı rekombinasyon türü vardır. Bunlar;

- Radyatif (Işımalı) rekombinasyon
- Auger rekombinasyonu
- Shockley-Read-Hall (SRH) rekombinasyonu
- Yüzey rekombinasyonudur.

Radyatif (Işımalı) Rekombinasyon

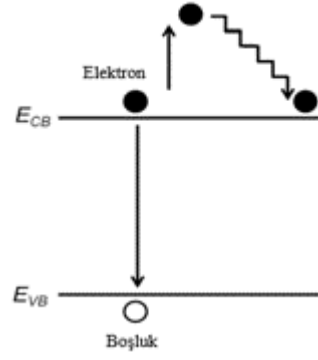
Işınımlı rekombinasyonda, iletim bandından uyarılmış bir elektron doğrudan tekrar değerlik bandına düşer. Hareket eden elektron, enerjisi bir foton şeklinde serbest bırakır (Şekil 2.7). Bu rekombinasyonun oranı, iletimdeki taşıyıcıların sayısına ve değerlik bandındaki boş durumların sayısına bağlıdır. Bu rekombinasyon işlemi doğrudan bant aralığı yarı iletkenlerinde baskındır, ancak Si gibi dolaylı bant aralığı malzemesinde önemli değildir.



Şekil 2.7. Işınım rekombinasyonunun enerji bandı diyagramı

Auger Rekombinasyon

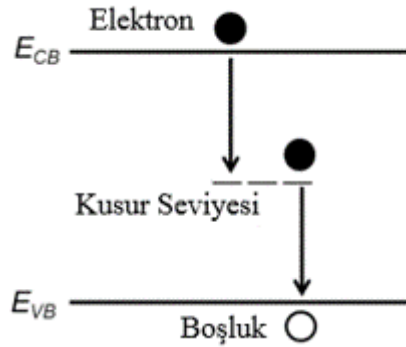
Bu, yüksek taşıyıcı konsantrasyonlarında ($> 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) meydana gelir. Şekil 2.8'de gösterildiği gibi, bir elektron ve bir boşluk yeniden birleştiğinde ve enerjisi ısı veya bir foton olarak vermek yerine, iletim bandında başka bir elektrona verir. Enerjisi alan elektron daha yüksek bir enerji seviyesine gider ve daha sonra saçılma yoluyla tekrar iletim bandına döner.



Şekil 2.8. Auger rekombinasyonunun enerji bandı diyagramı

Shockley-Read-Hall (SRH) rekombinasyonu

SRH rekombinasyonu, bant aralığı içindeki enerji seviyelerine neden olan kusurlu malzemede meydana gelir. SRH rekombinasyonu, Şekil 2.9'da gösterildiği gibi iki aşamadan oluşur. Birincisi, bir elektron (veya boşluk) kusurların ortaya çıkardığı enerji seviyesinde bir enerji tarafından tutulur. Bir elektron, iletim bandına yeniden yayılmadan önce boşluk aynı enerji durumuna ilerlerse, yeniden birleşir. Orta aralıktaki enerji seviyeleri vasıtasıyla yeniden birleştirme, toplu kullanım ömrünün azaltılmasında çok etkilidir.

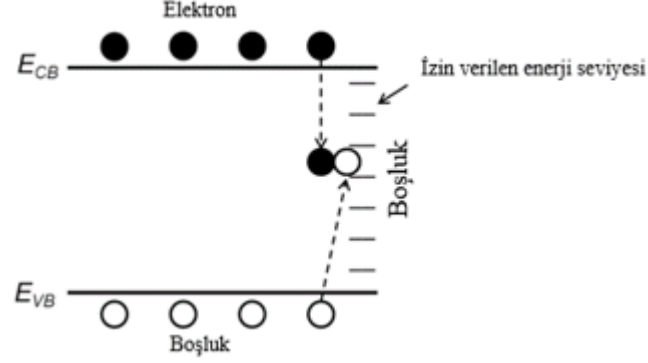


Şekil 2.9. SRH rekombinasyonunun enerji bandı diyagramı

Yüzey rekombinasyonu

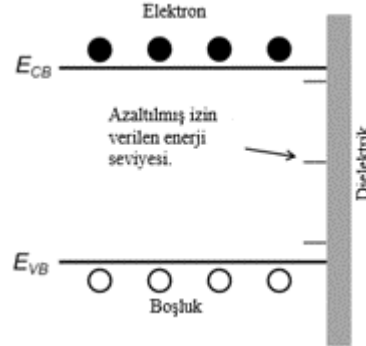
Si yüzeyi, çok sayıda sarkan bağ ile kristal düzeneğinin ani süreksizliğini sağlar; bu da, derin boşluklara neden olur veya yasak aralık içindeki kusurlu durumları ortaya çıkarır (Şekil 2.10) (Green, 1998). Bu bağlar bir rekombinasyon bölgesi olarak işlev görür. Bu

nedenle, hem ön hem de arka Si yüzeylerin rekombinasyonunu önlemek için bağlar pasifize edilir. Uygulamada, yüzey rekombinasyonu iki pasivasyon şeması ile azaltılabilir; Bunlar kimyasal pasivasyon ve alan etkisi pasivasyonudur.



Şekil 2.10. Si yüzeyinde rekombinasyon kaybı şematik gösterimi

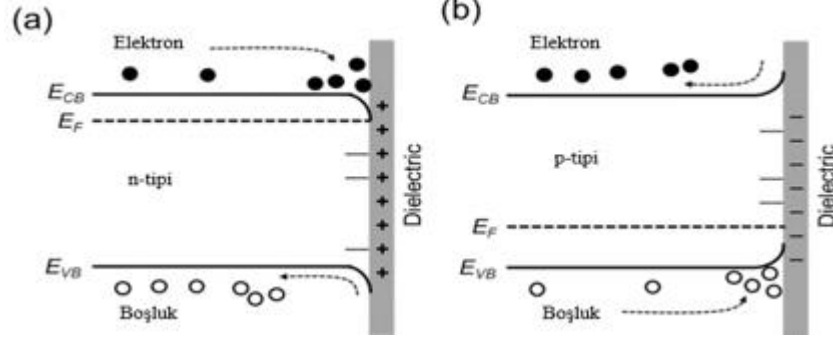
Kimyasal pasivasyon, Şekil 2.11'de gösterildiği gibi, yüzey durumlarının yoğunluğunu azaltan ince dielektrik film biriktirilerek Si yüzeylerinde sarkan bağların etkisizleştirilmesini içerir. Bu amaçla termal olarak üretilen silisyum dioksit (SiO_2), SiN_x ve alüminyum oksit (Al_2O_3) kullanılabilir. Bu dielektriklerin doğru kombinasyonu, yüksek verimlilik için mükemmel yüzey pasivasyonu sağlayabilmektedir.



Şekil 2.11. Kimyasal pasifleştirilmiş Si yüzeyinin şeması

Alan etkisi pasivasyonu, Si yüzeyindeki elektron veya boşluk konsantrasyonunun, yerleşik bir elektrik alanı kullanarak azaltılmasına dayanır. Elektrik alanı, Si yüzeyinden taşıyıcıları çekerek veya iterek biriktirme veya ters katmaya neden olabilir. Yüzeydeki bu yük birikmesi veya tersine çevrilmesi rekombinasyonu azaltır, çünkü Si yüzeyindeki elektron ve boşluk konsantrasyonları eşit olduğunda rekombinasyon hızı maksimumdur. Birikme tipik olarak tercih edilir, çünkü inversiyon tabakası, parazitik şantın oluşmasına

neden olan temasla bükülebilir (Meemongkolkiat, 2008). p-tipi yüzeyde negatif yüklü dielektrik (örneğin Al_2O_3) veya n-tipi yüzey üzerinde pozitif yüklü dielektrik (SiO_2), silisyum yüzeyinin altında birikme oluşturdıkları için arzu edilir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. (a) n-tip Si üzerinde pozitif yüklü bir dielektrik ve (b) p-tip Si üzerinde negatif yüklü bir dielektrik için bant diyagramlarının şeması

BÖLÜM III

YÜZEY DESENLENDİRMESİ

3.1 Yüzey Desenlendirmeye Giriş

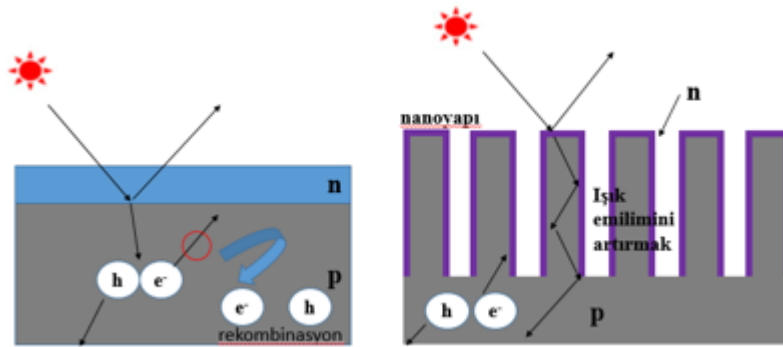
Son yıllarda, güneş enerjisinin ve özellikle fotovoltaik teknolojinin önemi giderek artmaktadır. c-Si tabanlı güneş hücresi ise fotovoltaik teknolojide en çok kullanılan güneş hücrelerdir. Ancak c-Si güneş hücrelerinde alttaş kalınlığının performansı düşürmesi ve malzeme maliyeti yaygın uygulama alanlarını kısıtlamaktadır (Hong vd., 2014). Bu yapılarda alttaş kalınlığı, azınlık taşıyıcı difüzyonu ve yeterli ışık Emilimi arasında uzunluk farkına neden olmaktadır. Bu sorunları en aza indirmek ve c-Si fotovoltaik cihazların performansını arttırmak için nano-yapılandırma stratejileri benimseyen birçok yeni çalışma yapılmaktadır (Kayes vd., 2005; Peng vd., 2005; Peng vd., 2006; Hong vd., 2014). Nano-yapısal çalışmalar üzerine iki farklı yaklaşım sunulmuştur bunlar; aşağıdan-yukarı (bottom-up) ve yukardan-aşağı (top-down) nano yapı üretim yöntemleridir. Bu üretim işlemleri, nano yapıların ışık Emilimini arttırmaya ve Auger rekombinasyonuna uygun bir Si kalınlığına sahip olmasını gerektirmektedir. Nano yapıların üretiminde rastgele piramit, nano-tel ve nano-kon dizi yapıları % 90'ı aşan ışık Emilimi ile mevcut sonuçları geride bırakmaktadır (Hong vd., 2014).

c-Si'nin bant boşluğundan dolayı fotonların farklı dalga boylarında Emilmesi için 10 ila 1000 μm alttaş kalınlığına sahip olması gerekmektedir. Ancak bu kalınlıkta, elektron – boşluk çiftleri c-Si yüzeyindeki Auger rekombinasyonu yoluyla kolayca Şekil 3.1(a)'da gösterildiği gibi yeniden birleşebilir (Werner vd., 1995; Herzinger vd., 1998; Tsakalacos, 2008).

Fakat c-Si alttaş kalınlığı, PV cihazların üretim maliyetini önemli ölçüde artırmaktadır. Toplam üretim maliyetinin ~% 40'ını oluşturmakta ve bu endüstriyel kullanım için güneş hücresi ticaretinin büyümesini engellemektedir (Han ve Chen, 2010). Bu nedenle, a-Si:H için katkılama tekniklerinin geliştirilmesi, konvansiyonel ince film biriktirme teknikleri hacimli Si tabanlı güneş hücresinden daha fazla Emilim gösterdiğinden büyük dikkat çekmiştir (Okano, 1981; Chopra vd., 2004). Farklı bir spektrumda bu yüksek ışık Emilimi, tüm optik geçişe izin veren malzemedeki yüksek yapısal düzensizlikten kaynaklanırken,

düzensizlik eş zamanlı olarak taşıyıcı ömrünü büyük ölçüde azaltan rekombinasyonun çekirdek parçası olarak görev yapmaktadır (Shah vd., 1995; Chopra vd., 2004). a-Si:H'un kaplanması sırasında, içerdiği hidrojenin %10'u yoğunluğunu büyük ölçüde azaltmıştır, bu nedenle a-Si:H ince film güneş hücrelerinin yüzeyi için en uygun malzemeler yani nano yapılar olduğu düşünülmektedir (Chopra vd., 2004).

c-Si ince film güneş hücrelerinde olduğu gibi, azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğu 300 nm uzunluğa sahip olmadığından, yeterli ışık spektrumunu absorbe etmek için 1 μm 'den daha fazla kalınlığa sahip olmalıdır (Zhu vd., 2009). Yeterli ışık emilimi ve difüzyon uzunluğu arasındaki bu fark, ışık emiliminin yetersizliği ve elektrotlardaki taşıyıcı koleksiyonunun kaybı nedeniyle c-Si güneş hücrelerinde güç üretiminin önemli ölçüde azalmasına neden olur. Bu nedenle, birçok araştırmacı bu boşluk mesafesini azaltmaya çalışır ve daha sonra nano yapı üretmeyi (nanowire, nanorod, nano, nanocone ve nanodelik) bir çözüm olarak kabul etmektedir. Bu strateji çoğunlukla çeşitli dalga boylarında ışık emilimini arttırmak ve c-Si güneş hücrelerinde fotonların difüzyon uzunluğunu arttırmak için yardımcıdır (Hu ve Chen, 2007; Li vd., 2009). Şekil 3.1 (b)'de gösterildiği gibi nanotel, genellikle 1 ~ 50 μm yüksekliğe ve 10 ~ 500 nm çapa sahiptir ve ince film c-Si güneş hücrelerinde ışık emiliminin yeterli kalınlığına izin verir (Kayes vd., 2005). Ayrıca c-Si güneş hücreleri için daha fazla ışık emilimini sağlayan teknikle karşılaştırıldığında, nano yapılı ince film ARC'den daha fazla avantaja sahiptir (Zhu vd., 2009).



Şekil 3.1. (a) Yüzeyde Auger rekombinasyonuna yol açan ve uzun difüzyon yoluna sahip olan geleneksel Si altaş, (b) Nano yapılı c-Si altaş, geniş dalga boyu bölgesinde kısa difüzyon uzunluğu ve arttırılmış ışık emilimine sahiptir

Nano yapılar üzerine çalışan araştırmacıların birçok farklı yöntem kullanması ayrıca istenen nanotel yapısını üretmek için kullanılan yöntemlerin güvenilir sonuçlar göstermiş

olsa da iki önemli dezavantaj içermektedir. İlk olarak yüksek donanım maliyeti ikinci olarak ise alan sınırlamasıdır. Nano malzemelerin imalatı için pahalı kurulumların kullanılması ve elektronik sistemlerin performansında son derece büyük bir gelişme sağlanmadıkça üretimin başlangıç aşamasına aykırı olacaktır. Alan sınırlamasında ise ticari boyutta yapılan uygulamaları etkileyen başka bir faktördür. Nano yapılar yalnızca kullanılan büyütme aparatının haznesi kadar alanda üretilebilmektedir. Bu yöntemler kullanılarak laboratuvar ölçeğinde çalışmalar gerçekleştirilebilmektedir. Ortaya çıkan malzeme kaliteli, güvenilir ve tekrar üretilebilirlik için yeni yöntemler tasarlanmalı aynı zamanda pahalı kurulumlar içermemelidir.

3.2 Yüzey Desenlendirme Kullanılan Üretim Yöntemleri

Genel olarak c-Si güneş hücrelerinde nano yapıların üretim adımları ikiye ayrılabilir: Aşağıdan-yukarı katkılama ve yukardan-aşağı aşındırma yöntemleri kullanılmaktadır. Çizelge 3.1’de aşağıdan-yukarı katkılama ve yukardan-aşağı aşındırma yöntemlerinin neler olduğu gösterilmiştir. Yaygın olarak kullanılan üretim yöntemleri açıklamaları ile birlikte alt başlıklar halinde verilmiştir.

Çizelge 3.1. Yüzey desenlendirmede kullanılan yöntemler

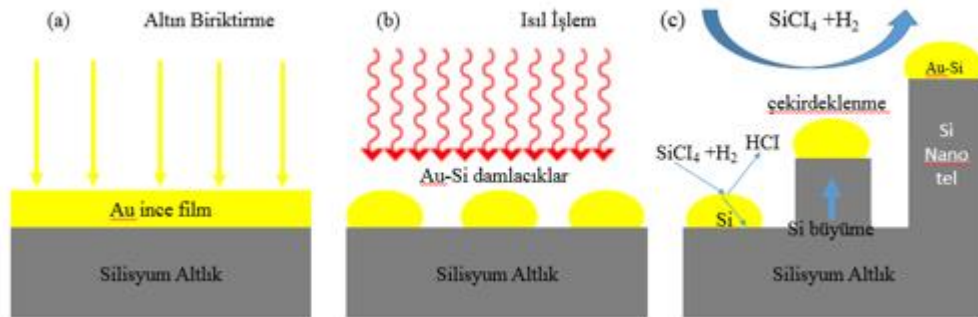
Yüzey Desenlendirme Kullanılan Üretim Yöntemleri	
Aşağıdan-yukarı (Bottom-up) katkılama yöntemleri	Yukarıdan-aşağı (Top-down) aşındırma yöntemleri
<ul style="list-style-type: none"> • Buhar-Sıvı-Katı (VLS) • Elektron Demetiyle Buharlaştırması • Termal Buharlaştırma • Moleküler Demet Epitaksi • Lazer ile Uzaklaştırma • Solüsyon-Sıvı-Katı (SLS) • Katı-Sıvı-Katı 	<ul style="list-style-type: none"> • Alt Baskı • Reaktif İyon Aşındırma (Plazma Aşındırma) • Testere Kalıntılarının Aşındırması • Litografi • Alkalin Aşındırma (Rastgele Piramit Yöntemi) • Metal Destekli Kimyasal Aşındırma

3.2.1 Aşağıdan-yukarı (Bottom-Up) katkılama yöntemleri

Bu bölümde sık kullanılan aşağıdan-yukarı katkılama yöntemleriyle nano yapıların üretimi alt başlıklar halinde verilecektir.

3.2.1.1 Buhar-Sıvı-Katı (Vapor-Liquid-Solid (VLS)) katkılama yöntemi

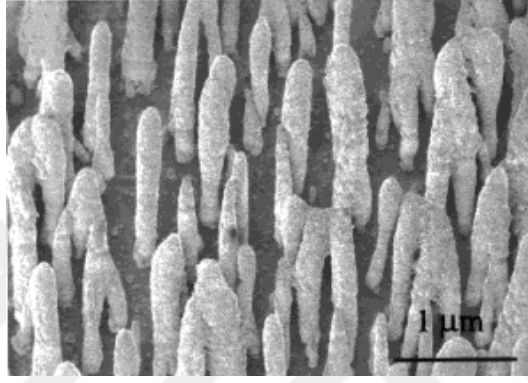
Buhar-katı-sıvı (VLS) yöntemi ilk olarak 1960'larda Wagner ve Ellis tarafından geliştirilmiştir. Daha sonra Lieber ve arkadaşları silisyum nanotel üretimi için aşağıdan-yukarı yaklaşıma dayalı yeni bir yöntem belirlemiştir (Martensson vd., 2003). Bu VLS yöntemidir ve yüksek tekniklerle bir araya getirilmiş ve geliştirilmiştir. VLS işleminde genellikle, PVD ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemler genellikle bir vakum sistemi içerisinde ve içinden reaktif bir gazın aktığı sistemlerden oluşmaktadır. c-Si üzerine kaplanmış ince bir altın (Au) filmi gerektirmekte ve Au genellikle katalizör olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.2'de gösterildiği gibi, VLS işlemi püskürtme veya buharlaştırma ile biriktirilen yaklaşık 1 ila 10 nm kalınlıkta Au film kullanılmıştır. Daha sonra, biriktirilmiş Au filmi ısı işlem uygulanmış ve her bileşim malzemesine kıyasla daha düşük erime sıcaklığına sahip Au-Si alaşım damlacıkları oluşturulmuştur. Bu nedenle, sıcaklık kolay eriyebilen noktadan (363°C) yüksek olduğunda Si-Au alaşım damlacık sıvı hale dönmektedir. Silan ve hidrojen buharı, Au-Si alaşım sıvı yüzeyine tutunmuş olur ve gaz karışımını ($\text{SiH}_4 + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{Si} + 4\text{HCl}$) katalitik yardımıyla reaksiyona sokar. Reaksiyonun bir sonucu olarak, Si ve HCl oluşur. Si, Au-Si alaşım damlacıklarına yayılır. Daha sonra bir boyutlu kristal nanotel, bir sıvı metal alaşım damlacık tarafından büyütülür. Si atomları, Si sıvı alaşım damlacıkları eksensel kristal büyümesine yol açan sıvı-katı ara-yüzünde çekirdeklenir ve nanotel üretimi gerçekleştirilmiş olur (Xia vd., 2003; Lee ve Geer, 2010).



Şekil 3.2. Si nanotel büyüme sürecinin şeması, (a) Si alttaş üzerine PVD ile Au ince film kaplanması, (b) Au-Si damlacıklarının ısı işlemle elde edilmesi ve (c) Si nanotellerin SiH₄ ve H₂ buhar fazlarının reaksiyona girerek büyümesi

3.2.1.2 Termal buharlaştırma ile katkılama yöntemi

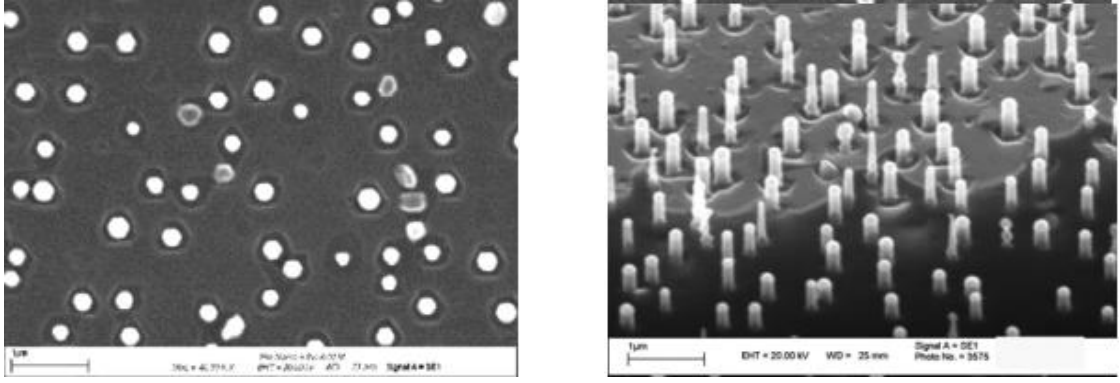
Termal buharlaştırma yöntemi genellikle Si nanotel oluşturmak için kullanılan bir yöntemdir. Yüksek sıcaklıklarda nanotel üretimi gerçekleşmektedir. Farklı iki fırın haznesi sırasıyla 1350 °C ila 900 °C sıcaklıklara kadar ısıtılmaktadır. Yüksek sıcaklıkta olan fırın haznesine SiO₂ yerleştirilerek buharlaştırılır. Buharlaşan SiO₂ asal bir gaz yardımıyla sıcaklığı düşük fırın içerisine taşınır. Daha sonra fırın içerisinde Si ve SiO₂ olarak birbirinden ayrılarak nanotel oluşumu gerçekleşir (Şekil 3.3) (Pan vd., 2001).



Şekil 3.3. Termal buharlaşma yöntemi kullanılarak oluşan nanotellerin SEM görüntüleri

3.2.1.3 Moleküler demet epitaksi (MBE) katkılama yöntemi

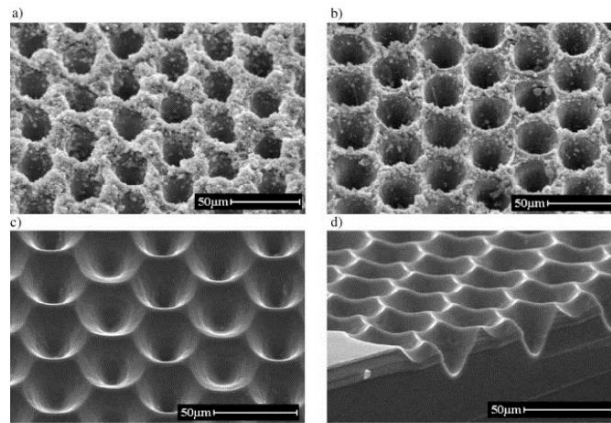
Moleküler demet epitaksi yönteminde katı halde ve yüksek saflıkta bulunan Si buharlaşana kadar ısıtılmaktadır. Daha sonra alttaş yüzeyine gönderilen gaz halindeki Si atom demeti absorbe edilerek kristalleştirilir. Hazne içerisindeki etkileşimleri engellemek için yüksek vakumda ya da ultra yüksek vakum altında çalışılmaktadır (Werner vd., 2006). CVD yönteminde olduğu gibi Si atomları kat kat birleşerek Si nanotel dizeleri oluşturulur. CVD yönteminden farklı olarak MBE yönteminde metal katalizör kullanılmamaktadır. Bu yöntemin en önemli dezavantajı oluşan Si nanotel çaplarının en az 40 nm olması ve nanotellerin büyüme hızının çok yavaş olmasıdır (Şekil 3.4) (Schubert vd., 2004; Werner vd., 2006).



Şekil 3.4. MBE ile üretilen nano yapıların SEM görüntüleri: üstten görünüm (solda) ve yatay görünüm (sağda) (Naumova vd., 2008)

3.2.1.4 Lazer ile uzaklaştırma yöntemi

c-Si güneş hücrelerinin yüzey dokusunu oluşturabilmek için lazer ile uzaklaştırma yöntemi ilk kez Zolper ve arkadaşları tarafından uygulanmıştır (Zolper vd., 1989). Lazer ile uzaklaştırma yöntemi, kristalografik yönelimden bağımsız olarak bir silisyum alttaş yüzeyini şekillendirecek izotropik bir yöntem olup iki aşamada gerçekleştirilmektedir (Abbott ve Cotter, 2006). İlk olarak, Si'nin toplu bölgelerden çıkarmak için darbeli bir lazer kullanılır. Daha sonra, Si yüzeyinde aşınan çukurları düzleştirmek, cürufaları temizlemek ve lazer hasarından dolayı oluşan kalıntıları ortadan kaldırmak için sodyum hidroksit (NaOH), nitrik asit (HNO_3), asetik asit (CH_3COOH) ve HF kullanılarak yüzeyden uzaklaştırıldıktan sonra nano yapı elde edilmektedir (Şekil 3.5).

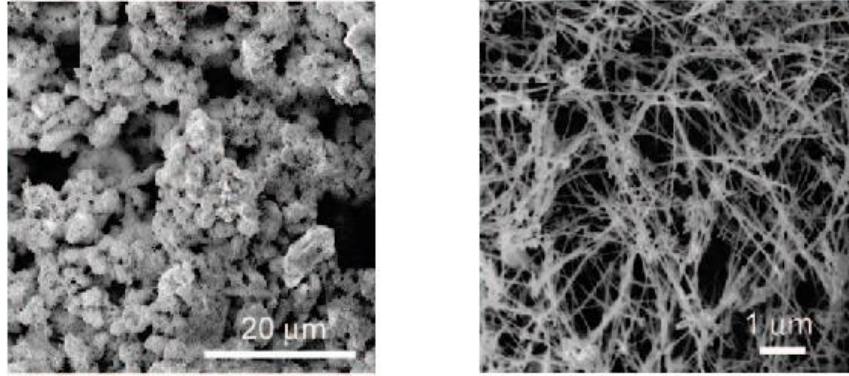


Şekil 3.5. Lazer uzaklaştırma yöntemi kullanılarak üretilen nano yapıların SEM görüntüleri: (a) aşındırma işleminden sonra oluşan doku; (b) NaOH asidinden sonra oluşan doku; (c) asit işleminden sonra oluşan doku; (d) oluşan dokunun kesiti (Abbott ve Cotter, 2006)

3.2.1.5 Solüsyon-Sıvı-Katı (Solution-Liquid-Solid (SLS)) katkılama yöntemi

Solüsyon-sıvı-katı (SLS) büyüme yöntemi VLS yöntemi ile benzerlikler göstermektedir. Buhro ve arkadaşları nano telin VLS yönteminden daha düşük bir sıcaklıkta sentezi için SLS yöntemini geliştirmiştir. VLS yönteminden farklı olarak SLS yöntemimde metal nanoteller üretilmekte ve büyük ölçekli üretimde üretim maliyetini düşürebilmektedir. Ayrıca SLS, düşük erime sıcaklığına sahip metal katalizörün kullanılmasını kolaylaştırır ve istenen materyalin çözelti içerisinde ayrıştırılmasıyla üretilebilir.

SLS yöntemini kullanarak Si nanotelin üretim yönteminde Au metal katalizör olarak görev yapar ve Si alttaş hegzan ile kritik nokta üzerinde ısıtılıp basınçlandırıldığında dağıtılır. Daha sonra, Si nanotelleri büyütme için çekirdek bölgelerinde homojen bir şekilde dağılmış alkanetiol uçlu Au tekli kristaller yer alır. Au konsantrasyonu Si'nin konsantrasyonunda % 18.6 mol daha yüksek olduğunda ötektik noktanın sıcaklığındadır ve yaklaşık 430 °C'dir. Au bir denge halinde katı Si ile bir alaşım fazında oluşturulur. Sonuç olarak, Au nanokristallerde süper doygunluğa ulaşınca kadar Si atomları eritilir ve homojen nanoteller Au-Si alaşım parçacıklarından uzanan Si ile nano yapılar oluşturulmaktadır (Şekil 3.6) (Trentler vd., 1995; Seeger ve Palmer, 1999; Holmes vd., 2000).



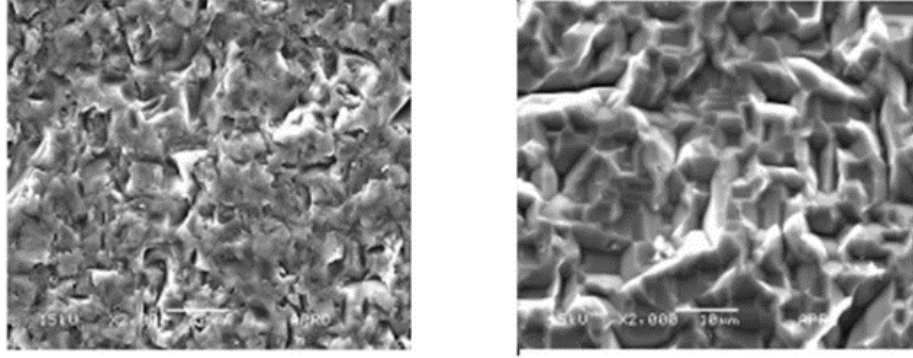
Şekil 3.6. SLS yöntemi ile üretilmiş nano yapıların SEM görüntüleri (Heitsch vd., 2008)

3.2.2 Yukardan-aşağıya (top-down) aşındırma yöntemleri

Bu bölümde sık kullanılan yukardan-aşağıya (top-down) aşındırma yöntemleriyle üretilen nano yapıların üretimi alt başlıklar halinde verilecektir.

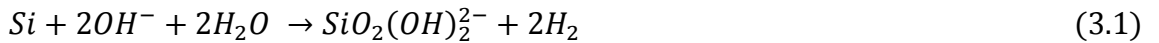
3.2.2.1 Testere kalıntılarının aşındırılması (Saw damage etching)

Hücre üretimine geçmeden İngot durumundan kesilerek Si dilim haline getirilen Si dilim yüzeyde testere kalıntıları oluşmaktadır. Bu testere kalıntıları Si dilim yüzeyinde hasara neden olurken güneş hücresinin performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Elmas tel testere kullanılarak kesilmiş bir Si dilim yüzeyinin testere kalıntılarının aşındırılmamış ve aşındırılmış durumları Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



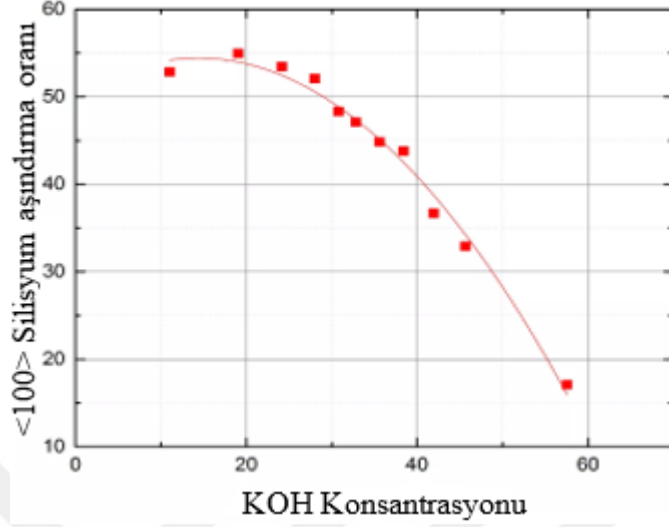
Şekil 3.7. Testere kalıntılarının Si dilim üzerindeki hasarın SEM görüntüleri: testere kalıntısından aşındırılmamış yüzey (solda), testere kalıntısından aşındırılmış yüzey (sağda) (Iftiqar vd., 2012)

Hücre üretiminden önce, Si dilimin her iki yüzeyi ıslak alkalin aşındırma işlemi uygulanması gerekmektedir. Testere kalıntılarının yüzeyden atılması için kullanılan en yaygın çözeltiler, saf su ile seyreltilmiş sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH) veya tetrametilamonyum hidroksit (TMAH)'tir. Bu çözeltiler içerisinde reaksiyon süreci boyunca, OH⁻ ve H₂O reaksiyonda kilit rol oynamaktadır.



Aşındırma oranı OH⁻ ve H₂O konsantrasyonlarına bağlıdır. OH⁻ oranı arttıkça H₂O oranında azalma olması nedeniyle aşındırma oranında da bir azalma gözlenmektedir. Şekil 3.8'de uygulanan kimyasal işlemde dağılma oranının belirli noktadan sonra saf su eksikliğinden dolayı konsantrasyonla düştüğü gösterilmektedir. KOH'un aşındırma oranı oda sıcaklığında 1 A/s'den düşük bir değere sahipken yüksek sıcaklıklarda %40 KOH'da 2000 A/s'ye kadar değişebilmektedir. Testere hasarı kalıntılarının aşındırılmasında KOH çözeltisi %30-40 saflıkta ve 70-80 °C'de tutulmaktadır. Aşındırma sırasında çözelti

oranına, aşındırma süresine dikkat edilmelidir. Aksi durumda Si dilim kalınlığının incelmesine neden olmaktadır.



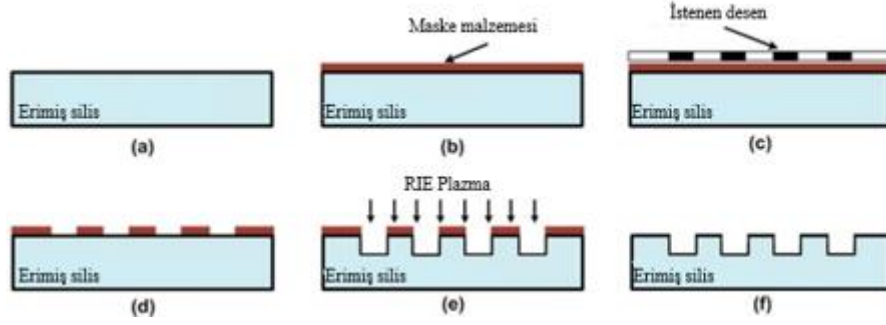
Şekil 3.8. 72 °C'de KOH konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak <100> silisyum kristal yapısının aşınma hızı (Ma vd., 2001)

3.2.2.2 Reaktif iyon aşındırma yöntemi (RIE) (Plazma yöntemi)

Reaktif iyon aşındırma yöntemi plazma yöntemi olarak da adlandırılmaktadır. Hassas bir şekilde kontrol edilebilir ve mikrofabrikasyonda kullanılan bir aşındırma teknolojisidir. RIE kuru aşındırma yöntemlerinden biridir (Winters, 1978). Bu aşındırma yönteminde alttaşlarda biriken materyali çıkarmak için kimyasal olarak reaktif plazma kullanılmaktadır. Plazma elektromanyetik alan içerisinde düşük vakum altında üretilir. Plazmada bulunan yüksek enerjili iyonlar alttaş yüzeyiyle reaksiyona girer. Nano yapıların oluşması için flor bazlı veya klor bazlı gazlar kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan karışımlar arasında kükürt heksaflorür (SF_6), azot oksit (N_2O) ve klor (Cl_2) bulunmaktadır. Bunların yanı sıra azot triflorür (NF_3 / N_2) ve oksijen (O_2 / N_2) gaz karışımları gibi başka karışımlar da kullanılabilir (Park vd., 2009; Yoo vd., 2013). Bu gazlar arasında kükürt heksaflorür genellikle silisyum aşındırılmasında kullanılan gaz karışımıdır.

Plazma yoğunluğu aşındırmanın yönünü belirlemekte ve bu nedenle, izotropik aşındırma genellikle orta derecede RF gücü gerektirirken, anizotropik aşındırma güçlü plazma

yoğunluğuna ihtiyaç duymaktadır (Lo ve Huang, 1993). Şekil 3.9’da RIE yöntemiyle üretilmiş nano yapıların üretim aşaması gösterilmektedir.



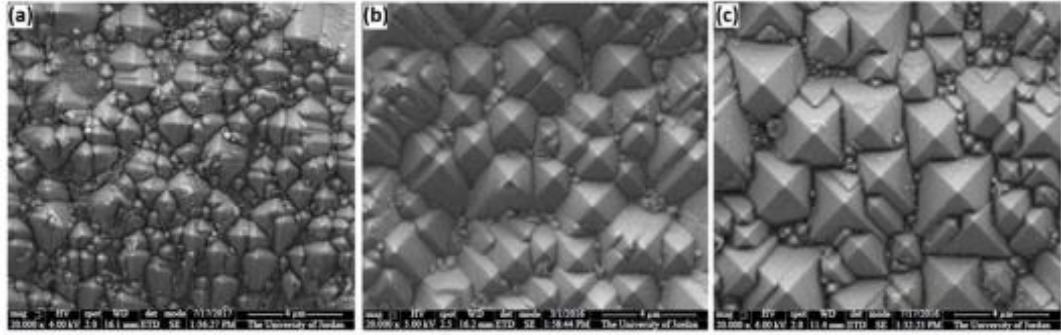
Şekil 3.9. Reaktif iyon aşındırma yöntemi (RIE) (a) Alttaş temizliği; (b) Maske malzemesinin kaplanması; (c) İstenilen desenin aktarılması; (d) alttaş yüzeyinde istenilen kalıbın elde edilmesi; (e) reaktif iyon dağlama; (f) maske atıklarının çıkarılması (Li vd., 2018)

3.2.2.3 Alkalin aşındırma yöntemi (Rastgele piramit yöntemi)

PV endüstrisi, güneş hücreleri üretmek için c-Si tabanlı güneş hücrelerine ihtiyaç duymaktadır. HIT güneş hücrelerinde de ışığın yüzeye çarpıp yansması ana kayıplardan biri haline gelmiştir. Bu optik kaybın azaltılması için çok çaba sarf edilmiştir (Liu vd., 2014b). Si alttaş yüzeyinin desenlendirilmesi, gelen ışığın yansımada hücre içerisinde absorbe olacağından elektrik akımına olumlu yönde etkisi olacak ve dönüştürme verimliliğini artıracaktır. Si alttaşın anizotropik aşınması, ön yüzeydeki yansıma kayıplarını azaltmak için endüstriyel c-Si tabanlı güneş hücrelerinin üretiminde geniş bir yer tutmaktadır (Sievert vd., 2009).

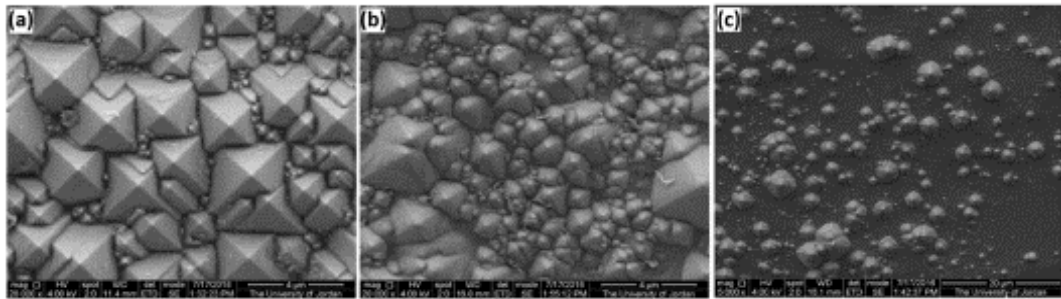
c-Si alttaş için anizotropik eterler, ana bileşeni bir organik veya inorganik bir bileşik olabileceği sulu alkalin çözeltileridir (Singh vd., 2001). İnorganik çözeltiler arasında, izopropil alkol (IPA), sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH) ve tetrametilamonyum hidroksit (TMAH); genellikle kullanılan kimyasal solüsyonlardır (Al-Husseini ve Lahlouh, 2017). Fakat KOH veya KOH/IPA kimyasal solüsyonunun kullanılmasının bazı avantajları mevcuttur bunlar; kullanımının basitliği, düşük maliyetli oluşu ve homejen aşındırma oranı gibi avantajlara sahiptir (Al-Husseini ve Lahlouh, 2017). Alkali etizör olarak KOH ve yüzey aktif madde olan IPA kullanılarak alkalin anizotropik aşınmaya dayanan desenlendirme işlemi araştırılmıştır (Al-Husseini ve Lahlouh, 2017).

Al-Husseini ve Lahlouh (2017) yansımanın piramit yapısının şekline bağlı olduğu en düşük yansıma seviyesini elde etmek için yüzey desenlendirme işlemini optimize etmeyi düşünmüş ve piramit yapı şeklinin iyi kontrolü, çözelti konsantrasyonu, sıcaklık ve aşındırma süresi gibi aşındırma koşullarının dikkatlice tasarlanmasını gerektirdiğini belirtmiştir. Desenlendirme işlemi; ağırlıkça (wt) %20-36 KOH (± 0.14) ve %3 IPA (± 0.1) konsantrasyonu içerisinde, 60-80°C arasında ki sıcaklık değerinde ve 20-40 dk arasında aşınma süresinde gerçekleştirmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Şekil 3.10'da 80°C'de, konsantrasyon oranları ağırlıkça %20 KOH ve %3 IPA solüsyonunda farklı sürelerde yüzey desenlendirilmesi gözlemlenmiştir.



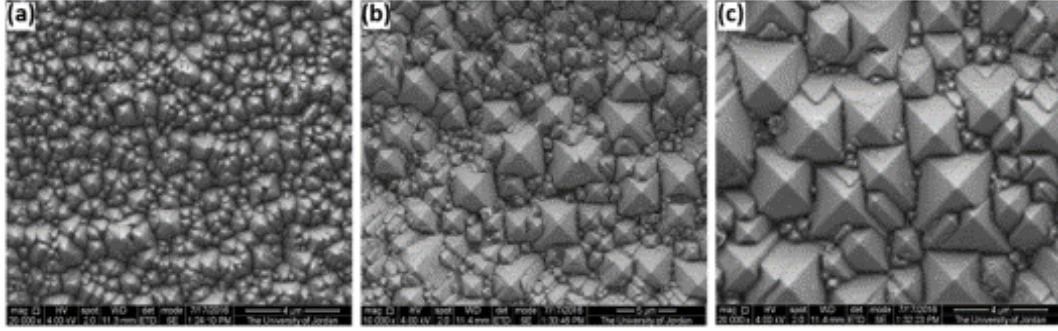
Şekil 3.10. 80°C'de ağırlıkça %20 KOH ve %3 IPA solüsyonunda desenlendirilmiş Si alttaş yüzeyinin SEM görüntüleri 20 dk (a), 30 dk (b), 40 dk (c) (Al-Husseini ve Lahlouh, 2017)

Yapılan çalışmada aşındırma süresinin 40 dakikada ve sıcaklık değerinin 80°C'de iyi sonuçlar gözlemlenmiş ve bu değerler sabit tutulmuş, KOH oranlarında değişiklik yapılarak oluşan Si alttaş yüzeyinin desenlendirilmesi sağlanmış ve KOH oranının Si alttaş üzerindeki etkisi incelenmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. 80°C'de ve 40 dk aşındırma süresi ile ağırlıkça %20 KOH (a), %24 KOH (b) ve %28 KOH (c) ve %3 IPA solüsyonunda desenlendirilmiş Si alttaş yüzeyinin SEM görüntüleri (Al-Husseini ve Lahlouh, 2017)

Aşındırma süresinin 40 dakika olması beklenen sonuçların elde edildiğini göstermiştir. Diğer çalışmada konsantrasyon oranında değişikliğe gidilmiş ve %20 KOH + %3 IPA solüsyonunda beklenen yapı elde edilmiştir. %20 KOH + %3 IPA oranı sabit tutulmuş, konsantrasyon sıcaklığı değerlerinde değişiklik yapılarak oluşan Si alttaş yüzeyin desenlendirilmesi sağlanmış ve sıcaklığın etkisi incelenmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. 40 dk aşındırma süresi ile ağırlıkça %20 KOH + %3 IPA solüsyonu kullanılarak, 60°C (a), 70°C (b) ve 80°C (c) desenlendirilmiş Si alttaş yüzeyinin SEM görüntüleri (Al-Husseini ve Lahlouh, 2017)

Yapılan çalışmalarda silisyum yüzeyinde piramit yapı üretmek amacıyla yüzey dokularını etkileyen faktörler üzerinde çalışılmış. Yüzey morfolojisi piramit doku boyutunun KOH konsantrasyonu, sıcaklık ve aşındırma süresine göre değiştiğini göstermektedir. Optimize edilen sonuçlara göre ağırlıkça %20 KOH ve %3 IPA solüsyonunda, 40 dakikalık aşındırma süresinde ve 80°C sıcaklıkta güvenilir sonuçlar elde edilmiştir (Al-Husseini ve Lahlouh, 2017). Si yüzeyinin 550-840 nm dalga boyu arasında gelen ışığın yansımaya oranı % 11'e kadar düşürülmüş olup güneş hücreleri ve fotovoltaik uygulamalar için avantajlı hale getirilmiştir.

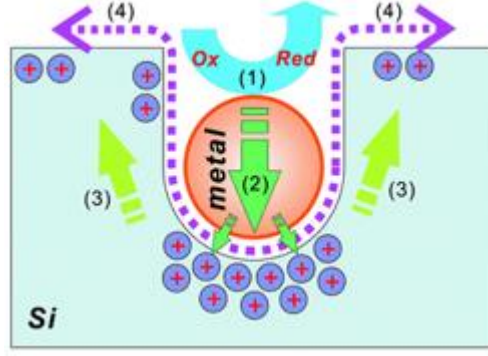
3.2.2.4 Metal destekli kimyasal aşındırma yöntemi (MacEtch) (Elektriksiz aşındırma yöntemi (EE))

Metal destekli kimyasal aşındırma yöntemi (MacEtch) ilk olarak 1997'de Dimova Malinovska ve arkadaşları tarafından uygulanmıştır (Dimova-Malinovska vd., 1997). Bu fikir silisyum alttaş üzerine alüminyum kaplanarak HF, nitrik asit (HNO₃) ve saf su içeren bir çözeltiyle silisyum yüzeyi desenlendirilmiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre kullanılan Al filmi nedeniyle yüzey deseni oluşum oranının da olumlu bir artış oluşmuştur. Bu çalışmadan hemen sonra Li ve Bohn, 2000 yılında Al yerine Au ve paladyum (Pd) gibi

asil metaller kullanarak bu yöntem üzerinde ayrı ayrı çalışmışlar yapmıştır. Kullanılan bu metallerin HF, H₂O₂ ve etanol (EtOH) çözeltisi ile nasıl reaksiyona girdiğini incelemiş (Li ve Bohn, 2000) ve silisyum alttaş üzerinde daha keskin ve düz gözenekler elde etmişlerdir. Bu MacEtch yöntemindeki gelişmeler ve desenlendirilmiş Si alttaş özellikleri, diğer araştırmacıları da etkilemiş ve bu uygun maliyetli yöntem kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemin arkasındaki fikir, metal bir elementle kaplanmış silisyum alttaş yüzeyinin HF ve bir oksitleyici maddeye maruz bırakılmasıdır, bu da silisyum alttaş'ın metalle kaplanmayan bölgelerinin hızlı bir şekilde aşınmasına neden olmaktadır.

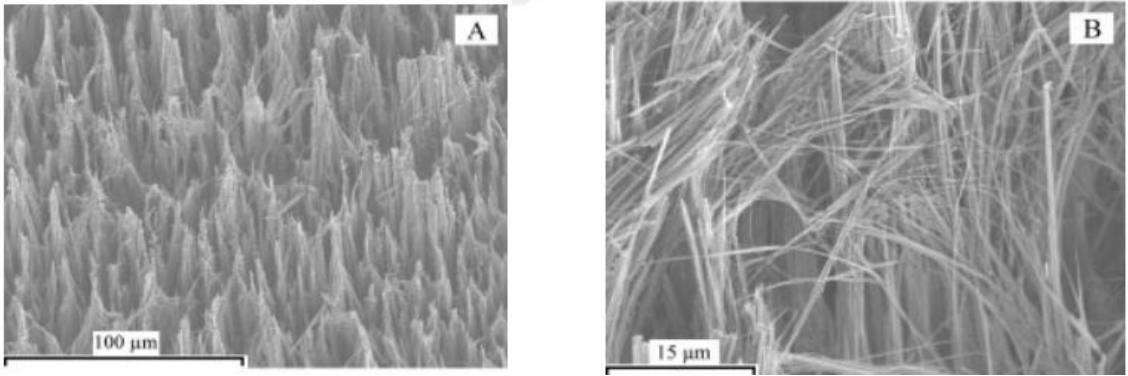
2002 yılında Peng ve arkadaşları MacEtch yöntemini genel hatlarıyla araştırmış ve bu işlemi tek aşamada yapabileceklerini ortaya koymuşlardır. Oluşturulan tek aşamalı yöntem sonraki çalışmalarda elektriksiz dağlama yöntemi olarak adlandırılmıştır (Li ve Bohn, 2000).

MacEtch yönteminde HF/gümüş nitrat (AgNO₃) çözeltisi kullanarak aynı anda silisyum alttaşın hem Ag kaplanması ve hem de alttaş yüzeyinin aşınması bir arada yapılmaktadır. Tek adımda nanotel yapısını oluşturmak için en iyi sonuçlar AgNO₃ ve HF içeren çözelti içerisinde gözlemlenmiştir. Bu işlemde Si alttaş yüzeyindeki gümüş iyonları dokular oluşturarak SiO₂ yapılarını oluşturmaktadır. HF çözeltisi meydana gelen oksit tabakayı aşındırır ve silisyumu çıkarır. İşlem zamanla devam ettikçe metal iyonu silisyumun derinliklerine kadar iner ve alttaş üzerinde gözenekli yapı oluşturmaktadır (Şekil 3.13). Doku oluşması için beklenen süre tamamlandıktan sonra metal nano parçacıkların yüzeyden uzaklaştırmak için HNO₃ kullanılmaktadır.



Şekil 3.13. MacEtch yöntemi örneği: (1) bir metal parçacık tarafından katalize edilen oksidatif bir maddenin (H_2O_2 gibi) indirgenmesi, (2) reaksiyon sırasında oluşturulan boşlukların, metal parçacıkların altındaki en yüksek boşluk konsantrasyonuna sahip silisyum alttaş içine enjeksiyonu, (3) boşlukların silisyumun yan duvarlarına ve yüzeylerine taşınması, (4) oksit tabakasının HF ile uzaklaştırılması (Liu vd., 2014a)

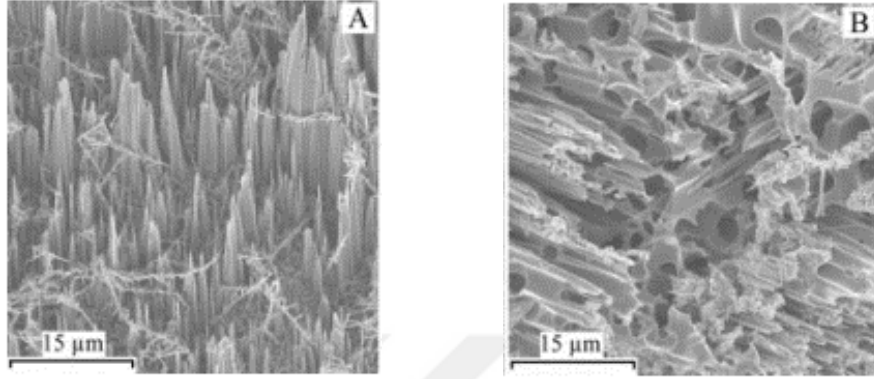
Peng ve arkadaşları nanotel üretmek için 5.0 mol L^{-1} HF ve 0.02 mol L^{-1} $AgNO_3$ çözeltisi kullanmıştır. Daha sonra ısıtıcı tabla üzerinde $50 \text{ }^\circ\text{C}$ sabit sıcaklık değerinde 60 dakikalık aşındırma süresinde bekletilmiş ve aşındırma işlemi tamamlandıktan sonra alttaş çözelti içerisinde çıkarılıp saf su ile durulanıp hava ile kurutulmuştur. Peng ve arkadaşlarının yapmış olduğu nanotel yapılarının SEM görüntüleri Şekil 3.14'deki gibidir.



Şekil 3.14. Üretilen nanotel yapılarının SEM görüntüleri: (A) Si alttaş üzerinde oluşturulan geniş alanlı Si nanotel yapıları, (B) Si nanotel yapılarının büyütme SEM görüntüsü (Peng vd., 2002)

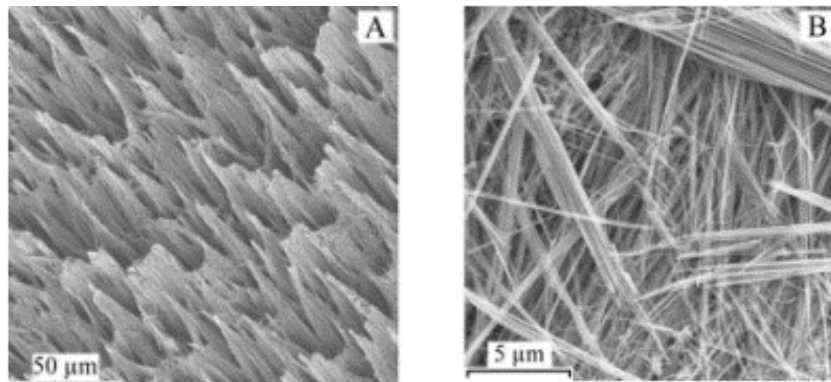
Aşındırma sıcaklığı, aşındırılan silisyum alttaş yüzey morfolojisini etkileyen önemli bir faktördür. Şekil 3.15'de aşındırma sıcaklığı nano yapılar üzerindeki etkisini göstermektedir; Tüm numuneler 0.02 mol L^{-1} $AgNO_3$ ile hazırlanmış, ancak aşındırma sıcaklıkları sırasıyla $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de sabit tutulmuştur. Aşındırma sıcaklığı $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de hazırlanan numunede geniş alan mikrometre büyüklüğünde dikit yapıları gözlenirken

(Şekil 3.15 (A)), aşındırma sıcaklığının 120 °C'ye yükseltilmesiyle daha düzensiz gözenekli yapılar gözlemlenmiştir (Şekil 3.15 (B)). Bu sonuçlar yüksek aşındırma sıcaklığının dağlama hızını artırabileceğini ve yüzey mikroyapısının bozukluklarına yol açabileceğini göstermektedir (Peng vd., 2003).



Şekil 3.15. (A) 15 °C, (B) 120 °C'de 0.02 mol L⁻¹ AgNO₃ çözeltisi içinde hazırlanan Si nano yapılarının SEM görüntüleri (Peng vd., 2003)

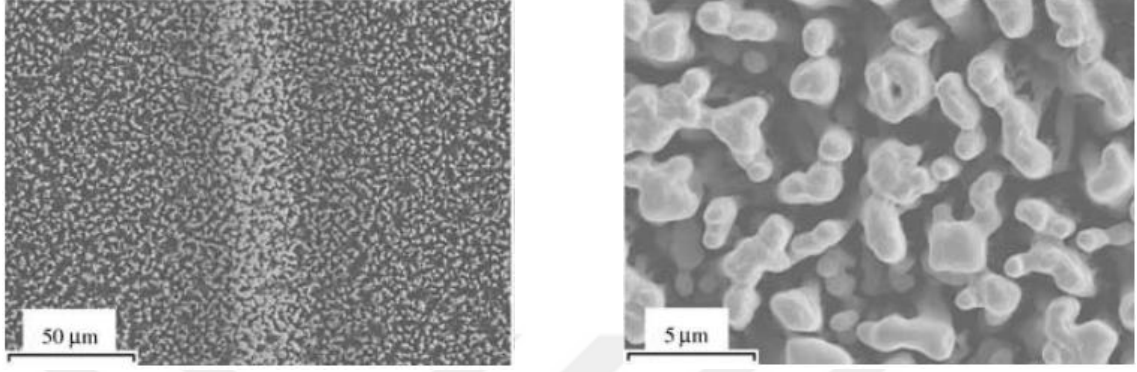
Ayrıca, farklı dirençlere sahip n-tipi silisyum alttaş kullanarak Si nanotellerin büyümesi incelenmiş. Ancak, katkılama tipi ve konsantrasyon oranlarında açık bir ilişki bulunamamıştır. Şekil 3.16 A ve B görüntülerinde, sırasıyla 50 °C'de 0.02 mol L⁻¹ AgNO₃, 5.0 mol L⁻¹ HF içeren sulu çözeltide n-tipi Si alttaş kullanılarak hazırlanan nanotellerin SEM görüntüsü verilmektedir. p-tipi alttaş kullanıldığında da benzer silisyum nanotel dizileri de üretilebildiği sonucuna varılmıştır (Peng vd., 2003).



Şekil 3.16. Si nanotel dizilerinin SEM görüntüleri (A, B), 50 °C'de 0.02 mol L⁻¹ AgNO₃ ve 5.0 mol L⁻¹ HF içeren çözeltide n-tipi silisyum alttaş kullanılmıştır (Peng vd., 2003)

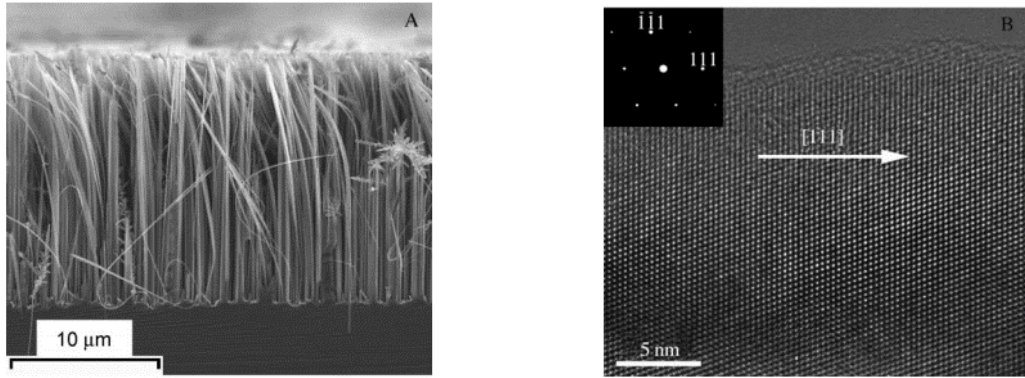
Yapılan bu çalışmaların ardından uygulanan yöntemi anlamak ve oluşan yapı üzerinde kontrolü ele almak için başka yöntemler denenmiştir (Peng vd., 2005; Peng vd., 2006).

Peng ve arkadaşlarının yaptığı diğer çalışmalarda 50 °C sabit sıcaklıkta 4.6 M HF ve 0.02M AgNO₃ çözelti içerisinde Si alttaş daldırılmış aşındırma işlemi bittikten sonra saf su ile durulanıp oda sıcaklığında kurutulmuştur. Oluşturulan nanotel yapılarının SEM görüntüleri Şekil 3.17’de gösterildiği gibidir.



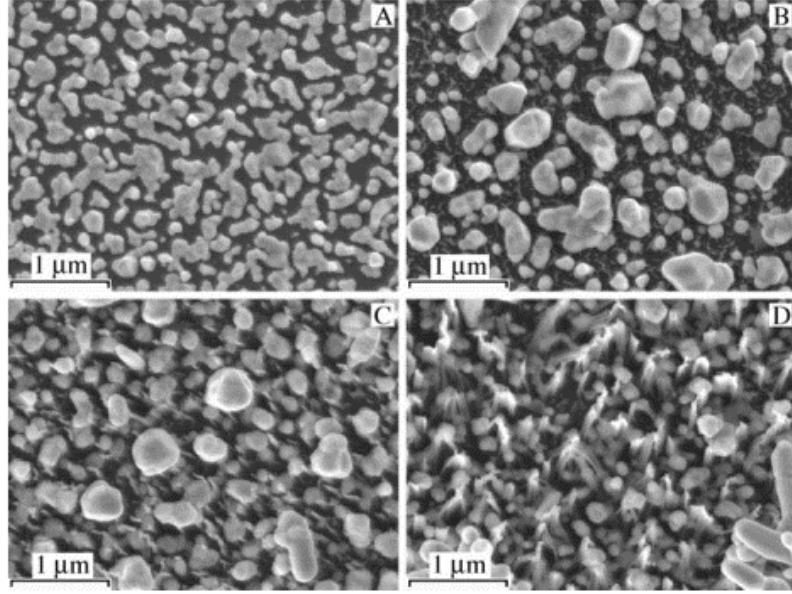
Şekil 3.17. Si alttaş üzerinde oluşturulan nanotel yapıların SEM görüntüleri (Peng vd., 2005)

Peng ve arkadaşlarının yaptığı farklı bir çalışmada yüksek kaliteli Si nanotel dizilerini Si alttaş üzerinde HF/AgNO₃ çözeltisi içerisinde uygun bir aşındırma süresi belirleyerek üretimi gerçekleştirmişleridir. Şekil 3.18’de 60 dakika boyunca 50 °C’de bir p-tipi (111) Si alttaş üzerine oluşturulan dikey olarak iyi hizalanmış geniş alan nanotel dizisini göstermektedir; aşındırma çözeltisi için 4.6 M⁻¹ HF ve 0.01 M⁻¹ AgNO₃ içermektedir.



Şekil 3.18. A) Si alttaş üzerindeki SiNW dizilerinin enine kesitini gösteren taramalı elektron mikroskobu (TEM) görüntüsü; B) Tek bir SiNW yüksek çözünürlüklü geçirimsiz elektron mikroskobu (HRTEM) görüntüsü ve seçili alan elektron difraksiyon modeli (Peng vd., 2006)

Yapılan bu deneyler sonucunda p-tipi Si alttaş yüzeyinde oluşan Si nanotellerin morfolojik yapısı hakkında daha iyi bir bilgiye ulaşabilmek için farklı zamanlarda ve farklı çözelti oranlarında aşındırma işleminin hangi sonuçlara neden olduğu incelenmiştir. Şekil 3.19’de farklı zamanlarda HF/AgNO₃ çözeltisi içerisinde aşındırılmış p-tipi (111) Si alttaş’ın üsten görüntüsü gösterilmektedir. Aşındırma çözeltisi 4.6 M⁻¹ HF ve 0.02 M⁻¹ AgNO₃ içermektedir.

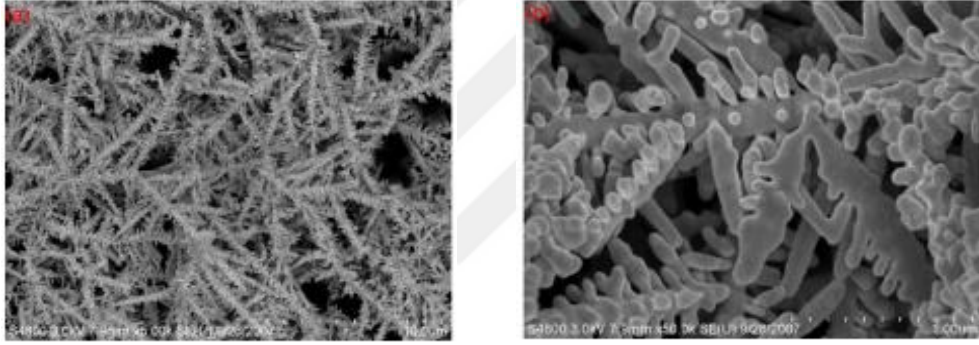


Şekil 3.19. A) 30 sn, B) 1 dk, C) 5 dk ve D) 10 dk için HF / AgNO₃ çözeltisinde aşınmış p-tipi (111) Si alttaşların üsten görünüşlerini gösteren TEM görüntüleri (Peng vd., 2006)

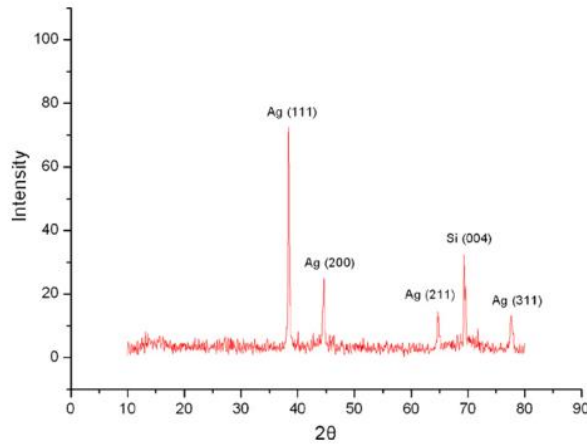
30 sn sonra aşınmış Si yüzeyinde yüksek yoğunlukta çökelmiş Ag parçacıkları görülürken yüzeyde Si nanotel yapıları gözlemlenmemiştir. Ayrıca n-tipi Si Alttaş yüzeyinde Ag birikmesi, p-tipi Si alttaş yüzeyinden daha fazla dağılım yoğunluğuna sahip olduğunu ancak p-tipi Si alttaş üzerindeki Ag birikmesinin daha çok olduğu sonucuna varılmıştır (Peng vd., 2006). Bu farklılığın nedeni n-tipi Si alttaş daha yüksek yüzey elektron konsantrasyonuna ve Si çözelti ara yüzeyindeki nano yapının konsantrasyonundaki farklılıktan kaynaklandığını düşünmüşlerdir (Peng vd., 2006). Aşındırma süresinin uzatıldığında ise Ag parçacıklarının büyüdüğu ve nanotel dizilerin oluştuğu gözlemlenmiştir.

Normal koşullar altında Si nanotel oluşumunu etkileyebilecek durumlar AgNO₃/HF konsantrasyonu ve aşındırma süreleri olup Wan ve arkadaşlarının yapmış olduğu

çalışmada bu durumları incelemiştir (Wan vd., 2008). Si alttaşlar 1cm x 1cm boyutlarında kesilerek hazırlanmış. İlk olarak Si alttaş yüzeyine RCA standart temizleme işlemi uygulanmış ve saf su ile durulanıp ve azotla kurutulmuştur. Temizlenen Si alttaşlar önce farklı HF ve AgNO₃ konsantrasyonları olan kaplara daldırılarak büyüme işlemini normal şartlar altında gerçekleştirilmiştir. Normal şartlar, oda sıcaklığı (~20 °C) ve 1 atm olarak tanımlanmaktadır. Si nano yapıların hazırlanmasından sonra numunelerin bazıları Ag kalıntılarının uzaklaştırılması için HNO₃ çözeltisi içerisine daldırılmıştır. Şekil 3.20’de gösterildiği gibi ağaç benzeri yapıların oluştuğu gözlemlenmiştir. X-ışınları kırınımı (XRD) analizi Şekil 3.21’de gösterildiği gibi Si kırınım noktaları hariç diğer bölgelerin gümüş olduğu görülmüş ve Si nano yapıların oluşum sürecinde ağaç benzeri yapıların gümüş olduğu sonucuna varılmıştır (Wan vd., 2008). Daha sonra HNO₃ durulama işleminden geçen Si alttaşlar karakterize edilmiştir.

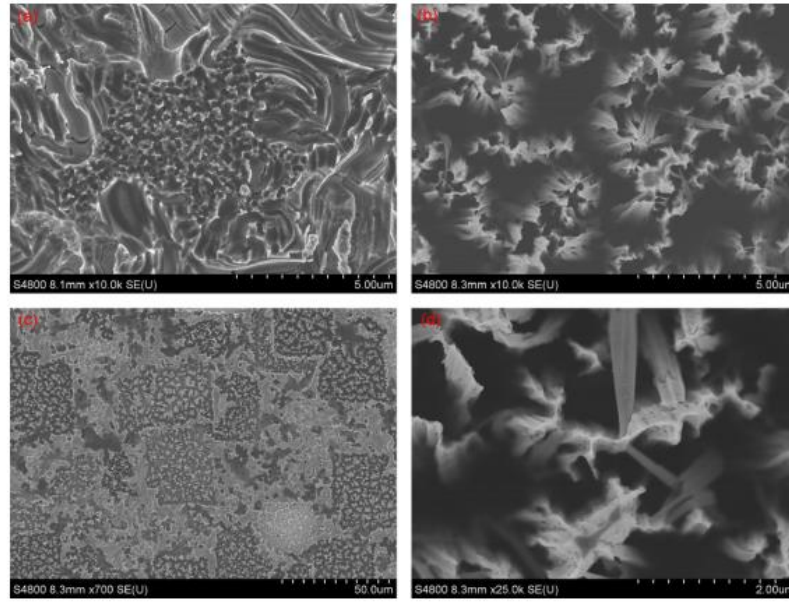


Şekil 3.20. 35 mM AgNO₃ ile üretilen ağaç benzeri gümüş yapının SEM görüntüsü (a) uzaktan görünüm (b) yakından görünüm (Wan vd., 2008)



Şekil 3.21. 35 mM AgNO₃ konsantrasyonunda 60 dakika boyunca bekletilmiş ağaç benzeri Si nano yapıların XRD görüntüsü (Wan vd., 2008)

Şekil 3.22 (a ve b)'de, farklı AgNO_3 konsantrasyonları ile hazırlanmış çözelti tarafından aşındırılmış Si'nin SEM görüntüleri ve HF konsantrasyonu %20 ve aşındırma süresi 60 dakika olarak belirlenmiştir. Standart basınç altında 15 mM AgNO_3 çözeltisi için oda sıcaklığında bazı bölgeler aşınmış, Şekil 3.22 (a)'da derin yerler aşınmıştır. Şekil 3.22 (c ve d) 35 mM AgNO_3 konsantrasyonuna sahip Si nano yapıların farklı büyüklüklerde çekilmiş görüntülerini göstermektedir. Düzenli Si nano yapıların Si alttaş yüzeyinde dizildiği görülmüştür.



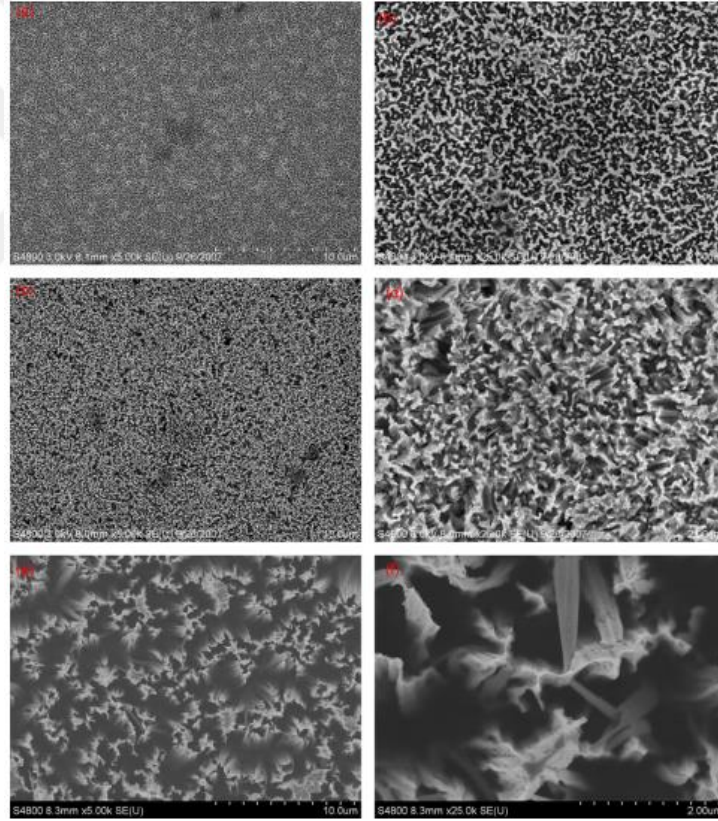
Şekil 3.22. (a) 15 mM AgNO_3 ile hazırlanan numunenin, (b) 35 mM AgNO_3 ile hazırlanan numunenin, (c ve d) 35 mM AgNO_3 ile hazırlanan numunenin düşük ve yüksek büyütme Si nano yapıların SEM görüntüleri. HF konsantrasyonu yukarıdaki tüm numuneler için % 20'dir (Wan vd., 2008)

Si alttaş yüzeyinin morfolojisinde diğer etken faktör HF konsantrasyonudur. Şekil 3.23'de HF konsantrasyonunun oluşan yapılar üzerindeki etkisini göstermektedir. Kullanılan HF miktarı sırasıyla %5, 20, 40 olarak belirlenmiş ve %5 HF ile hazırlanan örnekte gözenekli mikroyapılar elde edilmiştir (Şekil 3.23 (a)). HF miktarı %20'ye yükseltilecek şekilde oluşan gözenekli yapılar Si nano yapılar olarak düşünülebilmektedir (Şekil 3.23 (b)). HF konsantrasyon %40'a yükseltildiğinde Şekil 3.23 (c)'de gösterildiği gibi ayrı ayrı Si nano yapılar oluşturulmuştur (Wan vd., 2008).

Yapılan diğer deneylerde HF ve AgNO_3 'ün konsantrasyonunun artırılmasının normalde aşındırma hızını arttıracak ve düzensiz bir yapı oluşumuna yol açacağını

gözlemlenmiştir. Si nano yapılar için optimal büyüme parametreleri, 35 mM AgNO_3 , %20 oranında HF (hacim oranında) olarak belirlenmiştir.

Aşındırma süresi Si alttaş yüzey morfolojisini etkileyen bir başka önemli faktördür. Şekil 3.23'de aşındırma süresinin arttırılarak Si alttaş yüzeyinin morfolojik yapısının yüksek ve düşük büyütme SEM görüntülerini göstermektedir. Si nano yapıların büyümesi için tüm numuneler 35 mM AgNO_3 ve %20 HF ile hazırlanmış, aşındırma süreleri sırasıyla 5 (Şekil 3.23 (a ve b)), 15 (Şekil 3.23 (c ve d)) ve 60 (Şekil 3.23 (e ve f)) dakika olarak belirlenmiştir. Bu görüntüleri karşılaştırarak, silisyum alttaş üzerinde oluşan nano yapıların radyal ve uzunlamasına doğrultuda büyüdüğü gösterilmiştir. Si nano yapılar için en uygun büyüme koşulları 35 mM AgNO_3 , %20 HF ve aşındırma süresi 60 dk olarak belirlenmiştir (Wan vd., 2008).



Şekil 3.23. (a ve b) 5 dakika, (c ve d) 15 dakika ve (e ve f) 60 dakikalık aşındırma süresinden sonra Si alttaşın morfolojik yapısını gösteren yüksek ve düşük büyütme SEM görüntüleri (Wan vd., 2008)

Literatürde HF ve AgNO_3 için sıcaklık, zaman, molarite değerleri gibi genel özelliklerin değişimi ile nano yapılar elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda özellikle molarite değişimi ile gerçekleştirilen deney grupları için elde edilen nano yapılar morfolojik

yapısında ciddi değişimlerin ortaya çıktığı görülmüştür. Aynı şekilde elde edilmek istenen nano yapı için kullanılan aşındırıcının alttaşa etki ettiği sürede büyük önem taşımaktadır. Özellikle molaritesi yüksek deney grupları için alttaşa etki eden sürenin optimum hale getirilmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra istenilen düzeyde nano yapı elde etmek adına uygulanan sıcaklığın da belirlenen molarite ve zamana göre optimum değerin belirlenmesi gerekmektedir. Sıcaklığın elde edilecek nano yapılar için önemi ise oluşturulmak istenen nano yapının istenmeyen kusurlarının giderilmesi için önem arz etmektedir. Bu kapsamda literatürde yapılan çalışmalarda ise her araştırmacı elde etmek istediği nano yapı için kendi reçetesini oluşturmuş ve bu doğrultuda elde edilmek istenen yapıların gelişmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir.

Yapılan literatür çalışmaları (Çizelge 3.2) ve deneyimlerimiz doğrultusunda bu tez çalışmasında özgün reçete oluşturulmuş ve istenilen düzeyde nano yapılar başarılı bir şekilde elde edilmiştir.

Çizelge 3.2. Farklı aşındırma parametreleri kullanılarak MacEtch yöntemiyle üretilen Si nano yapıların aşındırma parametreleri ve yüzey morfolojisinin açıklanması

Aşındırma parametreleri	Si alttaşın morfolojisi	Referans
0.02 mol/L AgNO ₃ ve 5.0 mol/L HF (50 °C) (60dk)	Serbet duran SiNW dizileri	(Peng vd., 2002)
0.015 mol/L AgNO ₃ ve 5.0 mol/L HF (50 °C) (60dk)	Düzenli Si mikro yapıları	(Peng vd., 2003)
0.02 mol/L AgNO ₃ ve 5.0 mol/L HF (15 °C) (60dk)	Dikit yapıları	(Peng vd., 2003)
0.02 mol/L AgNO ₃ ve 5.0 mol/L HF (120 °C) (60dk)	Düzensiz SiNW yapıları	(Peng vd., 2003)
0.01 mol/L AgNO ₃ ve 4.6 mol/L HF (50 °C) (60dk)	SiNW dizileri	(Peng ve Zhu, 2004)
0.02 M AgNO ₃ ve 4.6 M HF (50 °C) (20dk)	SiNW dizileri	(Peng vd., 2005)
0.01 mol/L AgNO ₃ ve 4.6 mol/L HF (50 °C) (60dk)	SiNW dizileri	(Peng vd., 2006)
0.02 mol/L AgNO ₃ ve 4.6 mol/L HF (50 °C) (60dk)	SiNW dizileri	(Peng vd., 2006)
0.02 M AgNO ₃ ve 5 M HF (50 °C) (3-5dk)	Si nano yapılar	(Peng vd., 2008)
0.02 M AgNO ₃ ve %10 HF (RT) (1dk)	SiNW dizileri	(Qu vd., 2009)
0.005 M AgNO ₃ ve 4.8 M HF (RT) (1dk)	Si nano yapılar	(Moon vd., 2010)
0.005 M AgNO ₃ ve 4.8 M HF (RT) (1dk)	a-Si:H nano yapılar	(Douani vd., 2011)
0.025 M AgNO ₃ ve %25 M HF (RT) (60sn)	Si nano yapılar	(Srivastava vd., 2012)
0.008 M AgNO ₃ ve 4 M HF (RT) (10sn)	SiNW dizileri	(Bai vd., 2012)
0.02 M AgNO ₃ ve 5M HF (50 °C) (120dk)	Düzenli SiNW yapılar	(Li vd., 2013)
5mM ≤ AgNO ₃ ≤ 40mM ve 2M ≤ HF ≤ 12M (30 °C) (60dk)	SiNW dizileri	(Srivastava vd., 2014)
0.00045 M AgNO ₃ ve 0.0025 M HF (RT) (3dk)	Düzenli SiNW yapılar	(Booker vd., 2015)

Metal destekli kimyasal aşındırma yönteminin diğer yöntemlerle karşılaştırılması

Aşağıdan-yukarı (bottom-up) katkılama yöntemleri genellikle yüksek sıcaklık ve yüksek vakum ortamında uygulandığı için hepsi de işlem maliyetini önemli ölçüde artıran öncüller içermektedir. Ayrıca, kullanılan büyüme düzenlerindeki kısıtlamalar nedeniyle geniş alanda nano yapı üretimi mümkün değildir. Bu durumlara karşılık MacEtch yöntemi çözüm olarak geliştirilmiştir. Bu yöntem geniş alanlarda hizalanmış nano yapı dizilerinin

üretimini mümkün kılan düşük sıcaklıklı, düşük maliyetli ve çözüm tabanlı alternatifler sağlayan üretim yöntemidir. Bu önemli avantajlar göz önüne alındığında, MacEtch yönteminin daha ileri gelişmelere sahip bir boyutlu nano yapı dizileri üretmek için lider konumda olması beklenmektedir. Bu tezin sonraki bölümünde geniş alanlarda MacEtch yöntemiyle nano yapıların üretimi incelenmiştir. MacEtch yönteminde kullanılan parametreler konsantrasyon, zaman ve sıcaklık gibi detaylı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, üretilen nano yapıların, yansıma özellikleri üzerinde nano yapı üretimi için gerekli koşulları belirten ve HIT güneş hücrelerinde verimli emiciler olarak kullanılacak bir analiz sağlamaktadır. Nano yapı esaslı cihazlar üzerinde üretim gerçekleştirebilmek için nano yapıların iyi bir şekilde kontrol edilerek üretilmesi gerekmektedir.

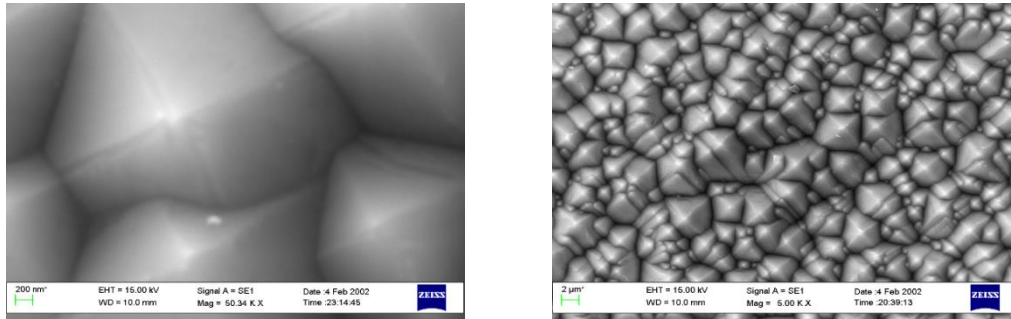


BÖLÜM IV

DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇ

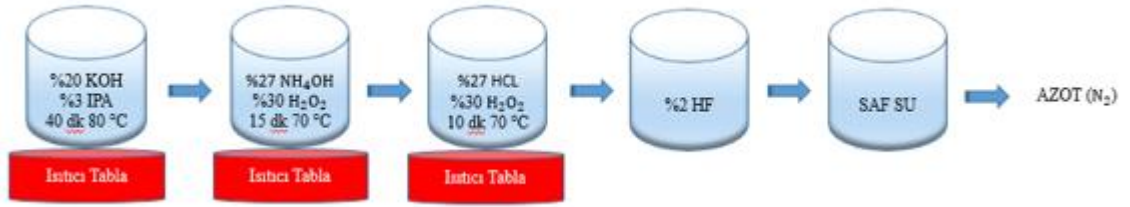
4.1 NÖHÜNAM'da Standart Yüzey Desenlendirme (Rastgele Primit Yapı) ve Islak Kimyasal Yüzey Temizliği

HIT güneş hücresinin ilk adımı alttaş yüzeyinin desenlendirilmesidir. Literatür de standart yüzey desenlendirmeye yönelik birçok çalışma bulunmaktadır (Barycka ve Zubeł, 1995; Sato vd., 1999; Hayashi vd., 2006; Al-Husseini ve Lahlouh, 2017). Bu çalışmalara ek olarak NÖHÜNAM'da standart yüzey desenlendirme işlemi uygulanarak güneş hücrelerinin verimliliğinin artırılmasına yönelik çeşitli uygulamalar yapılmış ve temiz oda içerisinde koruyucu ekipmanlar eşliğinde ve kimyasal solüsyonlarla rastgele piramit yapının üretimi gerçekleştirilmiştir. Standart yüzey desenlendirme işleminde, <200 mikron kalınlığa sahip, 15.6 x 15.6 cm² (6 inç) boyutlarında, kristal yapısı (100) olan 1-3 ohm.cm öz dirence sahip n-tipi c-Si alttaş üzerinde üretilmiştir. Standart yüzey desenlendirme işlemi için uygulanan parametreler literatürden ve önceki çalışmalarımızdan yola çıkılarak belirlenmiştir. Optimize edilmiş standart yüzey desenlendirme solüsyonu ağırlıkça %20 oranında KOH ve %3 oranında IPA içermektedir. Reaksiyonun başlayabilmesi için alttaş solüsyon içerisine daldırılır, 40 dakikalık aşındırma süresi ve 80 °C sıcaklıkta tutularak süre sonunda optimum rastgele piramit yapı elde edilmiştir. Elde edilen standart yüzey desenlendirilmiş yapının farklı boyutlarda görüntüleri Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Standart yüzey desenlendirme işlemi sonucunda elde edilen alttaş yüzeyinin farklı boyutlarda görüntüleri

Standart yüzey desenlendirme işleminin ardından alttaş yüzeyinde bir dizi kimyasal temizleme işlemleri uygulanmaktadır. Alttaş yüzeyinde oluşan organik kalıntıların ve metallerin uzaklaştırılması RCA-1 (70 °C’de 15 dakika; 1/7 oranında NH₄OH (27%), 1/7 oranında H₂O₂ (30%), 5/7 oranında saf su) temizliğiyle, atomların ve metal iyonların uzaklaştırılması RCA-2 (70 °C’de 10 dakika; 1/8 oranında H₂O₂ (30%), 1/8 oranında HCL (27%), 6/8 oranında saf su) temizliğiyle ayrıca doğal oksit tabakanın ve KOH kalıntılarının uzaklaştırılması standart HF (90 sn; HF (2%), saf su) temizliği işlemleriyle sağlanmıştır. Uygulanan kimyasal işlemlerin sırası Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Belirtilen parametrelerin uygulanmasının nedeni ise optimum düzeyde oluşturulan rastgele piramit yapı ve maksimum güneş hücresi verimliliği elde edilmesinden dolayıdır.



Şekil 4.2. Islak kimyasal işlem sırası

Elde edilen standart yüzey desenlendirme ve ıslak kimyasal temizlik işlemlerinden sonra alttaş’ın Taşıyıcı Yaşam Süresi Test Cihazında ayrı ayrı yaşam süreleri belirlenmiştir.

4.1.1 Taşıyıcı Yaşam Süresi Ölçümü

Taşıyıcı Yaşam Süresi Test Cihazı, taşıyıcının ömrünü belirlemek için bir girdap akım iletkenlik sensörü ve filtrelenmiş bir Xenon flaş lambası kullanır. Ölçümler, QSSPC (Yarı Kararlı Foto İletkenliği) yöntemi veya T-PCD (Geçici Foto İletkenlik Bozunması) yöntemini kullanarak yapılabilir. Bu cihaz, silisyum fotovoltaik hücrelerdeki malzeme kalitesinin, katkı maddesinin difüzyonunun ve pasivasyon kalitesinin değerlendirilmesi ve optimizasyonu için kullanılmaktadır. Sistem, Xenon flaş lambası, optik filtreler, güç kaynağı, bir bilgisayar ve veri toplama aygıtlarından oluşur.

Standart yüzey desenlendirilmiş alttaş 1E+15 cm⁻³ azınlık akım taşıyıcı yoğunluğunda ve transient modunda yapılan azınlık akım taşıyıcı (MC) yaşam süresi ölçüm analizi sonuçları çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Standart yüzeyi desenlendirilmiş n-tipi c-Si alttaş için azınlık akım taşıyıcı yaşam süresi analizi sonuçları

Standart yüzeyi desenlendirilmiş, kimyasal temizlik uygulanmış alttaş'ın azınlık akım taşıyıcı yaşam süresi analizi (ms)
1.619
1.629
1.631
1.657

Yapılan analizler doğrultusunda dört farklı standart yüzeyi desenlendirilmiş ve kimyasal temizlik işlemi uygulanmış alttaşların azınlık akım taşıyıcı yaşam süreleri ölçülmüştür. Sonuçlar göz önünde bulundurularak 1.619 ms alttaşın taşıyıcı yaşam süresi 1.657 ms'lik alttaşın taşıyıcı yaşam süresinden düşük çıkmıştır. Konfigrasyon doğrultusunda 1.657 ms'lik taşıyıcı yaşam süresi ölçülen alttaşın verimliliğinin 1.619 ms taşıyıcı yaşam süresi ölçülen alttaşa göre daha yüksek beklenmektedir. Bu bilgiler ışığında NÖHÜNAM'da standart yüzeyi desenlendirilmiş yüksek verimli bir HIT güneş hücresi üretilmiş ve karakterizasyonu yapılmıştır.

4.1.2 Güneş Simülatörü

Güneş simülatörü, doğal güneş ışığına çok yakın aydınlatma sağlayan bir cihazdır. Güneş simülatörü, elde edilen güneş hücrelerinin gerçek güneş ışığı altında nasıl bir performans sergileyeceği belirleyen ayrıca laboratuvar koşullarında güneş hücrelerinin test edilmesine olanak sağlayan cihazdır.

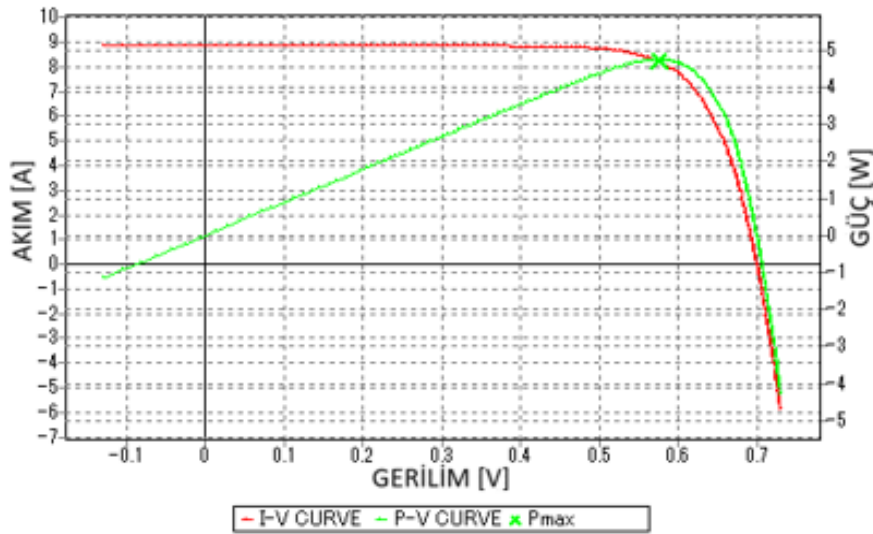
Sistem 1000 W/m^2 'lik aydınlatma sağlayan bir Xe ışık kaynağı kullanmaktadır. Işık kaynağı tarafından üretilen sanal güneş ışığı 50 ms'lik bir flaş patlaması şeklinde numune üzerine düşürülür ve güneş simülatörünün probları sayesinde oluşan elektrik akımı toplanıp analiz edilir. Yazılım tarafından oluşturulan I-V (elektrik akımı – voltaj) eğrisi, numunenin güneş altındaki performansını belirlemektedir.

Üretilen yüksek verimli HIT güneş hücresi Kopel marka güneş simülatörü ile $25 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta temiz oda ortamında yapılan güneş simülatörü analizi sonucunda $238,95 \text{ cm}^2$ 'lik alanda verimlilik değeri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 1.657 ms'lik azınlık akım taşıyıcı yaşam süresiyle üretilen HIT güneş hücresi için 0.7002 V'luk açık

devre gerilimi, 37.189 mA/cm^2 'lik kısa devre akım yoğunluğu, %76.15 doldurma oranı ile % 19.828 verimlilik değeri ölçülürken 1.619 ms'lik azınlık akım taşıyıcı yaşam süresiyle üretilen HIT güneş hücresi için 0.6993 V'luk açık devre gerilimi, 36.933 mA/cm^2 'lik kısa devre akım yoğunluğu, %73.59 doldurma oranı ile % 19.001 verimlilik değeri ölçülmüştür. Yapılan analiz sonuçları Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'de verilmiştir. Bulunan bu değer gerçekleştirilmiş olan standart yüzey desenlendirme içerisindeki maksimum değeri ifade etmektedir. Elde edilen sonuçlara dair I-V grafiği Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Güneş aydınlatması (1000 W/m^2) altında elde edilen 1.657 ms yaşam süresi ile üretilen HIT güneş hücresi için güneş simülatörü verileri

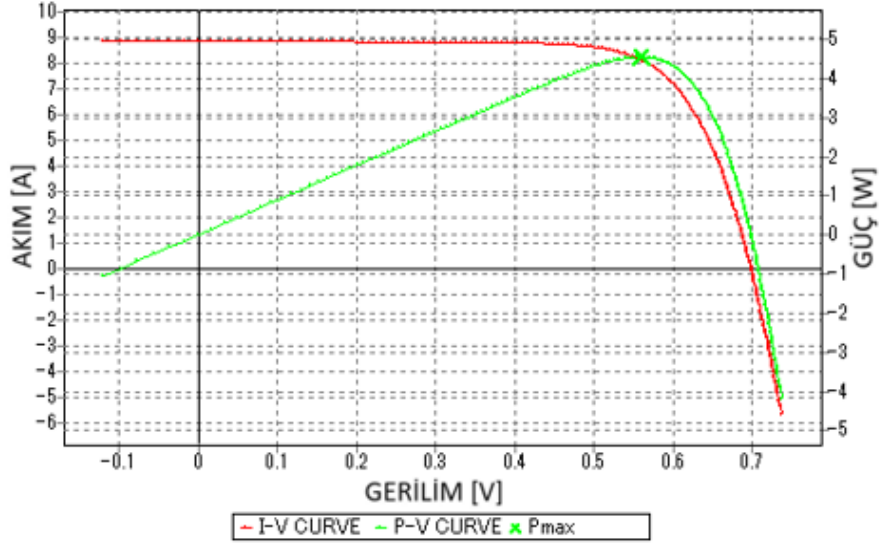
Verimlilik (Eff)	Doldurma Oranı (FF)	Kısa Devre Akımı (Isc)	Kısa Devre Akım Yoğunluğu (Jsc)		Açık Devre Voltajı (Voc)
19,828%	76.15%	8.886 A	37.189 mA/cm^2		0.7002 V
Maksimum Güç (Mpp)	Maksimum Güç Noktasındaki Volyaj (Vpm)	Maksimum Güç Noktasındaki Akım (Ipm)	Taşıyıcı Yaşam Süresi	Seri Direnç (Rs)	Paralel Direnç (Rsh)
4.7386 W	0.5763 V	8.222 A	1.657 ms	2.44 mohm	14.812 ohm



Şekil 4.3. Standart yüzey desenlendirilmiş taşıyıcı yaşam süresi 1.657 ms olan HIT güneş hücresinin I-V eğrileri

Çizelge 4.3. Güneş aydınlatması (1000 W/m^2) altında elde edilen 1.619 ms yaşam süresi ile üretilen HIT güneş hücresi için güneş simülâtörü verileri

Verimlilik (Eff)	Doldurma Oranı (FF)	Kısa Devre Akımı (Isc)	Kısa Devre Akım Yoğunluğu (Jsc)		Açık Devre Voltajı (Voc)
19,001%	73.59%	8.825 A	36.933 mA/cm ²		0.6993 V
Maksimum Güç (Mpp)	Maksimum Güç Noktasındaki Volyaj (Vpm)	Maksimum Güç Noktasındaki Akım (Ipm)	Taşıyıcı Yaşam Süresi	Seri Direnç (Rs)	Paralel Direnç (Rsh)
4.5413 W	0.5595 V	8.117 A	1.619 ms	4.11 mohm	10.125 ohm



Şekil 4.4. Standart yüzeyi desenlendirilmiş taşıyıcı yaşam süresi 1.619 ms olan HIT güneş hücresinin I-V eğrileri

Çizelge 4.2 ve 4.3 ile Şekil 4.3 ve 4.4'de görüldüğü gibi taşıyıcı yaşam süresindeki artış güneş hücresi performansında bir artışa sebep olmuştur. Taşıyıcı yaşam süresi 1.657 ms olan alttaş kullanılarak HIT güneş hücresi üretilmiş ve verimliliği %19.828 olarak ölçülmüştür. Taşıyıcı yaşam süresi 1.619 ms olan alttaş kullanılarak HIT güneş hücresi üretilmiş ve verimliliği %19.001 olarak ölçülmüştür.

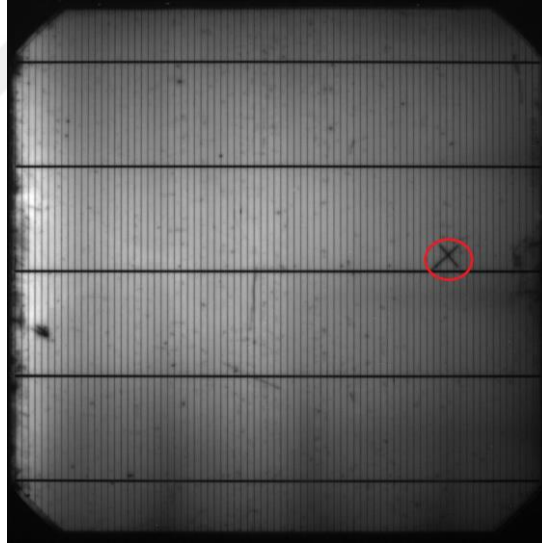
HIT güneş hücresi üzerinde meydana gelen mikro çatlakların, ince ve kalın akım taşıyıcıların ve hücre üzerinde oluşabilecek kusurları görmek için fotoluminesans (PL) ve elektrolüminesans (EL) ölçümleri yapılmıştır.

4.1.3 Fotolüminesans (PL) ve Elektrolüminesans (EL)

PL/EL sistemi bir adet CCD sensörü içeren bir kamera, termal kamera, LED ışık kaynakları ve 750 W'lık bir güç kaynağı içermektedir. PL ve EL sisteminin temelinde hücre yüzeyinde meydana gelen gözle görünemeyecek mikro çatlaklar, ince ve kalın akım taşıyıcı kusurları, üretim esnasında hücre üzerinde oluşabilecek kusurlar ve hücre üzerinde kirlilik hakkında detaylı bilgi vermektedir.

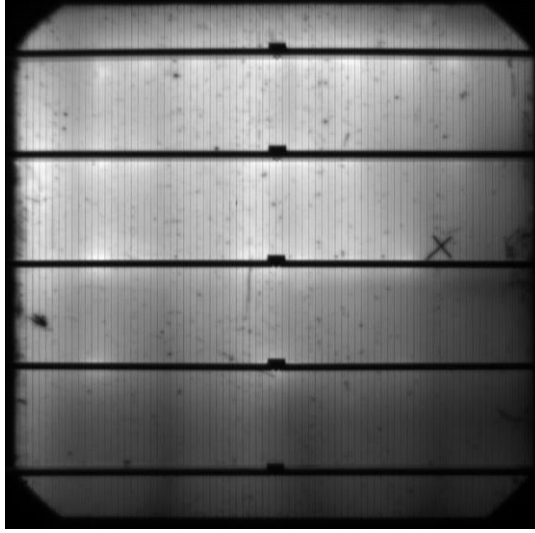
Üretilen yüksek verimli HIT güneş hücresi PL ve EL cihazı ile karakterize edilmiştir. Fotoğraf 4.1 ve Fotoğraf 4.2'de standart yüzey desenlendirilmiş taşıyıcı yaşam süresi 1.657 ms olan HIT güneş hücresinin sırasıyla PL ve EL görüntüleri gösterilmektedir.

Fotoğraf 4.1'de kırmızı ile belirtilen alanda hücrenin iç yapısında meydana gelmiş mikro çatlak görünmektedir. Oluşan mikro çatlağın genişliği 9.987 mm olarak ölçülmüş fakat hücre içerisinde hareket eden elektronların akışını engellemediği görülmüştür.



Fotoğraf 4.1. Üretilen yüksek verimli güneş hücresinin PL görüntüsü

Fotoğraf 4.2'de ise aynı güneş hücresinin EL görüntüsü gösterilmektedir. EL görüntüsüne göre üretilen güneş hücresinin ön yüzey metalizasyonunda herhangi bir sorunun olmadığı görülmektedir.



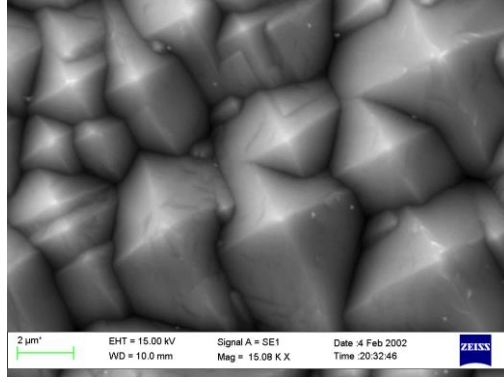
Fotoğraf 4.2. Üretilen yüksek verimli güneş hücresinin PL görüntüsü

Üretilen yüksek verimli HIT güneş hücresinin PL ve EL görüntülerinde, oluşan mikro çatlak tespit edilmiş ancak çatlak güneş hücresi üzerinde önemli bir zarara neden olmadığı gözlemlenmiştir.

Diğer bir çalışmamızda ise standart yüzeyi desenlendirilmiş ve kimyasal temizlik işlemi uygulanmış alttaş yüzeyinde metal destekli kimyasal (MacEtch) aşındırma yöntemi kullanılarak nano yüzey desenlendirme işlemi uygulanmıştır.

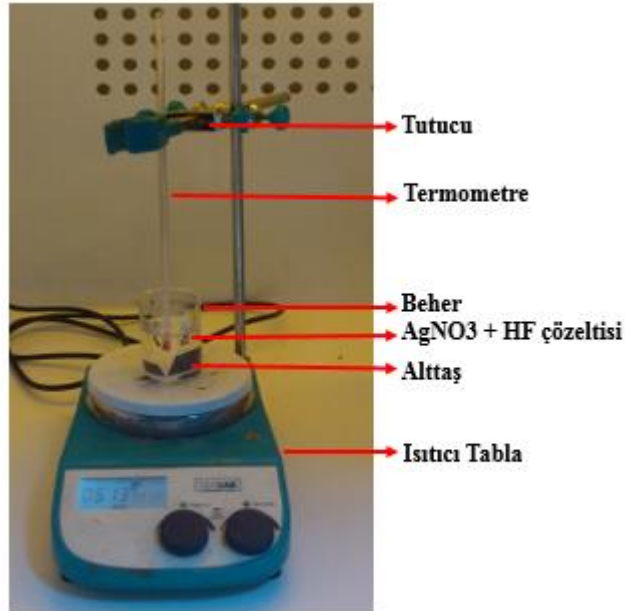
4.2 Metal Destekli Kimyasal Aşındırma (MacEtch) Yöntemiyle Nano Yüzey Desenlendirme

MacEtch yöntemiyle nano yüzey desenlendirme işleminde, 180 mikron kalınlığa sahip, $15.6 \times 15.6 \text{ cm}^2$ (6 inç) boyutlarında, kristal yapısı (111) olan NÖHÜNAM'da standart yüzeyi desenlendirilmiş, 3 ohm.cm özdirence sahip n-tipi c-Si alttaş üzerinde üretilmiştir (Şekil 4.5). Alttaş $1 \times 1 \text{ cm}^2$ ve $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ boyutlarında kesilerek hazırlanmıştır.



Şekil 4.5. Standart yüzey desenlendirilmiş alttaş yüzeyinin SEM görüntüsü

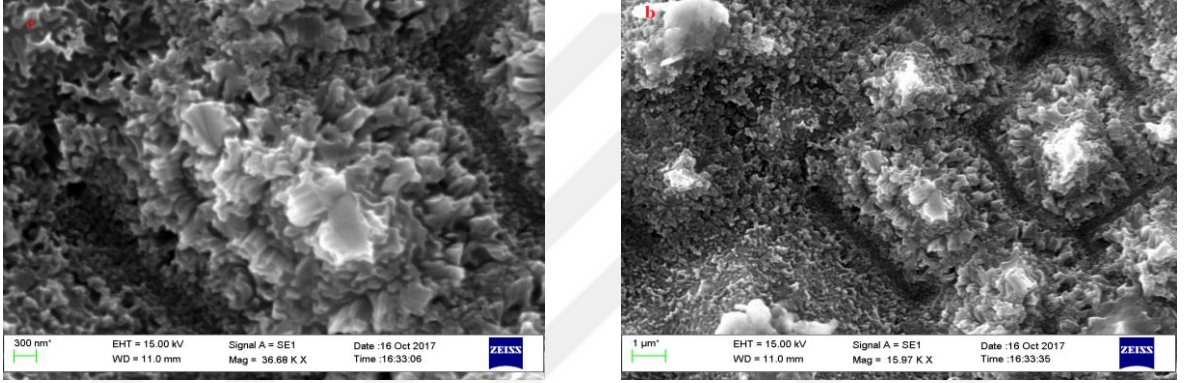
Homojen bir nano yapı elde etmek için daha önceki başlıklarda bahsettiğimiz gibi alttaş yüzeyine RCA-1, RCA-2 ve standart HF temizliği uygulanmıştır. Temizlik işlemi tamamlanmış alttaşlar daha önceden hazırlanmış MacEtch çözeltisi içerisine daldırılmıştır. Deney düzeneği Fotoğraf 4.3’de gösterilmiştir. MacEtch çözeltisi AgNO_3 (%99,5) ve HF (%10)’den oluşmaktadır. MacEtch nano yapılarının gerçekleşebilmesi amacıyla literatürden ve deneyimlerden yola çıkarak, her bir parametrenin elde edilen nano yapı üzerindeki etkisini belirlemek için, temizlenmiş alttaşlar farklı konsantrasyonlarda, farklı aşındırma sürelerinde ve farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir.



Fotoğraf 4.3. MacEtch deney düzeneği

MacEtch işleminin sonunda çözelti içerisinde çıkarılan alttaşlar saf su ile durulanmıştır. Nano yapı dizilerinin üzerinde oluşan gümüş (Ag) dentrit tabakasını çıkarmak için 30 dk boyunca HNO₃ (%65) çözeltisi içerisine daldırılmıştır. İşlemin son aşamasında çözelti içerisinde çıkarılan örnekler saf su ile tekrar durulanıp ve azot ile kurutulmuştur.

Arzu edilen nano yapıların SEM görüntüleri Şekil 4.6 (a) ve (b)'de gösterilmektedir. Nano yapıların dağılımı ve uzunluğu her bir MacEtch işlem parametresi ile yani konsantrasyonu, aşındırma süresi ve çözelti sıcaklığı ile ilişkisi belirlenmiştir. Bu ilişkiyi gözlemlemek için tek seferde sadece bir parametre değiştirilip diğer parametreler sabit tutulmuştur.



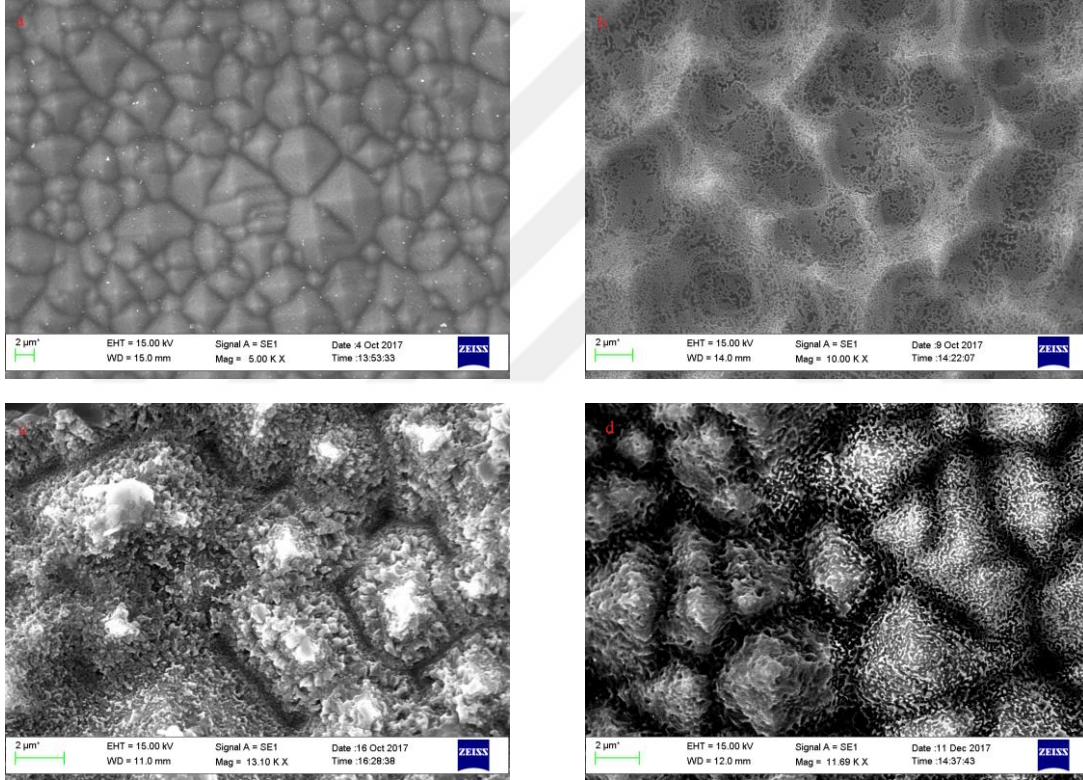
Şekil 4.6. (a) Kesit (b) MacEtch yöntemiyle elde edilen nano yapıların SEM görüntüsü

4.2.1 Metal destekli kimyasal aşındırma parametrelerinin belirlenmesi

4.2.1.1 Çözelti konsantrasyonu

Nano yapılar MacEtch yöntemiyle üretilmesinde en kritik parametre çözelti konsantrasyonudur. MacEtch yöntemiyle ilgili ilk çalışmanın ardından literatürde 0.02 M AgNO₃ / 4.6 M HF çözelti konsantrasyonu olarak bildirildi. Bu tezde tek seferde AgNO₃ ve HF konsantrasyonları azaltılarak ve artırılarak çözelti konsantrasyonunun etkisi incelenmiştir. Bununla birlikte, tüm durumlarda konsantrasyon değiştiğinde daha çok bozulmuş yapı elde edilmiştir. Çözelti konsantrasyonunun optimizasyonuna yönelik çeşitli girişimlerin sonuçları Şekil 4.7'de üretilen nano yapıların SEM görüntüleri gösterilmiştir. Şekil 4.7 (a)' alttaş yüzeyinde nano yapıların oluşmadığı, desenlendirilmiş alttaş yüzeyi üzerinde aşındırma işleminin azda olsa başladığı fakat kullanılan

konsantrasyon miktarının yetersiz kaldığı gözlenmiş ayrıca beyaz nokta halinde görülen Ag kalıntılarının yüzeyden tam olarak atılmadığı görülmüştür; (b) konsantrasyondaki HF oranının yüksek olması alttaş yüzeyinin piramit yapısını aşındırması ve alttaşın yüzey dokusunun özelliği bozulduğu görülürken bunların yanı sıra gümüş kalıntılarının yüzeyden atılmadığı görülmüştür; (c) alttaş yüzeyi üzerinde dağılmış nano yapıları göstermektedir; (d) çözelti konsantrasyon oranının düşük olması ve homejen olarak yayılması alttaş yüzeyinin bir kısmı aşındırırken diğer bir kısmında alttaş yapısının bozulduğu görülmektedir. Nano yapıların bu nedenlerden dolayı kalan işlem parametrelerinin tümü 0.102 gr AgNO_3 / 12,726 ml HF çözelti konsantrasyonu kullanılarak belirlenmiştir.

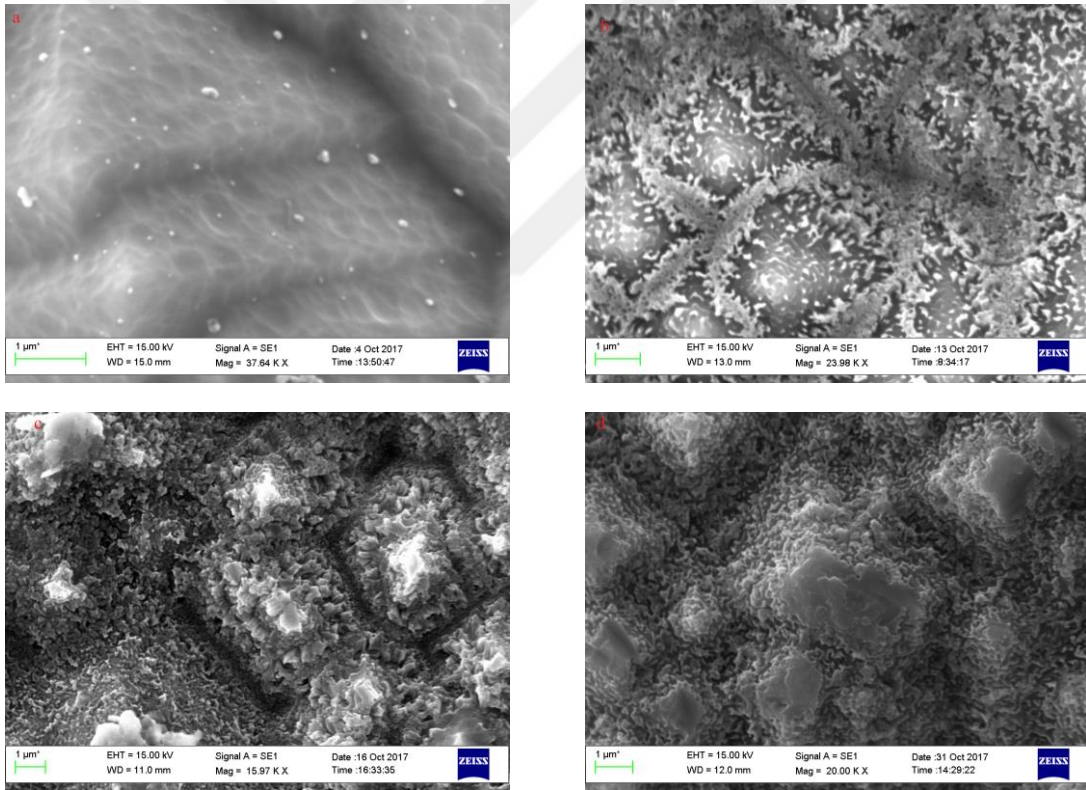


Şekil 4.7. (a) 0.068 gr AgNO_3 / 8.4 ml HF, (b) 0.136 gr AgNO_3 / 16.8 ml HF, (c) 0.102 gr AgNO_3 / 12.726 ml HF, (d) 0.102 gr AgNO_3 / 10 ml HF konsantrasyonlarına sahip çözeltilerde oluşan yapıların SEM görüntüleri

4.2.1.2 Zaman

Aşındırma süreleri, ortaya çıkan nano yapıların uzunlukları üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Nano yapılar 30, 45, 60 ve 75 dakikalık aşındırma sürelerinde üretilirken, çözelti konsantrasyonu 0.102 gr AgNO_3 / 12.726 ml HF'de ve sıcaklık 50 °C'de sabit tutulmuştur.

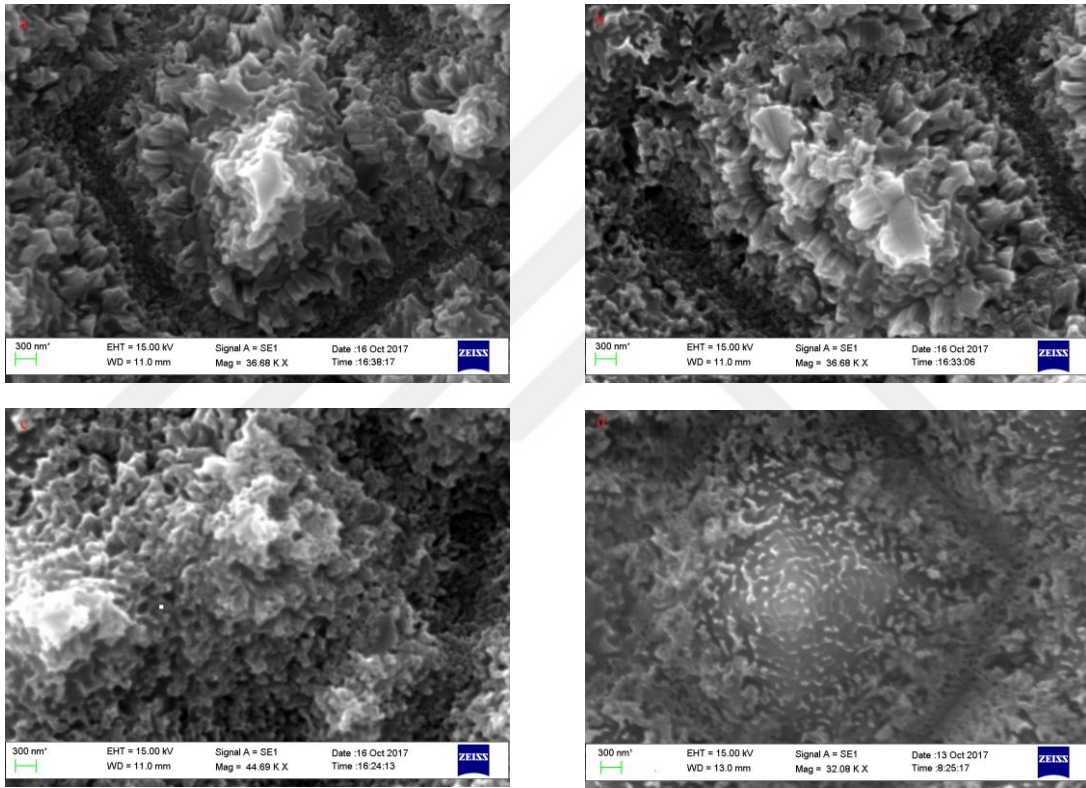
Örneklerin sırasıyla 30, 45, 60 ve 75 dakika içinde oluşan yapıların SEM görüntüleri Şekil 4.8’de gösterilmektedir. Şekil 4.8 (a)’da alttaşın yüzey morfolojisi değişime uğramış fakat 30 dk aşındırma süresinin alttaş üzerinde nano yapıların oluşması için yeterli bir süre olmadığı gözlemlenmiştir; (b) nano yapıların oluşumu alttaş yüzeyinde gözlemlenirken standart yüzey desenlendirilmiş yapının üst noktalarında nano yapıların oluşmadığı bu da homojen bir şekilde dağılımın oluşmadığını göstermektedir; (c) nano yapı oluşumu alttaş yüzeyinde homojen bir şekilde meydana geldiği görülmektedir; (d) 75 dk’lık aşındırma süresinin nano yapıların oluşup tekrar aşınarak kaybolduğu ve alttaş yüzeyinde bulunan standart yüzey desenlendirilmiş yapının da aşınmaya başladığı görülmektedir ayrıca oluşan reaksiyonun çözelti içerisinde yavaşladığı ve Ag iyonlarının konatrasyonda azalmasına neden olabilmektedir bundan dolayı Ag iyonlarının konstrasyonundaki azalması aşındırma oranında yavaşlamasına neden olmaktadır.



Şekil 4.8. (a) 30 dakika, (b) 45 dakika, (c) 60 dakika ve (d) 75 dakika için 0.102 gr AgNO_3 / 12.726 ml HF çözelti içinde 50 °C’de MacEtch yöntemi ile elde edilen yapıların SEM görüntüleri

4.2.1.3 Sıcaklık

MacEtch yönteminde kullanılan çözeltinin sıcaklığı nano yapı oluşumuna etkisi olan bir başka faktördür. Sıcaklık faktörünün redüksiyon-oksidasyon reaksiyonlarının çözeltinin kinetiğini değiştirmektedir. Sıcaklığın etkisi 35, 50, 65 ve 80 °C sıcaklıklarda incelenmiş ve alttaş yüzeyinde oluşan nano yapıların sıcaklıkla doğrusal olarak orantılı olduğu gözlenmiştir. 35, 50, 65 ve 80 °C sıcaklıklarda üretilen nano yapıların SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.9 (a) - (d)'de gösterilmektedir.



Şekil 4.9. (a) 35 °C, (b) 50 °C, (c) 65 °C ve (d) 80 °C 60 dakikalık aşındırma işleminde için 0.102 gr AgNO₃ / 12.726 ml HF içeren bir çözeltide yapılan MacEtch yöntemiyle elde edilen nano yapıların SEM görüntüleri

Aşındırma süresinin etkisine benzer şekilde, MacEtch yöntemi ile yüksek sıcaklıklarda yani, 65 ve 80 °C'de üretim yapmak, nano yapıların birbirlerine yapışmasına neden olurken ayrıca çözelti konsantrasyonu buharlaşmaya maruz kalacağından konsantrasyon oranında azalmanın meydana geldiği gözlemlenmiş bu da nano yapıların üretimini olumsuz yönde etkilemiştir. Konsantrasyon oranının azalması nedeniyle Şekil 4.9 (d)'de standart yüzey desenlendirilmiş yapıların uç noktalarında nano yapıların yeteri kadar

oluşmadığı görülmektedir. Bu nedenlerden dolayı düşük çözelti sıcaklıkları daha yavaş reaksiyon kinetiği ve alttaş yüzeyi boyunca düzgün bir şekilde dağılmış ve iyi hizalanmış nano yapılar sağlamaktadır.

HF ve AgNO₃ için konsantrasyon, sıcaklık ve zaman değerleri gibi genel özelliklerin değişimi ile nano yapılar elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda özellikle konsantrasyon değişimi ile gerçekleştirilen deney grupları için elde edilen nano yapılar morfolojik yapısında ciddi değişimlerin ortaya çıktığı görülmüştür. Yapılan diğer deneylerde HF ve AgNO₃'ün konsantrasyonunun artırılmasının normalde aşındırma hızını arttıracak ve düzensiz bir yapı oluşumuna yol açacağı gözlemlenmiştir. Nano yapılar için optimal büyüme parametreleri, 0.102 gr AgNO₃, 12.726 ml oranında HF olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde elde edilmek istenen nano yapılar için kullanılan aşındırıcının alttaşa etki ettiği sürede büyük önem taşımaktadır. Özellikle konsantrasyonu yüksek deney grupları için alttaşa etki eden sürenin optimum hale getirilmesi gerekmektedir. Aşındırma süresinin de Si alttaş yüzey morfolojisini etkileyen bir başka önemli faktör olduğu anlaşılmış Si alttaş yüzeyinde oluşan nano yapıların oluşana kadar radyal ve uzunlamasına doğrultuda büyüdüğü gösterilmiştir. Bu yüzden nano yapılar için en uygun büyüme koşulları 0.102 gr AgNO₃, 12.726 ml HF ve aşındırma süresi 60 dk olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra istenilen düzeyde nano yapıları elde etmek adına uygulanan sıcaklığın da belirlenen molarite ve zamana göre optimum değeri belirlenmesi gerekmektedir. Sıcaklığın elde edilecek nano yapılar için önemi ise oluşturulmak istenen yapı ve istenmeyen kusurların giderilmesi için önem arz etmektedir. Sıcaklıkla beraber alttaş yüzeyinde optimum nano yapıların büyümesi 0.102 gr AgNO₃, 12.726 ml HF, 60 dk aşındırma süresi ve 50 °C konsantrasyon sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda literatürde yapılan çalışmalarda ise her araştırmacı elde etmek istediği nano yapı için kendi reçetesini oluşturmuştur ve bu doğrultuda elde edilmek istenen yapıları gelişmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir.

Standart yüzey desenlendirilmiş alttaş ile standart yüzey desenlendirilmiş alttaş üzerine uygulanan MacEtch yöntemiyle üretilen nano yapıların 1E+15 cm⁻³ azınlık akım taşıyıcı yoğunluğunda ve transient modunda yapılan azınlık akım taşıyıcı (MC) yaşam süresi ölçüm analizi sonuçları karşılaştırılmış ve Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Standart yüzey desenlendirilmiş alttaş ile yüzeyi standart desenlendirilmiş alttaş üzerine uygulanan MacEtch yöntemiyle üretilen nano yapıların azınlık akım taşıyıcı yaşam süresi analizi sonuçları

Standart yüzey desenlendirilmiş, kimyasal temizlik uygulanmış alttaş'ın azınlık akım taşıyıcı yaşam süresi analizi (ms)	Standart yüzey desenlendirilmiş alttaş üzerine uygulanan MacEtch yöntemiyle üretilen nano yapıların azınlık akım taşıyıcı yaşam süresi analizi (ms)
1.619	3.117
1.629	3.176
1.631	3.214
1.657	3.379

Yapılan analizler doğrultusunda standart yüzey desenlendirilmiş alttaş ve standart yüzey desenlendirilmiş alttaş üzerine uygulanan MacEtch yöntemiyle üretilen nano yapıların yaşam süreleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada standart yüzey desenlendirilmiş alttaş üzerine uygulanan MacEtch yöntemiyle üretilen nano yapıların azınlık akım taşıyıcı yaşam süresi daha yüksek çıkmıştır. Dolayısıyla azınlık akım taşıyıcı yaşam süresi yüksek çıkan bu konfigürasyondan daha yüksek verimlilik beklenmektedir. Bunun sonucunda ise elektron-boşluk çiftinin artacağına bu artışında güneş hücresi verimliliğine önemli derecede katkısı olacağı öngörülmektedir.

Alttaş yüzeyinde nano yapıların, yapılan deneyler sonucunda optimum büyüme parametreleri belirlenmiş ve karakterizasyonu yapılmıştır. Yaptığımız diğer çalışmada ise NÖHÜNAM'da yüzeyi nano desenlendirilmiş HIT güneş hücresi üretimi gerçekleştirilmiştir.

4.3 NÖHÜNAM Nano Desenlendirilmiş HIT Güneş Hücresi Üretimi

Bu bölümde üretimi gerçekleştirilen nano desenlendirilmiş HIT güneş hücresinin üretim basamakları aşama aşama verilmiştir. HIT güneş hücreleri hakkında detaylı bilgi 2. bölümde değinildiği gibi NÖHÜNAM'da da ultra yüksek vakumda PECVD tekniği kullanılarak HIT güneş hücresi üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.10'da güneş hücresi üretiminin sıralaması verilmiştir.



Şekil 4.10. NÖHÜNAM’da üretilen yüksek verimli HIT güneş hücrelerinin standart üretim adımları

Güneş hücreleri 15.6 x 15.6 (6 inç) ve 2,5 x 2,5 cm² boyutlarında, n-tipi katkılanmış pseudo kare biçimli, 3 ohm.cm öz dirence sahip ve 180 mikron kalınlıklardaki alüminyum üzerine üretilmiştir. Üretim ve analiz adımları temiz oda içerisinde gerçekleştirilmiştir. Her bir üretim adımı başlıklar halinde verilmiştir.

4.3.1 Standart yüzey desenlendirme işlemi ve ıslak kimyasal yüzey temizliği

Hücre üretiminin ilk adımı olan standart yüzey desenlendirme işlemi ve ıslak kimyasal yüzey temizliği tezin dördüncü bölümünün alt başlığı olan Başlık 4.1’de (NÖHÜNAM’da Standart Yüzey Desenlendirme (Rastgele Primit Yapı) ve Islak Kimyasal Yüzey Temizliği) bahsedildiği gibi gerçekleştirilmiştir.

Altaş temizliğinin ardından standart yüzey desenlendirme ve ıslak kimyasal yüzey temizliği uygulanmış alüminyum yüzeyine yine tezin dördüncü bölümünün alt başlığı olan Başlık 4.2’de (Metal Destekli Kimyasal Aşındırma (MacEtch) Yöntemiyle Nano Yüzey Desenlendirme) nano yüzey desenlendirme işlemi için elde edilen optimum sonuçlar kullanılarak nano yüzey desenlendirme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen işlemlerin hemen ardından alüminyum zaman kaybetmeden a-Si:H tabakaların kaplanacağı PECVD sistemine yüklenmiştir.

4.3.2 PECVD sisteminde a-Si:H tabakalarının kaplanması

Altaş temizliğinin ardından a-Si:H tabakalarının kaplanması PECVD sisteminde gerçekleştirilmiştir. PECVD sistemi Fotoğraf 4.4’de gösterildiği gibidir. Katkılı (i) a-Si:H ve katkısız (p) / (n) a-Si:H tabakaları 13,56 MHz frekansa sahip alternatif akım (RF) güç kaynağı kullanılarak PECVD ile Çizelge 4.5’de belirlenen değerler altında gerçekleştirilmiştir.



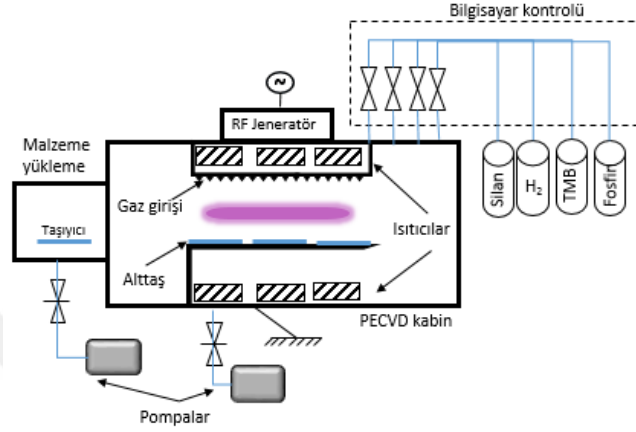
Fotoğraf 4.4. NÖHÜNAM’da kullanılan Meyer Burger marka PECVD/PVD sistemi

Çizelge 4.5. 13,56 MHz frekans RF güç kaynağı ile kaplanan a-Si:H tabakaları için belirlenen değerler altında kaplama koşulları

Tabaka	Basınç	Sıcaklık	Güç	SiH ₄	H ₂	TMB	PH ₃
	(mbar)	(°C)	(W)	(sccm)			
(i)a-Si:H	2	200	150	50	500	-	-
(n)a-Si:H	3	200	150	100	800	-	200
(p)a-Si:H	2	200	150	100	700	300	-

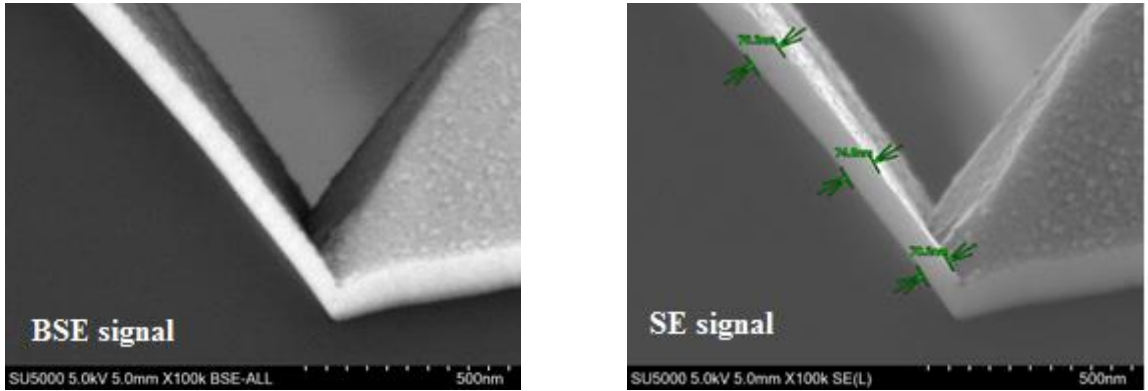
a-Si:H tabakalarının üretiminde ilk adım yüzey pasivasyonu sağlanması amacıyla altaşın her iki yüzeyinde katkısız (i) a-Si:H tabakaların kaplanması işlemidir. Bu işlem; 2 mbar basınç altında, 200 °C sıcaklıkta, 150 W’lık RF güç kaynağı ile SiH₄ ve H₂ gazı eşliğinde yapılmıştır. Ardından katkılı (n) / (p) a-Si:H tabakaların kaplanma işlemi gerçekleştirilmiştir. Arka yüzeyinde ise BSF yapısı sağlayıp arka yüzey rekombinasyonunun engellenmesi amacıyla n-tipi katkılı a-Si:H tabakası 3 mbar basınç altında, 200 °C sıcaklıkta, 150 W’lık RF güç kaynağı ile SiH₄, H₂ ve PH₃ gazı kullanılarak kaplanmıştır. Ön yüzeyde ise p-n eklem yapısı oluşturulması için katkısız (i) a-Si:H üzerine p-tipi katkılı a-Si:H tabakası 2 mbar basınç altında, 200 °C sıcaklıkta, 150 W’lık RF güç kaynağı ile SiH₄, H₂ ve TMB gazı kullanılarak kaplanmıştır. Katkısız (i) a-Si:H

tabakaların kaplanması ve katkılı (n) / (p) a-Si:H tabakaların kaplanması işlemi PECVD'nin farklı odalarında gerçekleştirilmiştir. Farklı odalarda kaplamanın gerçekleştirilmesinin nedeni ise çapraz kontaminasyon önlenmiş ve katkısız (i) a-Si:H tabakaların kalitesi korunmuştur. Kullanılan PECVD sisteminin detaylı şematik yapısı Şekil 4.11'de verildiği gibidir.



Şekil 4.11. PECVD sisteminin şematik gösterimi

Standart yüzey desenlendirilmiş yüzeyler üzerine nanometre boyutundaki ince filmlerin uniform bir şekilde kaplanması Şekil 4.12'de başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.

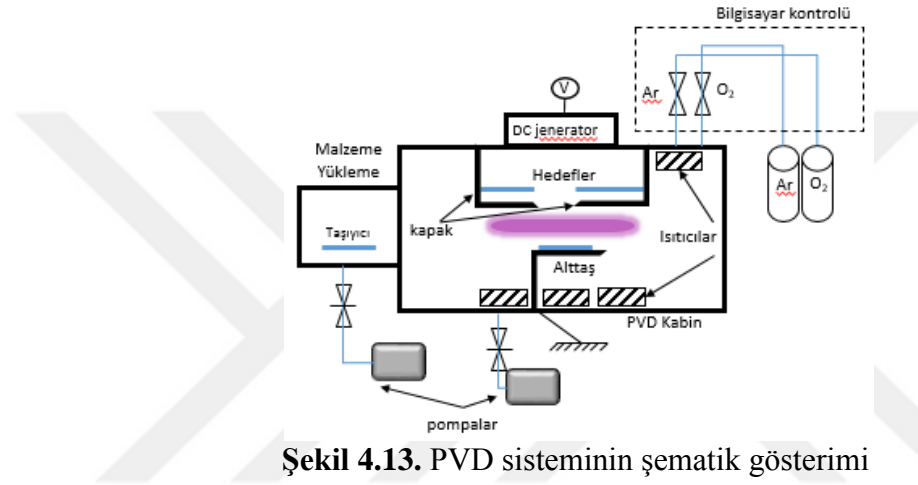


Şekil 4.12. Standart yüzey desenlendirilmiş yüzeyler üzerine kaplanan ince filmlerin uniform yapısı (Seyhan vd., 2017)

Katkılı (i) a-Si:H ve katkısız (p) / (n) a-Si:H tabakalarının kaplanmasının ardından PVD sisteminde TCO ince filmlerinin kaplanmasıdır.

4.3.3 TCO tabakalarının PVD sistemi ile kaplanması

TCO ince film kaplaması için geçirgen ITO malzemesi seçilmiş ve hücrenin her iki yüzeyine de PVD yöntemi kullanılarak 2 mbar basınç altında, 200 °C sıcaklıkta, 1900 W'lık DC güç kaynağı ile Ar ve O₂ gazı kullanılarak ITO ince film kaplaması gerçekleştirilmiştir. Kullanılan PVD sisteminin detaylı şematik yapısı Şekil 4.13'de verilmiştir. Çizelge 4.6'da ince film kaplama parametreleri verilmiş ve Şekil 4.14 (a)'da ITO kaplı yüzeyin SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.13. PVD sisteminin şematik gösterimi

Çizelge 4.6. PVD yöntemi ile gerçekleştirilen ITO kaplama koşulları

Tabaka	Basınç	Sıcaklık	Güç	Ar	O ₂	Kalınlık
	(mbar)	(°C)	(W)	(sccm)		
ITO	2	200	1900	200	3,5	80-100

ITO ince film kaplanmasının ardından PVD sisteminde arka yüzey metalizasyon kaplamasıdır.

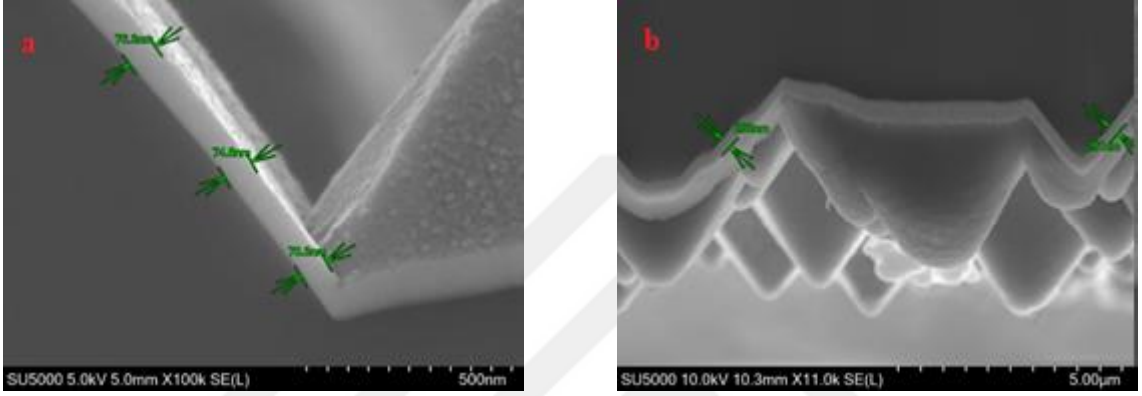
4.3.4 Arka yüzey metalizasyonunun PVD sistemi ile kaplanması

Arka yüzey metalizasyonunun Ag kaplanması ITO işlemine benzer bir şekilde hücrenin arka yüzeyine de PVD yöntemi kullanılarak 2 mbar basınç altında, 200 °C sıcaklıkta, 2000 W'lık DC güç kaynağı ile Ar gazı kullanılarak Ag ince film kaplaması gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.7'de ince film kaplama parametreleri verilmiş ve Şekil 4.14

(b)'de standart yüzey desenlendirilmiş altaş yüzeyler üzerine nanometre boyutundaki ince filmlerin uniform bir şekilde kaplanmış Ag kaplı yüzeyin SEM görüntüsü verilmiştir.

Çizelge 4.7. PVD yöntemi ile gerçekleştirilen Ag kaplama koşulları

Tabaka	Basınç (mbar)	Sıcaklık (°C)	Güç (W)	Ar (sccm)	Kalınlık (nm)
Ag	2	200	2000	200	180-290

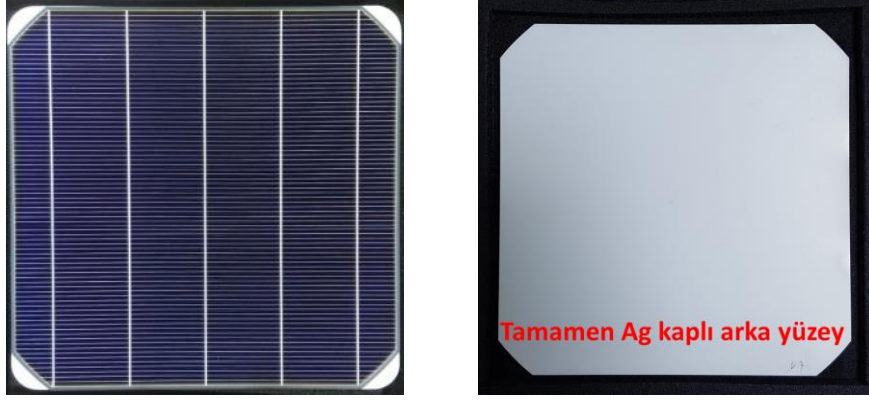


Şekil 4.14. PVD yöntemiyle ITO ince filminin (a) ve Ag ince filminin (b) SEM görüntüleri

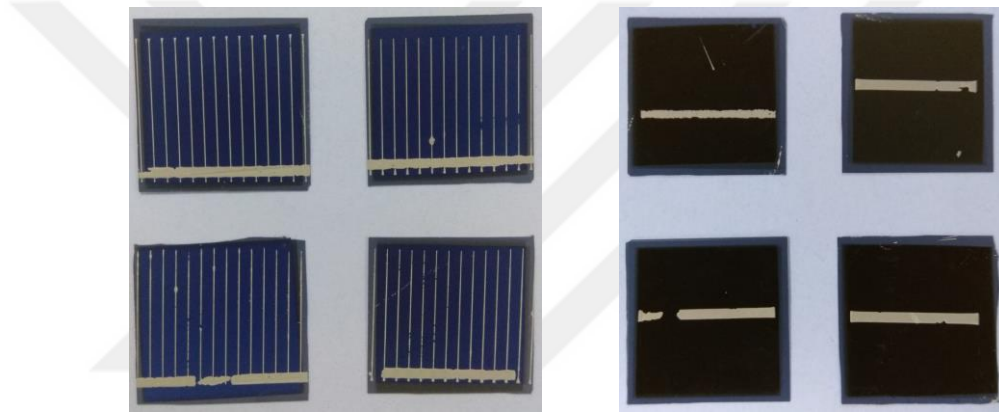
Ag arka yüzey metalizasyonunun ardından ön yüzey metalizasyon işleminin serigrafik baskı yöntemiyle uygulanmasıdır.

4.3.5 Ön yüzey metalizasyon işlemi

Ön yüzey metalizasyonu serigrafik baskı yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Ön yüzey metalizasyonu için hücre yüzeyine ilk olarak finger dizaynı oluşturulur. Finger dizaynında yüksek kaliteli gümüş pasta kullanılmaktadır. Oluşturulan dizayndan sonra hücre üzerinde bulunan gümüş pastanın kuruması için daha önceden 200 °C'ye ayarlanmış fırın içerisinde 8 ila 15 dakika boyunca ısıl işlem uygulanır. Belirlenen süre tamamlandıktan sonra busbar aşamasına geçilmektedir. Busbar dizaynı oluşturulan hücre tekrardan ısıl işleme maruz bırakılır belirlenen süre tamamlandıktan sonra NOHÜNAM nano desenlendirilmiş HIT güneş hücresi üretimi tamamlanmış olur. Üretilen 15.6 x 15.6 ve 2.5 x 2.5 cm²'lik HIT güneş hücrelerinin ön ve arka yüzey görüntüleri Fotoğraf 4.5 ve Fotoğraf 4.6'da gösterildiği gibidir.

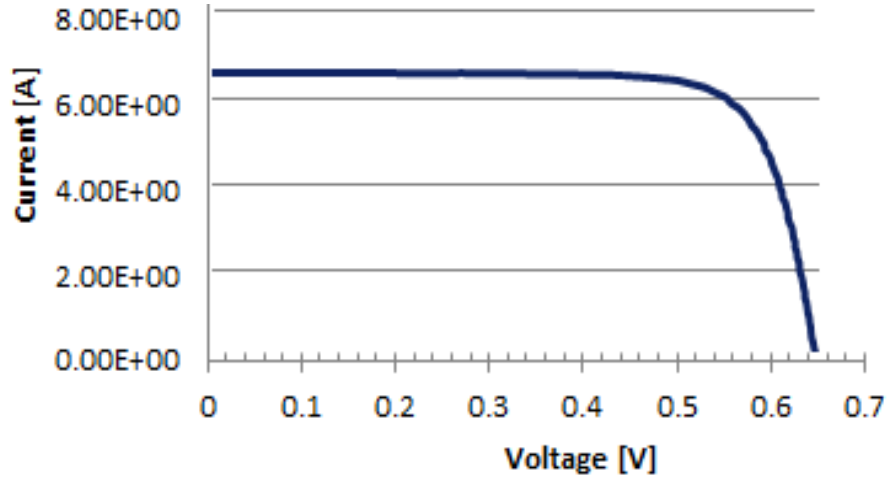


Fotoğraf 4.5. 15.6 x 15.6 cm²'lik alanda üretilen HIT güneş hücresi görüntüleri ön yüzey (solda) arka yüzey (sağda)



Fotoğraf 4.6. 2.5 x 2.5 cm²'lik alanda üretilen HIT güneş hücresi görüntüleri ön yüzey (solda) arka yüzey (sağda)

Üretilen yüksek verimli HIT güneş hücresi Kopel marka güneş simülatörü ile 25 °C sıcaklıkta temiz oda ortamında yapılan güneş simülatörü analizi sonucunda 0.3 cm²'lik alanda verimlilik değeri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre HIT güneş hücresi için 0.650 V'luk açık devre gerilimi, %70 doldurma oranı ile % 10.1 verimlilik değeri ölçülmüştür. Bu verimlilik değerinin standart HIT güneş hücresine göre daha düşük olmasının sebebi nano yapılar daha fazla foton soğururken nano yapıların oluşturduğu kusurları artırmaktadır. Bu yüzden oluşan elektron-boşluk çiftlerinin güneş hücresi fotovoltaiik parametrelerine katkı sağlayamadan bu kusurlar tarafından yakalanarak yok olduğu düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlara dair I-V grafiği Şekil 4.15'de verilmiştir.



Şekil 4.15. Yüzeysel nano desenlendirilmiş HIT güneş hücresinin I-V eğrisi

4.4. Sonuç

Tez kapsamında standart yüzey desenlendirme işlemi Si alttaş üzerine uygulanmıştır. Standart yüzey desenlendirme işleminin ardından alttaş yüzeyinde bir dizi kimyasal temizleme işlemleri uygulanmıştır. Elde edilen standart yüzey desenlendirilmiş ve kimyasal temizleme işlemi uygulanmış alttaş üzerinde MetEtch yöntemi kullanılarak nano yapılar üretilmiştir. Her iki durum için ayrı ayrı HIT güneş hücresi üretilmiş ve karakterizasyonu sağlanmıştır.

Standart yüzey desenlendirme işlemi için literatürden alınan değerler optimize edilerek istenilen yapıda ve homojenite de desenlendirilmiş alttaşlar üretilmiştir. Standart yüzey desenlendirme işlemi için uygulanan deney parametrelerinin belirlenmesi adımıyla önceki çalışmalardan elde edilen deneyimler kullanılarak parametrelerin belirlenmesinde ve optimize edilmesinde etkili yöntemlerden biri olmuştur.

Standart yüzey desenlendirme işlemi ile istenilen düzeyde ve homojenite de Si alttaşların elde edilmesinden sonra yüzey desenlendirme işlemi nano yapılarla sağlanmış ve MetEtch yöntemi kullanılarak nano yapılar elde edilmiştir. Bu kapsamda konsantrasyon yoğunluğu, konsantrasyon sıcaklığı ve aşındırma süresi optimize edilmiştir.

İlk adımda farklı konsantrasyon yoğunluğuna sahip kimyasal çözeltiler hazırlanmıştır. Bu amaçla %99.5 ve % 10 konsantrasyon yoğunluğuna sahip çözeltiler hazırlanmıştır. Elde

edilen sonuçlar doğrultusunda konsantrasyon yoğunluğunun daha düşük olmasından dolayı nano yapıların oluşmadığı gözlemlenmiştir. Konsantrasyon yoğunluğunun artırılmasıyla birlikte alttaş üzerinde elde edilmek istenen nano yapıların istenilen düzeyde olmadığı ve alttaş yüzeyinin ciddi ölçüde aşındığı tespit edilmiştir. İstenilen düzeyde ve homojenitede nanoyapılar ise 0.102 gr AgNO₃ / 12.726 ml HF konsantrasyon yoğunluğuna sahip çözelti ile yapıldığında elde edilmiştir.

Konsantrasyon yoğunluğunun optimize edilmesinden sonra ise alttaşın daldırma süresi optimize edilmiştir. Bu amaçla literatürden ve deneyimlerden elde edilen sonuçlar doğrultusunda 30, 45, 60 ve 75 dakikalarda farklı daldırma süreleri uygulanmıştır. İlk adım olan 30 dakikalık aşındırma süresinde alttaş yüzey morfolojisinde değişiklikler gözlemlenmiş fakat aşındırma süresinin alttaş üzerinde nano yapıların oluşması için yeterli bir süre olmadığı gözlemlenmiştir. 45 dakika aşındırma süresinde ise alttaş yüzeyinde nano yapının oluştuğu gözlemlenmiş fakat homojen bir dağılımın olmadığı görülmüştür. 60 dakika aşındırma süresinde nano yapı oluşumu alttaş yüzeyinde homojen bir şekilde oluştuğu gözlemlenmiştir. 75 dakikalık aşındırma süresinde nano yapıların oluşup tekrar aşındığı gözlemlenmiştir. Bu kapsamda optimum değer olarak 60 dakikalık aşındırma süresi olarak belirlenmiştir ve istenilen nano yapılar belirtilen aşındırma süresi altında elde edilmiştir.

Konsantrasyon sıcaklığının belirlenmesi adımıyla ise literatürden ve deneyimlerden elde edilen bilgiler doğrultusunda 30, 50, 65 ve 80 °C sıcaklıkları ile standart desenlendirilmiş alttaş üzerinde nano yapılar elde edilmiştir. 65 ve 80 °C'de üretim yapmak, nano yapıların birbirlerine yapışmasına neden olurken ayrıca çözelti konsantrasyonu buharlaşmaya maruz kalacağından konsantrasyon oranında azalmanın meydana geldiği gözlemlenmiş bu da nano yapıların üretimini olumsuz yönde etkilemiştir. Konsantrasyon oranının azalması nedeniyle standart yüzey desenlendirilmiş yapıların uç noktalarında nano yapılar gözlemlenmemiştir.

Elde edilen tüm parametreler sonucunda homojen ve istenilen nano yapılar elde edilmiştir. Nano desenlendirme işleminin güneş hücrelerinin verimini arttırmaya yönelik önemli adımlardan biri olduğu yaygın olarak bilinmektedir. Ancak yapılan bu çalışmada nano yüzey desenlendirme güneş hücresini soğurma kapasitesini artırmasına rağmen nano yapıların oluşturduğu kusurlardan dolayı verimlilik değeri istenilen seviyeye

ulaşmamıştır. Ancak bu kapsamada yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda güneş hücrelerinin veriminin artışınının sağlanmasına yönelik önemli bir adım atılmıştır. Aynı zamanda literatüre bu kapsamda önemli düzeyde katkıda bulunulmuştur.



KAYNAKLAR

Abbott, M. and Cotter, J., "Optical and electrical properties of laser texturing for high-efficiency solar cells", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 14(3), 225-235, 2006.

Al-Husseini, A. M. and Lahlouh, B., "Silicon pyramid structure as a reflectivity reduction mechanism", *J. Appl. Sci* 17, 374-383, 2017.

Augusto, A., Herasimenka, S. Y., King, R. R., Bowden, S. G. and Honsberg, C., "Analysis of the recombination mechanisms of a silicon solar cell with low bandgap-voltage offset", *Journal of Applied Physics* 121(20), 205704, 2017.

Bai, F., Li, M., Song, D., Yu, H., Jiang, B. and Li, Y., "One-step synthesis of lightly doped porous silicon nanowires in HF/AgNO₃/H₂O₂ solution at room temperature", *Journal of Solid State Chemistry* 196, 596-600, 2012.

Balestrieri, M., Pysch, D., Becker, J. P., Hermle, M., Warta, W. and Glunz, S. W., "Characterization and optimization of indium tin oxide films for heterojunction solar cells (vol 95, pg 2390, 2011)", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 115, 213-213, 2013.

Barycka, I. and Zubel, I., "Silicon anisotropic etching in KOH-isopropanol etchant", *Sensors and Actuators A: Physical* 48(3), 229-238, 1995.

Bätzner, D., Andrault, Y., Andreetta, L., Buechel, A., Frammelsberger, W., Guerin, C., Holm, N., Lachenal, D., Meixenberger, J. and Papet, P., "Characterisation of over 21% efficient Silicon Heterojunction cells developed at Roth & Rau Switzerland", *Proceedings of the 26th EU Photovoltaic Specialists Conference*, 2011.

Becquerel, A.-E., "Recherches sur les effets de la radiation chimique de la lumiere solaire au moyen des courants electriques", *CR Acad. Sci* 9, 145-149, 1839.

Booker, K., Rahman, S., Chong, T.-K., Mankelow, R., Weber, K. and Blakers, A., "A Robust Metal-Assisted Etching Process for Ag-Catalyzed Texturing of Silicon", *IEEE Journal of Photovoltaics* 5(3), 766-773, 2015.

Burrows, M. Z., Das, U. K., Opila, R. L., De Wolf, S. and Birkmire, R. W., "Role of hydrogen bonding environment in a-Si : H films for c-Si surface passivation", *Journal of Vacuum Science & Technology A* 26(4), 683-687, 2008.

Canka Kılıç, F., "Güneş enerjisi, Türkiye'deki son durumu ve üretim teknolojileri", *Engineer & The Machinery Magazine*(671)2015.

Chopra, K. L., Paulson, P. D. and Dutta, V., "Thin-film solar cells: An overview", *Progress in Photovoltaics* 12(2-3), 69-92, 2004.

Dao, V. A., Heo, J., Choi, H., Kim, Y., Park, S., Jung, S., Lakshminarayan, N. and Yi, J., "Simulation and study of the influence of the buffer intrinsic layer, back-surface field, densities of interface defects, resistivity of p-type silicon substrate and transparent conductive oxide on heterojunction with intrinsic thin-layer (HIT) solar cell", *Solar Energy* 84(5), 777-783, 2010.

De Wolf, S., Descoedres, A., Holman, Z. C. and Ballif, C., "High-efficiency silicon heterojunction solar cells: A review", *Green* 2(1), 7-24, 2012.

De Wolf, S. and Kondo, M., "Abruptness of a-Si: H/ c-Si interface revealed by carrier lifetime measurements", *Applied Physics Letters* 90(4), 042111, 2007.

De Wolf, S., Olibet, S. and Ballif, C., "Stretched-exponential a-Si: H/ c-Si interface recombination decay", *Applied Physics Letters* 93(3), 032101, 2008.

Descoedres, A., Barraud, L., Bôle Rothen, P., De Wolf, S., Demareux, B., Holman, Z. C., Seif, J. P., Zicarelli Fernandez, F., Ballif, C. and Geissbühler, J., (2011a), "21% efficiency silicon heterojunction solar cells produced with very high frequency PECVD" 21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-21).

Descoeurdes, A., Barraud, L., De Wolf, S., Strahm, B., Lachenal, D., Guérin, C., Holman, Z., Zicarelli, F., Demareux, B. and Seif, J., "Improved amorphous/crystalline silicon interface passivation by hydrogen plasma treatment", *Applied Physics Letters* 99(12), 123506, 2011b.

Dimova-Malinovska, D., Sendova-Vassileva, M., Tzenov, N. and Kamenova, M., "Preparation of thin porous silicon layers by stain etching", *Thin Solid Films* 297(1-2), 9-12, 1997.

Doshi, P., Jellison, G. E. and Rohatgi, A., "Characterization and optimization of absorbing plasma-enhanced chemical vapor deposited antireflection coatings for silicon photovoltaics", *Applied Optics* 36(30), 7826-7837, 1997.

Douani, R., Piret, G., Hadjersi, T., Chazalviel, J.-N. and Solomon, I., "Formation of a-Si:H and a-Si_{1-x}C_x:H nanowires by Ag-assisted electroless etching in aqueous HF/AgNO₃ solution", *Thin Solid Films* 519(16), 5383-5387, 2011.

Easton, R. and Votaw, M., "Vanguard I IGY satellite (1958 beta)", *Review of Scientific Instruments* 30(2), 70-75, 1959.

Edwards, M., Bowden, S., Das, U. and Burrows, M., "Effect of texturing and surface preparation on lifetime and cell performance in heterojunction silicon solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 92(11), 1373-1377, 2008.

Fuhs, W., Korte, L. and Schmidt, M., "Heterojunctions of hydrogenated amorphous silicon and monocrystalline silicon", *Journal of Optoelectronics and Advanced materials* 8(6), 1989-1995, 2006.

Fuhs, W., Niemann, K. and Stuke, J., "Heterojunctions of amorphous silicon and silicon single crystals", *AIP Conference Proceedings*, 1974.

Fujiwara, H. and Kondo, M., "Impact of epitaxial growth at the heterointerface of a-Si:H/c-Si solar cells", *Applied Physics Letters* 90(1)2007.

Green, M., "Solar cells: operating principles, technology, and system applications. University of New South Wales, Kensington", *NSW* 20331998.

Han, S. E. and Chen, G., "Optical Absorption Enhancement in Silicon Nanohole Arrays for Solar Photovoltaics", *Nano Letters* 10(3), 1012-1015, 2010.

Hannebauer, H., Schimanke, S., Falcon, T., Altermatt, P. P. and Dullweber, T., "Optimized stencil print for low Ag paste consumption and high conversion efficiencies", *Energy Procedia* 67, 108-115, 2015.

Hayashi, S., Minemoto, T., Takakura, H. and Hamakawa, Y., "Influence of texture feature size on spherical silicon solar cells", *Rare Metals* 25(6), 115-120, 2006.

Heitsch, A. T., Fanfair, D. D., Tuan, H.-Y. and Korgel, B. A., "solution– liquid– solid (SLS) growth of silicon nanowires", *Journal of the American Chemical Society* 130(16), 5436-5437, 2008.

Herzinger, C. M., Johs, B., McGahan, W. A., Woollam, J. A. and Paulson, W., "Ellipsometric determination of optical constants for silicon and thermally grown silicon dioxide via a multi-sample, multi-wavelength, multi-angle investigation", *Journal of Applied Physics* 83(6), 3323-3336, 1998.

Holmes, J. D., Johnston, K. P., Doty, R. C. and Korgel, B. A., "Control of thickness and orientation of solution-grown silicon nanowires", *Science* 287(5457), 1471-1473, 2000.

Hong, S., Bae, J., Koo, B., Chang, I., Cho, G. Y., Kim, Y. B., Cha, S. W. and Prinz, F. B., "Nanostructuring Methods for Enhancing Light Absorption Rate of Si-Based Photovoltaic Devices: A Review", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 1(1), 67-74, 2014.

Hu, L. and Chen, G., "Analysis of optical absorption in silicon nanowire Arrays for photovoltaic applications", *Nano Letters* 7(11), 3249-3252, 2007.

Hussain, S. Q., Mallem, K., Khan, M. A., Khokhar, M. Q., Lee, Y., Park, J., Lee, K. S., Kim, Y., Cho, E. C., Cho, Y. H. and Yi, J., "Versatile Hole Carrier Selective MoO_x Contact for High Efficiency Silicon Heterojunction Solar Cells: A Review", *Transactions on Electrical and Electronic Materials* 20(1), 1-6, 2019.

Iftiqar, S., Lee, Y., Ju, M., Balaji, N., Dhungel, S. K. and Yi, J., Fabrication of Crystalline Silicon Solar Cell with Emitter Diffusion, SiN_x Surface Passivation and Screen Printing of Electrode, *IntechOpen*, 2012.

Illiberi, A., Sharma, K., Creatore, M. and van de Sanden, M. C. M., "Role of a-Si:H bulk in surface passivation of c-Si wafers", *Physica Status Solidi-Rapid Research Letters* 4(7), 172-174, 2010.

Kayes, B. M., Atwater, H. A. and Lewis, N. S., "Comparison of the device physics principles of planar and radial p-n junction nanorod solar cells", *Journal of Applied Physics* 97(11)2005.

Kinoshita, T., Fujishima, D., Yano, A., Ogane, A., Tohoda, S., Matsuyama, K., Nakamura, Y., Tokuoka, N., Kanno, H. and Sakata, H., "The approaches for high efficiency HIT solar cell with very thin (< 100µm) silicon wafer over 23%", *the 26th EUPVSEC*, 871-874, 2011.

Kramer, B., *Advances in solid state physics*, 42, *Springer*, 2007.

Lai, J.-H., *Development of low-cost high-efficiency commercial-ready advanced silicon solar cells*, 2014

Lee, J. H. and Geer, R. E., *Templated Si-Based Nanowires via Solid-Liquid-Solid (SLS) and Vapor-Liquid-Solid (VLS) Growth: Novel Growth Mode, Synthesis, Morphology Control, Characteristics, and Electrical Transport*, *IntechOpen*, 2010.

Li, J. S., Yu, H. Y., Wong, S. M., Zhang, G., Sun, X. W., Lo, P. G. Q. and Kwong, D. L., "Si nanopillar array optimization on Si thin films for solar energy harvesting", *Applied Physics Letters* 95(3)2009.

Li, K., Wang, X., Lu, P., Ding, J. and Yuan, N., "The influence of passivation and photovoltaic properties of α -Si: H coverage on silicon nanowire array solar cells", *Nanoscale research letters* 8(1), 396, 2013.

Li, X. and Bohn, P., "Metal-assisted chemical etching in HF/H₂O₂ produces porous silicon", *Applied Physics Letters* 77(16), 2572-2574, 2000.

Li, X., Chan, K. and Ramer, R., "Fabrication of Through via Holes in Ultra-Thin Fused Silica Wafers for Microwave and Millimeter-Wave Applications", *Micromachines* 9(3), 138, 2018.

Liu, X., Coxon, P. R., Peters, M., Hoex, B., Cole, J. M. and Fray, D. J., "Black silicon: fabrication methods, properties and solar energy applications", *Energy & Environmental Science* 7(10), 3223-3263, 2014a.

Liu, Y., Das, A., Lin, Z., Cooper, I. B., Rohatgi, A. and Wong, C., "Hierarchical robust textured structures for large scale self-cleaning black silicon solar cells", *Nano Energy* 3, 127-133, 2014b.

Lo, T. and Huang, H., "Anisotropic etching of deep trench for silicon monolithic microwave integrated circuit", *Electronics Letters* 29(25), 2202-2203, 1993.

Ma, K. K., Drysdale, T. D., Blaikie, R. J. and Cumming, D. R., "Novel silicon bulk micromachining process for submillimeter rectangular waveguide fabrication", *MEMS Design, Fabrication, Characterization, and Packaging*, 2001.

Martensson, T., Borgstrom, M., Seifert, W., Ohlsson, B. J. and Samuelson, L., "Fabrication of individually seeded nanowire arrays by vapour-liquid-solid growth", *Nanotechnology* 14(12), 1255-1258, 2003.

Meemongkolkiat, V., Development of high efficiency monocrystalline Si solar cells through improved optical and electrical confinement, PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2008

Mertens, K., Photovoltaics: fundamentals, technology, and practice, *John Wiley & Sons*, 2018.

Mette, A., New concepts for front side metallization of industrial silicon solar cells, *Verlag Dr. Hut*, 2007.

Moon, K.-J., Choi, J.-H., Lee, T.-I., Ham, M.-H., Maeng, W.-J., Hwang, I., Kim, H. and Myoung, J.-M., "Electrical transport properties in electroless-etched Si nanowire field-effect transistors", *Microelectronic Engineering* 87(11), 2407-2410, 2010.

Muñoz, D., Carreras, P., Escarré, J., Ibarz, D., De Nicolás, S. M., Voz, C., Asensi, J. and Bertomeu, J., "Optimization of KOH etching process to obtain textured substrates suitable for heterojunction solar cells fabricated by HWCVD", *Thin Solid Films* 517(12), 3578-3580, 2009.

Muñoz, D., Desrues, T., Ozanne, A., De Vecchi, S., de Nicolás, S. M., Jay, F., Souche, F., Nguyen, N., Denis, C. and Arnal, C., "Key aspects on development of high efficiency heterojunction and IBC heterojunction solar cells: Towards 22% efficiency on industrial size", *Proc. 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2012.

Naumova, O., Nastaushev, Y. V., Svitashva, S., Sokolov, L., Zakharov, N., Werner, P., Gavrilova, T., Dultsev, F. and Aseev, A., "Molecular-beam epitaxy-grown Si whisker structures: morphological, optical and electrical properties", *Nanotechnology* 19(22), 225708, 2008.

Nelson, J., The physics of solar cells, *World Scientific Publishing Company*, 2003.

Okano, T., "A New Multi-Electrode Evaporator for Refractory-Metals and Its Application to Getter Pumps", *Japanese Journal of Applied Physics* 20(1), 213-219, 1981.

Okuda, K., Okamoto, H. and Hamakawa, Y., "Amorphous Si/polycrystalline Si stacked solar cell having more than 12% conversion efficiency", *Japanese Journal of Applied Physics* 22(9A), L605, 1983.

Pan, Z. W., Dai, Z. R., Xu, L., Lee, S. T. and Wang, Z. L., "Temperature-controlled growth of silicon-based nanostructures by thermal evaporation of SiO powders", *Journal of Physical Chemistry B* 105(13), 2507-2514, 2001.

Panek, p., Swatowska, B., sypień, A., Musztyfaga-Staszuk, M. and Jakubowska, M., "The stencil printing for front contact formation on the silicon solar cells", *Przegląd Elektrotechniczny* 93(3), 272--275, 2017.

Pankove, J. and Tarng, M., "Amorphous silicon as a passivant for crystalline silicon", *Applied Physics Letters* 34(2), 156-157, 1979.

Park, J. B., Oh, J. S., Gil, E., Kyoung, S.-J., Kim, J.-S. and Yeom, G. Y., "Plasma texturing of multicrystalline silicon for solar cell using remote-type pin-to-plate dielectric barrier discharge", *Journal of Physics D: Applied Physics* 42(21), 215201, 2009.

Peng, K., Fang, H., Hu, J., Wu, Y., Zhu, J., Yan, Y. and Lee, S., "Metal-particle-induced, highly localized site-specific etching of Si and formation of single-crystalline Si nanowires in aqueous fluoride solution", *Chemistry—A European Journal* 12(30), 7942-7947, 2006.

Peng, K., Lu, A., Zhang, R. and Lee, S. T., "Motility of metal nanoparticles in silicon and induced anisotropic silicon etching", *Advanced Functional Materials* 18(19), 3026-3035, 2008.

Peng, K., Xu, Y., Wu, Y., Yan, Y., Lee, S. T. and Zhu, J., "Aligned single-crystalline Si nanowire arrays for photovoltaic applications", *Small* 1(11), 1062-1067, 2005.

Peng, K., Yan, Y., Gao, S. and Zhu, J., "Dendrite-assisted growth of silicon nanowires in electroless metal deposition", *Advanced Functional Materials* 13(2), 127-132, 2003.

Peng, K. and Zhu, J., "Morphological selection of electroless metal deposits on silicon in aqueous fluoride solution", *Electrochimica Acta* 49(16), 2563-2568, 2004.

Peng, K. Q., Yan, Y. J., Gao, S. P. and Zhu, J., "Synthesis of large-area silicon nanowire arrays via self-assembling nanoelectrochemistry", *Advanced materials* 14(16), 1164-1167, 2002.

Pla, J., Tamasi, M., Rizzoli, R., Losurdo, M., Centurioni, E., Summonte, C. and Rubinelli, F., "Optimization of ITO layers for applications in a-Si/c-Si heterojunction solar cells", *Thin Solid Films* 425(1-2), 185-192, 2003.

Qu, Y., Liao, L., Li, Y., Zhang, H., Huang, Y. and Duan, X., "Electrically conductive and optically active porous silicon nanowires", *Nano Letters* 9(12), 4539-4543, 2009.

Ribeyron, P., Munoz, D., Kleider, J., Favre, W., Cabarrocas, P. R., Labrune, M., Geerligs, B., Weeber, A., Spaeth, M. and Olson, C., "European record efficiency amorphous-crystalline-silicon heterojunction solar cells: Final results from the hetsi project", *Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2011.

Rohatgi, A., Meier, D. L., McPherson, B., Ok, Y. W., Upadhyaya, A. D., Lai, J. H. and Zimbardi, F., High-Throughput Ion-Implantation for Low-Cost High-Efficiency Silicon Solar Cells, 15, A. Aberle, 2012.

Sato, K., Shikida, M., Yamashiro, T., Tsunekawa, M. and Ito, S., "Roughening of single-crystal silicon surface etched by KOH water solution", *Sensors and Actuators A: Physical* 73(1-2), 122-130, 1999.

Schubert, L., Werner, P., Zakharov, N., Gerth, G., Kolb, F., Long, L., Gösele, U. and Tan, T., "Silicon nanowhiskers grown on < 111 > Si substrates by molecular-beam epitaxy", *Applied Physics Letters* 84(24), 4968-4970, 2004.

Schüttauf, J.-W. A., van der Werf, K. H., Kielen, I. M., van Sark, W. G., Rath, J. K. and Schropp, R. E., "Excellent crystalline silicon surface passivation by amorphous silicon irrespective of the technique used for chemical vapor deposition", *Applied Physics Letters* 98(15), 153514, 2011.

Seeger, K. and Palmer, R. E., "Fabrication of ordered arrays of silicon nanopillars", *Journal of Physics D-Applied Physics* 32(24), L129-L132, 1999.

Seyhan, A., Altan, T., Ecer, Ö. C. and Zan, R., "A Hydrogenated Amorphous Silicon (a-Si: H) Thin Films for Heterojunction Solar Cells: Structural and Optical Properties", *Journal of Physics: Conference Series*, 2017.

Shah, A. V., Platz, R. and Keppner, H., "Thin-film silicon solar-cells - a review and selected trends", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 38(1-4), 501-520, 1995.

Shockley, W. and Queisser, H. J., "Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells", *Journal of Applied Physics* 32(3), 510-519, 1961.

Sievert, W., Zimmermann, K., Hartmann, B., Klimm, C., Jacob, K. and Angermann, H., "Surface texturization and interface passivation of mono-crystalline silicon substrates by wet chemical treatments", *Solid State Phenomena*, 2009.

Singh, P. K., Kumar, R., Lal, M., Singh, S. and Das, B., "Effectiveness of anisotropic etching of silicon in aqueous alkaline solutions", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 70(1), 103-113, 2001.

Solanki, C. S., *Solar photovoltaics: fundamentals, technologies and applications*, **PHI Learning Pvt. Ltd.**, 2015.

Sritharathikhun, J., Jiang, F., Miyajima, S., Yamada, A. and Konagai, M., "Optimization of p-type hydrogenated microcrystalline silicon oxide window layer for high-efficiency crystalline silicon heterojunction solar cells", *Japanese Journal of Applied Physics* 48(10R), 101603, 2009.

Srivastava, S. K., Kumar, D., Schmitt, S., Sood, K., Christiansen, S. and Singh, P., "Large area fabrication of vertical silicon nanowire arrays by silver-assisted single-step chemical etching and their formation kinetics", *Nanotechnology* 25(17), 175601, 2014.

Srivastava, S. K., Kumar, D., Sharma, M., Kumar, R. and Singh, P., "Silver catalyzed nano-texturing of silicon surfaces for solar cell applications", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 100, 33-38, 2012.

Strahm, B., Andraut, Y., Bäetzner, D., Lachenal, D., Guérin, C., Kobas, M., Mai, J., Mendes, B., Schulze, T. and Wahli, G., "Uniformity and quality of monocrystalline silicon passivation by thin intrinsic amorphous silicon in a new generation plasma-enhanced chemical vapor deposition reactor", *MRS Online Proceedings Library Archive* 12452010.

Swanson, R. M. and Ieee, Approaching the 29% limit efficiency of silicon solar cells, Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005.

Taguchi, M., Yano, A., Tohoda, S., Matsuyama, K., Nakamura, Y., Nishiwaki, T., Fujita, K. and Maruyama, E., "24.7% record efficiency HIT solar cell on thin silicon wafer", *IEEE Journal of Photovoltaics* 4(1), 96-99, 2014.

Tarnag, M. L. and Pankove, J. I., "Passivation of pn junction in crystalline silicon by amorphous silicon", *IEEE Transactions on Electron Devices* 26(11), 1728-1734, 1979.

Trentler, T. J., Hickman, K. M., Goel, S. C., Viano, A. M., Gibbons, P. C. and Buhro, W. E., "Solution-liquid-solid growth of crystalline iii-v semiconductors - an analogy to vapor-liquid-solid growth", *Science* 270(5243), 1791-1794, 1995.

Tsakalagos, L., "Nanostructures for photovoltaics", *Materials Science & Engineering R-Reports* 62(6), 175-189, 2008.

van Sark, W., Korte, L. and Roca, F., Physics and technology of amorphous-crystalline heterostructure silicon solar cells, *Springer*, 2012.

Wan, L., Gong, W., Jiang, K., Li, H., Tao, B. and Zhang, J., "Preparation and surface modification of silicon nanowires under normal conditions", *Applied Surface Science* 254(15), 4899-4907, 2008.

Wang, T. H., Iwaniczko, E., Page, M. R., Levi, D. H., Yan, Y., Branz, H. M. and Wang, Q., "Effect of emitter deposition temperature on surface passivation in hot-wire chemical vapor deposited silicon heterojunction solar cells", *Thin Solid Films* 501(1-2), 284-287, 2006.

Weitzel, I., Primig, R. and Kempter, K., "Preparation of glow discharge amorphous silicon for passivation layers", *Thin Solid Films* 75(2), 143-150, 1981.

Werner, J. H., Bergmann, R. and Brendel, R., The challenge of crystalline thin film silicon solar cells, 34, R. Helbig, 1995.

Werner, P., Zakharov, N. D., Gerth, G., Schubert, L. and Gösele, U., "On the formation of Si nanowires by molecular beam epitaxy: Dedicated to Professor Dr. Knut Urban on the occasion of his 65th birthday", *Zeitschrift für Metallkunde* 97(7), 1008-1015, 2006.

Winters, H. F., "The role of chemisorption in plasma etching", *Journal of Applied Physics* 49(10), 5165-5170, 1978.

Xia, Y., Yang, P., Sun, Y., Wu, Y., Mayers, B., Gates, B., Yin, Y., Kim, F. and Yan, H., "One-dimensional nanostructures: synthesis, characterization, and applications", *Advanced materials* 15(5), 353-389, 2003.

Yablonovitch, E., Gmitter, T., Swanson, R. and Kwark, Y., "A 720 mV open circuit voltage SiO_x:c-Si: SiO_x double heterostructure solar cell", *Applied Physics Letters* 47(11), 1211-1213, 1985.

Yoo, J., Cho, J.-S., Ahn, S., Gwak, J., Cho, A., Eo, Y.-J., Yun, J.-H., Yoon, K. and Yi, J., "Random reactive ion etching texturing techniques for application of multicrystalline silicon solar cells", *Thin Solid Films* 546, 275-278, 2013.

Yoshikawa, K., Yoshida, W., Irie, T., Kawasaki, H., Konishi, K., Ishibashi, H., Asatani, T., Adachi, D., Kanematsu, M. and Uzu, H., "Exceeding conversion efficiency of 26% by heterojunction interdigitated back contact solar cell with thin film Si technology", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 173, 37-42, 2017.

Zhao, J., Assessment of 2D Materials and Transition Metal Oxides as Carrier Selective Contacts for Silicon Solar Cells, PhD Thesis, University of New South Wales, Australia 2018

Zhao, L., Zhou, C.-L., Li, H.-L., Diao, H.-W. and Wang, W.-J., "Characterization on the passivation stability of HF aqueous solution treated silicon surfaces for HIT solar cell application by the effective minority carrier lifetime measurement", *Chinese Journal of Physics* 48(3), 392-399, 2010.

Zhu, J., Yu, Z. F., Burkhard, G. F., Hsu, C. M., Connor, S. T., Xu, Y. Q., Wang, Q., McGehee, M., Fan, S. H. and Cui, Y., "Optical Absorption Enhancement in Amorphous Silicon Nanowire and Nanocone Arrays", *Nano Letters* 9(1), 279-282, 2009.

Zolper, J. C., Narayanan, S., Wenham, S. R. and Green, M. A., "16.7% efficient, laser textured, buried contact polycrystalline silicon solar cell", *Applied Physics Letters* 55(22), 2363-2365, 1989.

ÖZ GEÇMİŞ

Emre KARTAL 01.01.1992 tarihinde Konya'nın Ereğli ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğretimini Ereğli'de tamamladı. 2010 yılında girdiği Niğde Üniversitesi Fizik Bölümünden Haziran 2014'de Fizik bölüm üçüncüsü olarak mezun oldu ve bu kapsamda üstün başarı ve onur belgesi almaya hak kazandı. Ocak 2015'de Pedagojik Formasyon Eğitim Sertifikası aldı. Ağustos 2016'da Necmettin Erbakan Üniversitesi'nde Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Öğretmenliği Bölümüne başladı. 2016 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fizik Bölümü tezli yüksek lisans programına başladı.

Laboratuvar deneyimi olarak PVD, PECVD ve Glow Box ile malzeme üretimi yapabilmekte ve İpek Baskı, Elipsometre, Güneş Simülatörü, Raman, Elektrolüminesans, Fotolüminesans, Yaşam Süresi Ölçümü, Dört Nokta Direnç Ölçümü, Tabak Direnci Ölçüm ve Profilometre gibi temel karakterizasyon cihazlarını kullanabilmektedir.

Bilim dalındaki ilgi alanı Güneş enerjisi teknolojileri, incefilm, nano yapılar ve malzeme karakterizasyonudur.

TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından, 1 (bir) adet ulusal makale ile 2 (iki) adet uluslararası bildiri üretilmiştir. Bu üretilen çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

ALTUNTEPE, A., ÖZTÜRK, M. F., KARTAL, E., SEYHAN, A. and Recep, Z., GRAFEN SENTEZİ İÇİN ALT-TAŞ TEMİZLEME YAKLAŞIMLARI, "**Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**" 8(1): 559-566.

Ayşe Seyhan, Filiz Keles and Emre Kartal, High Efficiency Silicon Heterojunction Solar Cell Decorated with Si Nanowires, NANOTR-13 13th **NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY CONFERENCE** 22-25 October 2017, Antalya-Turkey.

Emre KARTAL, Filiz KELEŞ and Ayşe SEYHAN, A Smart Way of Pyramidal Silicon Properties Improvement for PV Applications by HIPS Technique, **PVCON 2018 PHOTOVOLTAIC CONFERENCE**, International Conferance on Photovoltaic Science and Technologies, Ankara-Turkey.

